



СПРАВОЧНИК по РАДИОАСТРОНОМИИ ТРЕТЬЕ ИЗДАНИЕ

Издание 2013 года
Бюро радиосвязи



Справочник
по радиоастрономии
Третье издание

ИЗДАНИЕ 2013 ГОДА
БЮРО РАДИОСВЯЗИ

Фото на обложке: Шесть одинаковых антенн с диаметром зеркал 22 м образуют Австралийский компактный комплекс радиотелескопов, принадлежащий агентству CSIRO. Этот комплекс представляет собой синтез-телескоп, учитывающий вращение Земли; расположен в обсерватории Пола Уайлда

Автор: Дэвид Смит

© ITU 2015

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких-либо средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

Введение к третьему изданию Председателя Рабочей группы 7D МСЭ-R (Радиоастрономия)

Для меня это огромная честь и привилегия – представить третье издание Справочника по радиоастрономии, и я делаю это с большим удовольствием.

Настоящий Справочник не предназначен служить в качестве сборника материалов по радиоастрономии, а касается в основном тех аспектов радиоастрономии, которые связаны с координацией частот, т. е. с управлением использованием радиоспектра для сведения к минимуму помех между службами радиосвязи. Радиоастрономия не затрагивает вопросы передачи сигналов радиоволн в полосах частот, распределенных для ее работы, и не может создавать вредные помехи другим службам. С другой стороны, принимаемые космические сигналы, как правило, чрезвычайно слабы, и передачи других служб могут создавать помехи для таких сигналов.

В двенадцати главах и пяти Добавлениях к Справочнику читатель знакомится с радиоастрономией, которая рассматривается как служба радиосвязи, предназначенная для координации частот. Справочник начинается с преамбулы на тему радиоастрономии и общества, при этом особо подчеркивается роль и значение радиоастрономии в жизни общества, зачастую выходящие за рамки астрономии как таковой. Далее в Справочнике рассматриваются такие вопросы, как характеристики радиоастрономии, предпочтительные полосы частот для наблюдений, специальные применения радиоастрономии, чувствительность к радиочастотным (РЧ) помехам со стороны других служб, а также вопросы совместного использования радиочастотного спектра с другими службами. В данное третье издание Справочника были включены дополнительные главы по методам ослабления влияния РЧ-помех, по созданию и характеристикам "зон радиомолчания" (RQZ), по поиску внеземных цивилизация (SETI), а также по радиолокационной астрономии наземного базирования. Были также включены новые Добавления, в которых рассматривается использование единиц измерения и шкалы децибел в радиоастрономии, а также приводится расширенный список акронимов.

Почти десять лет прошло с тех пор, как было опубликовано второе издание Справочника по радиоастрономии. За это время МСЭ провел три всемирные конференции по радиосвязи (ВКР-2003, ВКР-2007 и ВКР-2012).

В этот период времени услуги связи развивались стремительными темпами. Сегодня услуги беспроводной связи широко распространены в нашем обществе, для которого характерно множество взаимосвязей. Одновременно с этим технологические разработки в радиоастрономии позволили проводить наблюдения в весьма широких полосах частот, которые зачастую не охватываются распределениями МСЭ. Такие разработки поставили ряд сложных задач по обеспечению защиты радиоастрономии, и необходимо искать новые пути для их решения. Проводится непрерывная разработка новых методов ослабления РЧ-помех. Кроме того, были определены зоны радиомолчания, представляющие уникальные места на планете, в которых радиоастрономические службы могут работать и развиваться в условиях минимальных помех. В рамках структуры МСЭ указанные разработки описываются в новых и подробных отчетах МСЭ-R.

В настоящее время радиоастрономические службы работают также в полосах частот выше 275 ГГц. Примером может служить обсерватория ALMA в Южной Америке, работа на которой ведется с 2013 года. Эти полосы частот не подпадают под формальные распределения МСЭ, однако на ВКР-2012 был разъяснен порядок использования таких полос частот пассивными службами, при котором не возникает препятствий для развития активных служб. Исследования показали, что на столь высоких частотах совместное использование частот службами не должно представлять особых трудностей.

Непосредственно перед ВКР-2012 Рабочая группа 7D МСЭ-R (РГ 7D) начала работу по пересмотру Справочника, которая продолжалась в течение двух лет. РГ 7D включена в состав 7-й Исследовательской комиссии МСЭ-R (Научные службы), в сферу деятельности которой входят радиоастрономия, SETI и радиолокационная астрономия. Наряду с необходимыми работами по пересмотру и расширению Справочника, членам РГ 7D пришлось пересматривать соответствующие

рекомендации и отчеты МСЭ-Р для обеспечения защиты радиоастрономической службы. В третье издание Справочника были успешно включены результаты этих усилий членов Рабочей группы.

Мне хотелось бы отметить значительный вклад, внесенный небольшой группой специалистов, без участия которых этот Справочник не мог бы появиться на свет. Особую признательность я выражаю следующим членам РГ 7D (в алфавитном порядке):

- д-р В. Баан (Нидерланды), д-р С. Х. Чун (Корея), д-р А. Клегг (Соединенные Штаты Америки);
- д-р М. Дэвис (Соединенные Штаты Америки), д-р Т. Гергли (Соединенные Штаты Америки), д-р А. Йесснер (Германия);
- д-р Г. Лэнгстон (Соединенные Штаты Америки), д-р Б. Льюис (Соединенные Штаты Америки), д-р Х. Лист (Соединенные Штаты Америки);
- д-р М. Охиши (Япония), д-р П. Томассон (Соединенное Королевство), д-р В. ван Дриель (Франция).

Свой вклад сделали также: д-р Дж. Ромни из США, который внес значительные изменения в разделы по космической интерферометрии со сверхдлинной базой (VLBI), д-р Дж. Ловелл из Австралии – в раздел геодезической интерферометрии VLBI, а также д-р К. Тэппинг (Канада), внесший изменения в раздел по солнечной астрономии. Существенную помощь в работе оказал Секретариат МСЭ-Р, особенно советник 7-й Исследовательской комиссии г-н Вадим Ноздрин, а также Секретариат, возглавляемый г-жой Элизабет Мостин-Джонс. И наконец, я хотел бы выразить искреннюю признательность председателю 7-й Исследовательской комиссии д-ру Винсенту Минсу, а также вице-председателю, ответственному за выпуск справочников, д-ру Джону Зузеку за их постоянную помощь и поддержку при выполнении данной работы.

Я благодарю всех участников и желаю всяческих успехов Справочнику МСЭ-Р по радиоастрономии.

Анастасиос Циумис
Председатель Рабочей группы 7D МСЭ-Р

ПРЕДИСЛОВИЕ

Справочник по радиоастрономии разработан экспертами Рабочей группы 7D 7-й Исследовательской комиссии МСЭ-R (Научные службы) под председательством д-ра А. Циумиса (Австралия), председателя Рабочей группы 7D.

Радиоастрономия играет ключевую роль в изучении проблем фундаментальной физики и космологии. Исследование многих физических явлений не может проводиться в других частях электромагнитного спектра. Вот лишь несколько примеров: линия спектра излучения нейтрального атомарного водорода; космическое микроволновое фоновое излучение и его угловая структура, играющие колоссальную роль в космологии; огромные области синхротронного излучения, связанные с радиогалактиками; а также области образования звезд, скрытые пылью на оптических частотах. Используя радиочастоты, можно добиться наивысшей угловой разрешающей способности, наиболее точных результатов измерения угловых позиций и спектральных линий, а также величин их доплеровского сдвига. В силу названных причин радиоастрономия, которая отнюдь не является простым дополнением к оптическим методам, играет ведущую роль в исследованиях, проводимых во многих областях астрономии и астрофизики.

Помимо этого радиоастрономия, как и любая фундаментальная наука, стимулирует развитие других научных отраслей. В частности, благодаря радиоастрономии появились малозумящие приемники и антенны, которые позволяют использовать одну антенну для работы с сигналами различной поляризации. Методы борьбы с радиоэхом, разработанные в радиоастрономии, в настоящее время успешно используются в Wi-Fi-системах подвижной связи. Основы теории радионавигации, используемые в наши дни в ряде систем, разработаны и апробированы в радиоастрономии. Необходимость обработки огромного количества информации в радиоастрономии привела к значительным совершенствованиям в области автоматизированной обработки данных, в частности к разработке методов параллельной обработки информации и созданию новых языков программирования. В сферу медицины радиоастрономия привнесла рентгенодиагностику и компьютерную томографию.

Все это говорит о важности международного признания и защиты спектра, используемого в радиоастрономии. Настоящий Справочник является для читателя крайне полезным источником информации по управлению использованием радиочастотного спектра, целью которого является минимизация уровня помех, воздействующих на эту крайне важную службу.

Франсуа Ранси,
Директор
Бюро радиосвязи

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение к третьему изданию Председателя Рабочей группы 7D МСЭ-R (Радиоастрономия)	iii
ПРЕДИСЛОВИЕ	v
ПРЕАМБУЛА. Радиоастрономия и общество	1
0.1 Введение в астрономию	1
0.2 Роль радиоастрономии	1
0.3 Экономическое и социальное значение	4
0.3.1 Введение	4
0.3.2 Экономическая и социальная значимость радиоастрономических исследований	5
0.4 Радиомониторинг Солнца	9
0.4.1 Введение	9
0.4.2 Краткий обзор радиомониторинга Солнца	10
0.4.3 Влияние и значение для общества	11
Эффекты, связанные с воздействием Солнца на спутники	11
Воздействия на ионосферу	11
Геомагнитные воздействия на наземные системы	12
0.5 Тенденции развития радиоастрономии	13
0.6 Выводы	13
ГЛАВА 1. Введение	15
1.1 Сектор радиосвязи и всемирные конференции радиосвязи	15
1.2 Регламент радиосвязи и распределение частот	16
1.3 Радиоастрономия в качестве службы радиосвязи	17
1.4 Проблемы распределения частот для радиоастрономии	19
ГЛАВА 2. Характеристики радиоастрономической службы	21
2.1 Радиоастрономическая служба	21
2.2 Происхождение и характер космического радиоизлучения	21
2.3 Непрерывное излучение	22
2.3.1 Изменчивость непрерывного излучения во времени	24
2.3.2 Измерение непрерывного излучения	28
2.4 Излучение спектральных линий	32
2.4.1 Типы спектральных линий	32
2.4.2 Измерение спектральных линий	33
2.5 Современная практика	35
2.6 Выводы	36

ГЛАВА 3. Предпочтительные полосы частот для радиоастрономических наблюдений	39
3.1 Общие соображения	39
3.1.1 Радиоастрономические наблюдения с помощью наземного оборудования	39
3.1.2 Космические радиоастрономические наблюдения.....	40
3.2 Предпочтительные полосы непрерывного излучения.....	41
3.2.1 Наблюдения на низких частотах	42
3.2.2 Высокочастотные полосы для наблюдения непрерывного спектра	43
3.3 Полосы для наблюдения спектральных линий	43
ГЛАВА 4. Чувствительность радиоастрономических наблюдений к помехам.....	49
4.1 Введение	49
4.2 Основные соображения, касающиеся уровня помех	49
4.2.1 Критерий определения уровня вредных помех	49
4.2.2 Характеристики направленности антенны.....	50
4.2.3 Время усреднения (время интеграции).....	51
4.2.4 Процент времени потерь на помехи	52
4.3 Чувствительность радиоастрономических систем и пороговые значения вредных помех.....	52
4.3.1 Теоретические соображения.....	52
4.3.2 Оценки чувствительности и уровней вредных помех.....	53
4.4 Отклик интерферометров и антенных комплексов на радиопомехи	55
4.5 Пульсары.....	60
4.6 Достигнутые показатели чувствительности	61
4.7 Обсуждение вопросов, связанных с помехами	62
4.7.1 Уровни помех.....	62
4.7.2 Помехи от астрономических источников.....	62
4.7.3 Особые соображения, связанные с передатчиками на геостационарных спутниках.....	62
4.7.4 Фильтрация	64
4.7.5 Уровни помех, способные нанести ущерб радиоастрономическому приемнику или привести к его насыщению	64
4.8 Анализ по методу Монте-Карло	64
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 к главе 4	66
ГЛАВА 5. Совместное использование полос частот радиоастрономической службы другими службами	68
5.1 Общие замечания	68
5.1.1 Критерии защиты для службы РАС.....	69
5.2 Расстояния разнесения, требуемые для совместного использования полос частот с одиночным передатчиком (см. Рекомендацию МСЭ-R RA.1031).....	70
5.3 Совместное использование полос частот в пределах расстояния прямой видимости	71
5.4 Совместное использование полос частот со службами, использующими наземные передатчики.....	73

5.5	Совместное использование полос частот со службами подвижной связи	73
5.6	Совместное использование полос частот радиоастрономической службы ниже 40 ГГц.....	74
5.6.1	Полоса частот 1330–1427 МГц.....	76
5.6.2	Полоса частот 4800–5 000 МГц.....	76
5.6.3	Полосы частот 22,01–22,21 ГГц и 22,21–22,5 ГГц	76
5.7	Совместное использование радиоастрономических полос частот выше 40 ГГц.....	77
5.7.1	Совместное использование полос частот от 60 до 275 ГГц.....	77
5.7.2	Совместное использование полос частот выше 275 ГГц.....	77
5.8	Совместное использование полос частот с исследованиями дальнего космоса.....	81
5.9	Разделение во времени	81
5.9.1	Координация совместного использования полос частот и разделения во времени	81
ГЛАВА 6. Помехи, создаваемые радиоастрономической службе передатчиками в других полосах частот		83
6.1	Введение	83
6.1.1	Определения из Регламента радиосвязи.....	83
6.1.2	Дополнительные определения.....	83
6.1.3	Механизмы создания помех передатчиками, работающими в других полосах частот.....	85
6.2	Предельные уровни нежелательных излучений от активных служб.....	85
6.2.1	Предельные уровни в границах области побочного излучения.....	85
6.2.2	Предельные уровни в границах области внеполосных излучений.....	87
6.2.3	Предельные уровни нежелательных излучений активных служб для защиты радиоастрономических частот.....	87
6.3	Эксплуатационные характеристики радиоастрономических приемников.....	88
6.3.1	Фильтрация помех на краю полосы частот.....	88
6.3.2	Нелинейные эффекты и взаимная модуляция.....	91
6.3.3	Линейность.....	91
6.3.4	Фильтрация и оцифровка.....	92
6.4	Помехи от передатчиков служб, работающих в других полосах частот.....	92
6.4.1	Службы, которые могут создавать помехи для радиоастрономии из соседней полосы и через механизм генерации гармоник	93
6.4.2	Переход к цифровому телевидению и его влияние на незащищенное использование радиоастрономической службой полос частот, используемых для наземного телевизионного вещания	93
6.4.3	Помехи от передач со спутников	98
6.5	Нежелательные излучения от широкополосной модуляции	104
6.5.1	Применение широкополосной модуляции.....	104
6.5.2	Формирование импульсов для снижения нежелательных излучений.....	105
6.5.3	Пример помех от широкополосной модуляции.....	105
6.5.4	Пример. Радиопомехи, создаваемые системой подвижной спутниковой связи IRIDIUM (HIBLEO-2).....	106

	<i>Стр.</i>
6.6 Выводы	109
Ссылки	110
ГЛАВА 7. Специальные технологии, их применение и места проведения наблюдений	111
7.1 Введение	111
7.2 VLBI, включая космическую VLBI.....	112
7.2.1 Космическая VLBI.....	112
7.2.2 Применение VLBI для геодезических целей	115
7.3 Радиоастрономия из точки либрации L ₂ Солнце-Земля.....	116
7.4 Радиоастрономия в экранированной зоне Луны	117
7.4.1 Экранированная зона Луны	118
7.4.2 Предпочтительные спектральные диапазоны для наблюдений Луны	118
7.4.3 Регулирование использования экранированной зоны Луны	119
7.5 Места на поверхности Земли с низким атмосферным поглощением	120
7.5.1 Антарктика	120
7.5.2 Серро-Чахнантор, Чили	120
7.5.3 Мауна-Кеа, Гавайи	121
7.5.4 Гора Грэм, Аризона	121
7.6 Наблюдения пульсаров и их использование в качестве эталонов времени	121
7.6.1 Пульсары как эталонные часы.....	121
7.6.2 Пульсары в качестве объектов для начальных координат	122
7.7 Мониторинг Солнца	122
ГЛАВА 8. Ослабление помех	125
8.1 Введение. Задачи.....	125
8.2 Характеристики источников РЧ-помех и их влияние	125
8.3 Методы ослабления РЧ-помех – уровни ослабления	126
8.4 Профилактические методы – изменение среды РЧ-помех.....	127
8.5 Предварительное обнаружение и последующее обнаружение.....	128
8.6 Предварительная корреляция	128
8.6.1 Цифровая обработка на базе антенн	128
8.6.2 Адаптивное (временное) шумоподавление	129
8.6.3 Пространственная фильтрация и управление положением нуля.....	129
8.7 В процессе корреляции.....	130
8.8 Посткорреляция – до или в процессе обработки изображений	130
8.9 Реализация на телескопах – стратегия	131
8.10 Выводы	132
ГЛАВА 9. Зоны радиомолчания	133
9.1 Введение	133
9.1.1 Определение и общие требования зоны радиомолчания	133
9.1.2 Роль нормативного регулирования	133

9.2	Соображения, касающиеся построения зоны радиомолчания	134
9.2.1	Географический аспект	134
9.2.2	Частотные аспекты	134
9.2.3	Воздействие РЧ-помех на наблюдения РАС.....	134
9.3	Электромагнитная среда	134
9.3.1	Источники полезных сигналов.....	135
9.3.2	Источники случайных сигналов.....	135
9.3.3	Распространение сигналов помех	136
9.4	Методы реализации зон радиомолчания	136
9.4.1	Методы на стороне приемника.....	137
9.4.2	Методы на стороне передачи. Управление зоной радиомолчания.....	137
9.5	Последствия образования зоны радиомолчания.....	140
9.5.1	Обслуживание зон радиомолчания.....	140
9.5.2	Соображения по долгосрочным перспективам.....	141
ГЛАВА 10. Поиск внеземного разума (SETI) с помощью наблюдений на радиочастотах.....		143
10.1	Введение	143
10.2	Возможности обнаружения сигналов SETI.....	144
10.3	Интенсивность сигнала	145
10.4	Чувствительность приемной системы.....	145
10.4.1	Минимальная обнаруживаемая мощность	146
10.5	Направление ориентации антенны	148
10.6	Идентификация сигнала и подавление помех.....	150
10.7	Выбор возможных полос частот.....	150
ГЛАВА 11. Наземная радиолокационная астрономия.....		153
11.1	Введение	153
11.2	Вопросы чувствительности.....	156
11.3	Требования к рабочим режимам и ширине полосы.....	156
11.4	Установки радиолокационной астрономии.....	157
ДОБАВЛЕНИЕ 1. Таблица полос частот, распределенных радиоастрономической службе		159
ДОБАВЛЕНИЕ 2. Регистрация астрономических станций.....		162
ДОБАВЛЕНИЕ 3. Единицы измерения в радиоастрономии.....		165
ДОБАВЛЕНИЕ 4. Практическое использование шкалы децибелов		169
ДОБАВЛЕНИЕ 5. Перечень сокращений		171

ПРЕАМБУЛА

Радиоастрономия и общество

0.1 Введение в астрономию

Астрономия изучает различные характеристики объектов, находящихся за пределами атмосферы Земли, в частности их образование, эволюцию и динамику. К этим объектам относятся Солнце, планеты, кометы, звезды, галактики, диффузная материя в космосе и сама Вселенная. Любопытство побуждает человечество искать ответы на важнейшие вопросы своего времени, например: "С чего началась Вселенная (и было ли у нее начало)?" ; "Каковы ее размеры?" ; "Какой возраст у Вселенной?" и "Какой конец может ее ждать (или есть ли вообще у нее конец)?" Астрономия как наука, рассказывающая нам о месте, которое мы и наша планета занимаем во Вселенной, играет жизненно важную культурную роль для всего человечества. Слова, обозначающие такие современные открытия, как черные дыры и квазары, вошли в широкое употребление.

Если говорить исключительно о практической стороне, астрономия предоставила нам важные средства, необходимые для прогресса человечества, а именно календарь и систему измерения времени. Более того, такие понятия базовой математики, как тригонометрия, логарифмы и методы исчисления, являются результатами астрономических исследований, как и многие основные понятия статистики.

Астрономы проводят наблюдения во всем доступном спектре электромагнитных излучений, который простирается далеко за пределы визуальной или "оптической" области. Каждый диапазон частот имеет свои особенности, как правило, требует своего подходящего набора телескопов и измерительных приборов для его исследования. Радиоастрономы изучают объекты, которые излучают или поглощают энергию в пределах радиочастотного спектра. Наземные исследования проводятся при совершенно прозрачной атмосфере на частотах в диапазоне от 13 МГц до 2000 ГГц.

Помимо существенного вклада в астрономию как таковую, радиоастрономическая служба (РАС), в качестве побочного результата своей деятельности, оказала большое влияние на развитие других областей науки и техники. Например, она обнаружила поглощение радиоволн в атмосфере, что представляет особый интерес для электросвязи. Новаторская деятельность РАС должна продолжаться, поскольку это стимулирует совершенствование малошумящих приемников. При этом радиоастрономия по-прежнему вносит вклад в расширение технологической базы, способствующей развитию других отраслей, например спутниковой связи. Потребность РАС в вычислительных ресурсах послужила толчком к развитию первых электронных вычислительных машин, а стремление к повышению чувствительности стимулировало существенный вклад в конструкцию как облучателей, так и больших управляемых антенн. Фактически постоянная потребность в более совершенных измерительных приборах стимулирует прогресс в различных областях науки и техники, таких как электроника, инженерная механика и информатика.

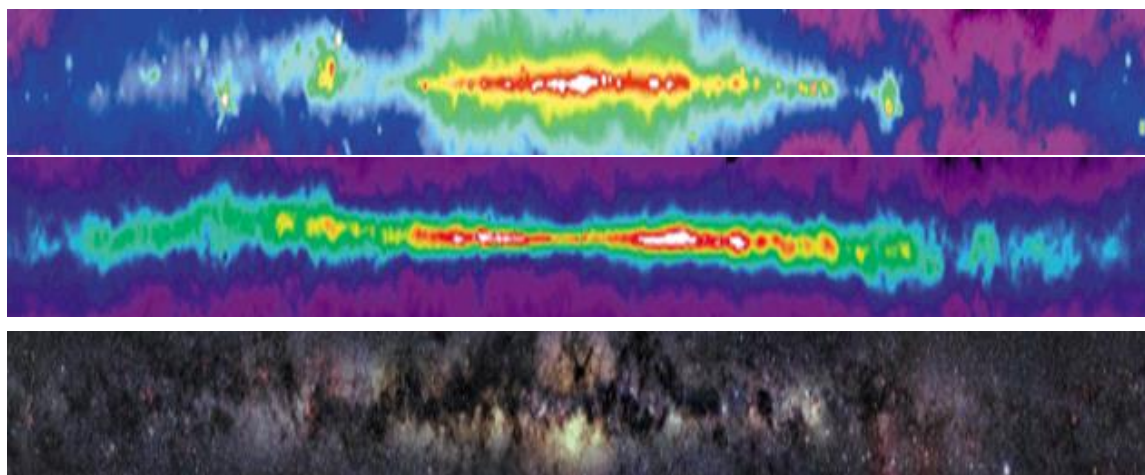
0.2 Роль радиоастрономии

Некоторые компоненты Вселенной могут быть изучены только с помощью их радиочастотных сигнатур. Это, в частности, касается наиболее распространенного элемента – нейтрального водорода (HI), который можно обнаружить только по его спектральной линии на частоте 1420 МГц. Стоит отметить, что как только было отображено распределение HI в нашей Галактике – Млечном Пути (см. Рисунок 0.1), удалось окончательно определить местоположение центра Галактики, однозначно установить расположение ее спиральных ветвей и наше собственное удаленное расположение во внешней спиральной ветви. Все это – фундаментальные аспекты, характеризующие ближайшее окружение человечества в Галактике. Радионаблюдения необходимы в качестве дополнения к результатам предыдущих оптических исследований, так как межзвездная пыль на оптических длинах волн скрывает центр Галактики, а легко измеряемые доплеровские сдвиги излучения HI позволяют вычислить его распределение вдоль линии прямой видимости. При отображении непрерывного спектра (континуума) излучения нашей Галактики, если известно точное местонахождение ее центра,

выяснилось, что этот спектр совпадает со сверхмощным источником радиоизлучения, который, согласно результатам недавних исследований в ближней части инфракрасного диапазона (NIR), представляет собой сверхмассивную черную дыру. Это типичный пример, показывающий, что радиоастрономия одновременно является неотъемлемой частью астрономических исследований в общем и дополнительным источником данных для исследований на других длинах волн электромагнитного спектра в частности.

РИСУНОК 0.1

Центральная плоскость нашей Галактики, в середине показан центр Галактики. В верхнем кадре изображена структура непрерывного радиоспектра на частоте 408 МГц. В среднем кадре показано суммарное излучение нейтрального водорода на частоте 1420 МГц. В нижнем кадре показана центральная область в диапазоне оптического света и отображены структуры темной пыли

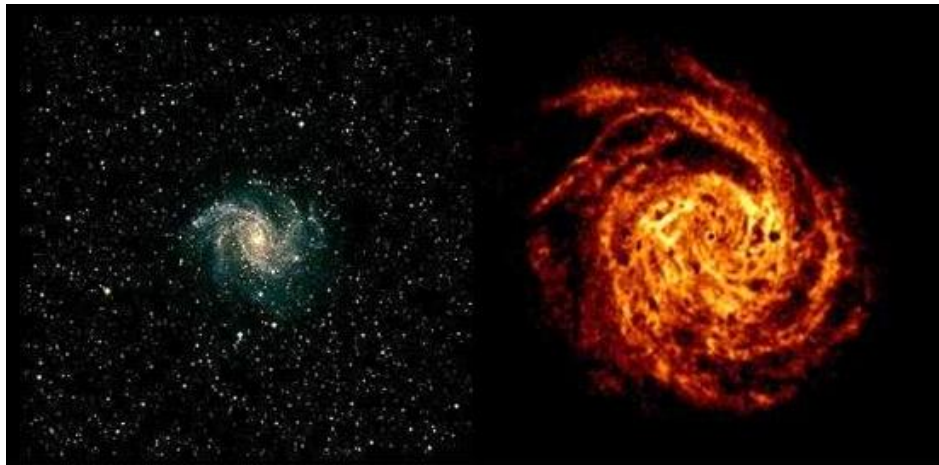


Radio-Astro_01

Множество других галактик за пределами нашей Галактики могут быть идентифицированы в космосе на основе оптических фотографий. Поскольку нейтральный атомарный водород (HI) является одним из наиболее широко распространенных компонентов, он может быть без труда обнаружен в близлежащих галактиках, в результате чего могут быть определены индивидуальные значения скорости рецессии и внутренние движения. Это позволяет получить данные трехмерного распределения галактик в пространстве и точные оценки их массы. Принимая во внимание, что для исследования многочисленных параметров галактик применяются приборы оптического и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов, для изучения распределения газов в их пределах необходимо использовать радиотехнические методы измерений. На Рисунке 0.2 этот аспект проиллюстрирован путем сопоставления размера одной из ярких близлежащих галактик, которая видна на оптическом изображении, с гораздо более крупной структурой, обнаруженной по содержанию в ней HI. Однако результаты измерения окиси углерода (CO) на частоте 115,271 ГГц демонстрируют прямо противоположные результаты, при этом концентрация CO возрастает по направлению к центру. Эта разница в распределении HI и CO является следствием выгорания ядер водорода внутри звезд и формирования более тяжелых элементов, таких как углерод и кислород, которые затем рассеиваются в межзвездном пространстве. Поскольку в центральной области галактики плотность звезд наиболее высока, это справедливо также для их побочных продуктов.

РИСУНОК 0.2

На снимке, сделанном поперек луча зрения, галактика NGC 6946 показана в видимом свете (слева) и в линиях спектра излучения нейтрального водорода¹ (HI) на частоте 1420 МГц (справа) на одной и той же шкале. Спектр излучения нейтрального водорода отображает крупные структуры спиральных ветвей, которые выходят далеко за пределы оптического изображения, и в них проявляется динамика галактики. Во многих точках (в частности, в "дырах" распределения) выходные потоки газов, обладающие большой скоростью, коррелируются с происходящим образованием звезд. Радиоданные получены от радиотелескопа с апертурным синтезом в Вестерборке, Нидерланды



Radio-Astro_02

Многие из источников радиоизлучения были обнаружены в результате прежних исследований неба в непрерывном спектре на радиочастотах; затем началось своего рода соревнование по поиску их оптических изображений. Одним из наиболее удивительных событий стало открытие парных источников радиоизлучения, как правило находящихся на противоположных сторонах некоторых галактик на одинаковом расстоянии. Эти источники обозначают огромные зоны радиоизлучения, которые, хотя и связаны с ними, находятся от них на значительном удалении. Это можно увидеть на их оптических изображениях. По мере совершенствования методов измерения и проведения исследований на более высоких частотах стало очевидно, что эти зоны излучения представляют собой остатки мощных релятивистских струй, вырывающихся из ядер галактик. Этот феномен является также отличительной чертой квазаров, которые, как признано в настоящее время, представляют собой сверхмассивные черные дыры, наращивающие массу в центрах своих родных галактик. К теме релятивистских струй, при исследовании которых, как правило, должны применяться радиотехнические методы, современная астрономия периодически возвращается снова и снова, поскольку лежащие в их основе физические явления до конца не изучены. Релятивистские струи возникают при активном наращивании массы на объекте с большой плотностью, будь это сверхмассивная черная дыра, звездообразная черная дыра, нейтронная звезда или даже выродившееся ядро обычной звезды.

Радиоастрономы внесли основной вклад в современное понимание Вселенной как единого целого. Начало этих усилий относится к 1964 году, когда было обнаружено практически изотропное космическое микроволновое фоновое излучение (СМВ); за эту работу в 1978 году была присуждена Нобелевская премия, вторая по счету за достижения в области радиоастрономии. Наблюдения неба в непрерывном спектре на частотах от 30 до 300 ГГц показали, что яркостная температура излучения СМВ составляет 2,73 К. Излучение СМВ связывают с тепловым излучением ионизированного газа, который заполнил Вселенную сразу после ее возникновения в результате Большого взрыва; т. е. с того момента, когда Вселенная впервые стала непроницаема для радиоизлучения. Этот сигнал стал первым наблюдаемым "реликтовым" излучением. Благодаря его открытию теория Большого взрыва была

¹ Boomsma, R., Oosterloo, T. A., Fraternali, F., Van Der Hulst, J. M., Sancisi, R. Astronomy and Astrophysics, 490, 555 (2008).

принята в качестве макроскопического описания истории нашей Вселенной, что положило конец разногласиям, связанным с поддержкой теории стационарной Вселенной. Исследования излучения СМВ по всему небосводу, проведенные в 1992 году при помощи приборов, установленных на спутниках, позволили обнаружить как доплеровскую сигнатуру движения Земли/Солнца/Галактики относительно СМВ, так и наличие небольших, от пункта к пункту, отклонений его радиояростной температуры (несколько единиц $\times 10^{-5}$). В 2006 году за эти важнейшие для науки измерения была присуждена Нобелевская премия. В настоящее время еще более точные измерения интенсивности излучения слабо светящейся структуры стали началом новой эры точной космологии. Результаты измерений позволили существенно уточнить космологические параметры, описывающие Вселенную, и предоставить независимое подтверждение того факта, что скорость ее расширения возрастает. Эти выводы стали весьма неожиданными. В будущем при запусках спутников планируется использовать поляризационные свойства излучения СМВ.

Перейдем от очень крупных объектов к весьма малым. В 1934 году, вскоре после открытия нейтрона, было предсказано существование нейтронных звезд. В 1967 году их обнаружили в ходе наблюдений в виде быстро пульсирующих источников радиоизлучения (пульсаров). Это открытие было отмечено Нобелевской премией 1974 года, впервые присужденной за достижения в области радиоастрономии. Одним из основных полезных применений пульсаров стало то, что они послужили своего рода лабораторией для фундаментальных физических исследований. Определенная группа пульсаров, быстро вращающаяся с периодом в несколько миллисекунд, может выступать в роли высокоточных часов. Некоторые из таких групп вращаются на орбите вокруг соседних объектов. Комбинация точных часов на близкой орбите вокруг соседнего объекта, будь то нейтронная звезда, белый карлик или звезда более традиционного типа, позволяет проводить расчет высокоточных орбит и масс пульсаров, а также расширенное тестирование многих прогнозов согласно общей теории относительности. Путем описания эволюции орбиты первого пульсара, открытого в двойной звездной системе, с точки зрения общей теории относительности было представлено первое свидетельство существования предсказанного ранее излучения гравитационных волн. В 1993 году за эту работу была присуждена Нобелевская премия. Первая планета, открытая за пределами Солнечной системы в 1992 году, была идентифицирована по ее воздействию на периодичность излучения импульсов пульсара.

Развернутые физические параметры, характерные для нейтронной звезды, изменяются в зависимости от ее массы, поэтому уравнения, используемые для описания ее ядерного вещества, усложняются по мере увеличения массы пульсара. Большинство пульсаров обладают массой, близкой к пределу Чандрасекара, равному примерно 1,4 массы Солнца. Неудивительно, что существует большой интерес к открытию объектов, масса которых в два и более раз превышает массу Солнца, поскольку само по себе их существование накладывает ограничения на их допустимые уравнения состояния, так как считается, что на них влияют примеси экзотических видов материи, входящие в состав их ядер. Других средств изучения физических параметров, характерных для этих объектов, не существует. Аналогичным образом физические свойства, недоступные для других методов исследования, могут быть изучены путем наблюдений редко встречающейся группы пульсаров – магнетаров. Магнетары обладают сверхмощным электромагнитным полем, намного более сильным, чем поле, которое можно создать в лабораторных условиях. На другом фланге научных исследований проводится обширная всемирная кампания, в рамках которой при помощи наблюдений за периодами излучения импульсов группы "миллисекундных" пульсаров по всему небосводу ученые пытаются непосредственно обнаружить гравитационные волны в наногерцевом частотном диапазоне.

0.3 Экономическое и социальное значение

0.3.1 Введение

Трудно определить экономическую ценность использования радиочастотного спектра в научных исследованиях и прикладных задачах путем простой количественной оценки затрат и общего полезного результата в сравнении с альтернативным использованием спектра. Кроме прочего, следует принимать во внимание побочные экономические аспекты радиоастрономии. Технические инновации, реализованные радиоастрономами, получили практическое применение во многих сферах деятельности, и это приносит пользу обществу в целом. Например, одним из сопутствующих применений радиоастрономического приемника (см. п. 0.3.2.1) стало использование его в специализированном оборудовании электросвязи, а также в серийно выпускаемых потребительских

приложениях. Не менее трудно подсчитать экономическую и социальную ценность алгоритмов обработки медицинских изображений, которые изначально были созданы для обработки радиоастрономических изображений (см. п. 0.3.2.4).

0.3.2 Экономическая и социальная значимость радиоастрономических исследований

Прогресс в радиоастрономии зависит от достижений в области цифровых технологий и технологий приема сигналов. Как правило, в радиоастрономическом оборудовании применяются самые современные технологии. Одной из важнейших задач астрономов является использование этих технологий практически на пределах их возможностей. В следующих подразделах приведены примеры радиоастрономических исследований, которые нашли практическое применение в прикладных задачах, также имеющих общественную значимость.

0.3.2.1 Технологии электросвязи

Системы приема сигналов

К радиоастрономическим системам относятся антенны с высоким коэффициентом усиления, малозумящие приемники, твердотельные генераторы колебаний и умножители частоты. Потребности радиоастрономии стали как первопричиной, так и стимулом развития параметрических усилителей, криогенно-охлаждаемых усилителей на полевых транзисторах из арсенида галлия, усилителей на базе НЕМТ-транзисторов и SIS-смесителей. Благодаря этим разработкам были созданы приемники, работающие в очень широких полосах частот и при очень низких температурах (до 2 К). Шумовая температура на некоторых частотах достигает в настоящее время technically возможного квантового предела. Данные технологии применяются в некоторых более совершенных системах электросвязи, используемых для исследования дальнего космоса. Генераторы колебаний, установленные в этих системах, синхронизируются по времени на субпикосекундных уровнях в соответствии с атомными стандартами частоты. Данные стандарты используются в качестве основы для системы отсчета времени наземных и космических навигационных систем.

Принцип гомологии

Основным препятствием при проектировании крупногабаритных управляемых параболических антенн с прецизионной отражающей поверхностью является деформация под воздействием гравитации, которая изменяет форму антенны при переходе в следующую позицию. Эта проблема была решена в 1967 году при помощи принципа гомологии². Антенна, разработанная по этому принципу, плавно деформируется под воздействием гравитации, последовательно приобретая форму параболоидов с изменяющимся фокусным расстоянием. Деформацию вследствие гравитации и сопутствующую ей потерю сигнала можно минимизировать, если обеспечить, чтобы приемник и его облучатель отслеживали изменение фокусного расстояния. Принцип гомологии теперь используется во всех больших отражающих параболических антеннах. Это имеет значение в первую очередь при работе на миллиметровых волнах.

Антенные технологии

Радиоастрономы были первыми, кто использовал рупорные облучатели с круговой поляризацией. В дальнейшем эта техническая разработка была использована в спутниковых передатчиках для независимой передачи сигналов с обоими видами поляризации при помощи аналогичного рупорного облучателя. При этом достигалась экономия пространства и массы антенного блока.

0.3.2.2 Интерферометрические технологии

Радиоастрономами была разработана интерферометрия – метод, применяемый для получения более высокого углового разрешения, а также для формирования изображений. Кроме того, метод использовался для получения оцифрованных поэлементных обзоров космического радиоизлучения. В главе 7 описывается метод, который приобрел весомое значение в астрономии для изучения электромагнитного (ЭМ) спектра, а также в сферах волоконно-оптических сетей, инженерной

² Von Höner, S. “Design of large steerable antennas”, The Astronomical Journal, 72 (1967), 35.

метрологии, оптической метрологии, океанографии, сейсмологии, квантовой механики, ядерной физики, физики элементарных частиц, физики плазмы и дистанционного зондирования.

Помимо этого, радиоастрономы первыми разработали методы распознавания и очистки изображений в целях устранения влияния (большинства) приборных погрешностей, а также искажений, обусловленных воздействием окружающей среды. Данные методы используются как при наземных и спутниковых наблюдениях за небосводом, так и при изучении Земли спутниковой службой исследования Земли (ССИЗ).

В конце XX века радиоинтерферометрические системы широко использовались для облегчения автоматической посадки воздушного судна. Фактически эти системы первоначально были разработаны в радиоастрономической лаборатории, а уже впоследствии начали реализовываться по всему миру. В настоящее время аналогичная технология применяется для определения местонахождения пользователей сотовых телефонов, что позволяет экстренным службам быстро устанавливать связь с местом происшествия. Кроме того, данный метод используется для организации целевого маркетинга и иных услуг, связанных с местоположением. Весьма показательным примером действующей системы могут служить беспроводные сети Wi-Fi.

Применение в системах Wi-Fi

Наибольшие трудности при обеспечении беспроводного соединения между компьютерными терминалами создаются отражением сигнала. Прибытие передаваемого сигнала на приемник сопровождается множеством отраженных волн. Эта проблема хорошо известна радиоастрономам, и они разработали методы обработки сигнала, направленные на преодоление подобных препятствий, вызванных отражениями сигналов в атмосфере. Локальные сети (LAN), работающие на основе передачи радиоволн, отправляют данные на разных частотах, и эти сигналы рекомбинируются в приемнике по тому же принципу, что и в радиоастрономии.

Навигация

На протяжении веков астрономия вносила значительный вклад в развитие наземной и космической навигации. Изобретение радиосекстанта для морской навигации позволило точно определять местоположение в условиях облачности и дождливой погоды. Один из последних примеров применения радиоинтерферометрии для определения местонахождения мобильных телефонов в чрезвычайных ситуациях с использованием мультилатерации основан на мощности сигнала, передаваемого на ближайшие антенные мачты. Определение местонахождения объекта осуществляется посредством точного вычисления разницы во времени прихода (TDOA) сигнала, передаваемого объектом на три и более приемника. Данный метод также может использоваться для определения местонахождения приемника, если измерять TDOA сигнала, передаваемого тремя и более синхронизированными передатчиками.

0.3.2.3 Вычислительные технологии

Радиоастрономы разработали уникальные цифровые методы корреляции и записи данных, полученных от телескопов. При этом используются современные мощные вычислительные комплексы (с параллельной обработкой данных), способные обрабатывать колоссальные объемы информации, собранной при помощи сетей интерферометров. Примерами современных возможностей обработки данных могут служить одновременный многолучевой синтез, ослабление радиочастотных помех в реальном времени и распознавание сложных структур источников радиоизлучения. Фактически обработка радиоастрономических данных для корреляции в реальном времени данных интерферометрии, поступающих от антенн на четырех континентах, используется в качестве пробного варианта при разработке широкополосных сетевых систем передачи данных.

Язык программирования FORTH

Одним из наглядных положительных побочных результатов развития радиоастрономии стал язык программирования FORTH (или Forth), разработанный в Национальной радиоастрономической обсерватории США (NRAO) в начале 1970-х годов. Вначале язык Forth применялся для управления одним из телескопов NRAO и для обработки данных. Сегодня язык Forth применяется при решении множества прикладных задач, в том числе в карманных компьютерах сотрудников службы доставки

Federal Express. В настоящее время используются также модификации этого языка. В числе других прикладных задач можно назвать программное обеспечение для спутникового слежения, а также программы моделирования для 15-метрового шестисекционного манипулятора канадского производства, установленного на космическом корабле "Space Shuttle". Он применялся при развертывании спутниковых систем, в процедурах считывания данных, а также для помощи астронавтам при выполнении работ по обслуживанию оборудования (например, ремонт и модернизация космического телескопа "Хаббл")³.

0.3.2.4 Медицинские технологии

Радиоастрономы предложили математические методы, позволяющие выполнять распознавание двумерных изображений на основе одномерных результатов сканирования, а также распознавание трехмерных изображений на основе двумерных⁴. Эти методы распознавания изображений являются составной частью современных технологий: компьютерной томографии (КТ), позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), сканирования и магнитно-резонансной обработки изображений. Радиоастрономические наблюдения удаленных космических источников в основном заключаются в измерении температуры этих объектов. Данная методика была адаптирована для проведения неинвазивных измерений температуры тканей человеческого организма.

Компьютерная томография – это метод обработки изображений, применяемый в медицине. Из большой серии двумерных рентгеновских изображений, снятых вокруг одной оси вращения, при помощи компьютеров формируется трехмерное изображение внутренних элементов объекта.

На снимках глубоких тканей организма в СВЧ-диапазоне злокачественные опухоли выглядят как области с аномальной температурой и могут быть легко обнаружены. Истинно-положительная вероятность обнаружения рака груди при использовании метода СВЧ-термографии составляет 96%.

Рак кожи

Для астрономов, изучающих звезды и галактики, одной из главных задач является извлечение полезной информации из беспорядочного набора сигналов. Радиоастрономы, будучи первыми астрономами, работающими с цифровыми данными, разработали алгоритмы, применяемые для извлечения слабых сигналов из фонового случайного "шума". Эти алгоритмы помогли другим астрономам выявить тысячи слабых источников рентгеновского излучения и провести количественный анализ их структуры.

Такого рода методы могут применяться во множестве других случаев, когда полезная информация теряется в фоновом шуме. Совместно с врачами и при поддержке Космического агентства Германии ученые в области радиологии разработали систему, позволяющую распознавать рак кожи на ранних стадиях. Небольшие отличия в цвете помогают обнаружить и измерить беспорядочный рост клеток, являющийся признаком злокачественной меланомы – наиболее опасного вида рака кожи.

Цифровая радиография

Технология цифровой обработки изображений была также адаптирована для использования при измерении рентгеновских излучений кластеров галактик, имеющих большое значение для астрофизиков при разработке теорий, связанных с космологией и ранней стадией эволюции Вселенной.

Кроме того, данный метод использовался при проектировании цифровых радиографических систем в целях повышения эффективности, гибкости и экономичности клинических радиографических исследований. Применение этого метода позволяет сократить расходы клиник и пунктов неотложной помощи, поскольку исключаются затраты на приобретение рентгеновской пленки и другие процедуры получения изображений. При использовании данной технологии радиографические исследования проводятся обычным путем, за исключением того, что снимки тела теперь хранятся не на пленке, а в памяти компьютера. Таким образом, врач (или пациент) могут в любой момент просматривать снимки и быстро передавать их без искажений удаленным специалистам через интернет.

³ Более полную информацию по использованию языка Forth можно найти по адресу: <http://www.forth.com/index.html>.

⁴ Bracewell, R. N. and Riddle, A. C. "Inversion of fan beam scans in radio astronomy", *Astrophys. Journal*, **150**, 427.

0.3.2.5 Стандарты времени и частоты

В силу необходимости специалисты по интерферометрии со сверхдлинной базой (VLBI) разработали исключительно стабильные и точные стандарты времени, а также методы передачи сигналов времени, погрешность которых составляет несколько единиц $\times 10^{-16}$ с. Затем был налажен серийный выпуск этих систем, и в настоящее время они используются для спутниковой навигации, космической связи и в военных целях. Системы, входящие в состав всемирной радионавигационной спутниковой службы (РНСС) (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), имеют собственные системы времени и координат, привязанные к Земле и космосу и необходимые для поддержки и эксплуатации Международной службы VLBI (IVS) по проблемам геодезии и астрометрии.

Созданные человеком точные часы открыли новую эру безопасной навигации. Международное бюро времени продолжает работу над созданием еще более точных часов и определением времени по показаниям ансамбля атомных часов. Однако наиболее независимая проверка международных атомных стандартов времени на долговременную стабильность проводится на основе измеренной радиоастрономами периодичности импульсов миллисекундных пульсаров. Эти измерения проводятся на группе наиболее стабильных пульсаров как для минимизации влияния постоянных изменений электронного содержания межзвездной среды вдоль линий зрения, так и для минимизации любых нестабильностей в поведении отдельных пульсаров. Независимая проверка проводится также путем подгонки результатов измерения периодичности импульсов миллисекундных пульсаров в системах двойных звезд к орбитальным параметрам системы.

0.3.2.6 Наблюдение Земли

Интерферометрические методы, применяемые в радиоастрономии, были приняты в целях разработки технологий пассивного дистанционного зондирования, используемых для измерения температуры атмосферы Земли, а также для определения других параметров поверхности, таких как распределение водяного пара, содержание воды в облаках, количество осадков и уровень других вредных примесей, например окиси углерода.

Обнаружение лесных пожаров по тепловому микроволновому излучению основывается на том же технологическом принципе.

0.3.2.7 Геодезия

Метод VLBI был разработан в качестве инструмента для сбора подробных данных о структуре и местоположениях астрономических источников. Однако он также может применяться для решения множества других задач. Таким образом, данные о местоположении удаленных квазаров и радиоисточников, измеренные с исключительной точностью методом VLBI, предоставляют человечеству наиболее точную пространственную систему отсчета. Использование астрономических источников в качестве опорных точек позволяет наземным службам VLBI измерять собственные перемещения телескопов на поверхности Земли, обусловленные, например, дрейфом континентов или относительным скольжением тектонических плит по линиям разлома. Такого рода измерения помогают при оценке вероятности землетрясений. Международная служба VLBI (IVS) по проблемам геодезии и астрометрии была организована в целях предоставления услуг по поддержке геодезических, геофизических и астрометрических исследований и практической деятельности⁵. Наземные методы VLBI и точное доплеровское слежение используются также для высокоточной навигации в космических полетах в пределах нашей Солнечной системы. Например, местоположение зонда Гюйгенса, запущенного Европейскими космическим агентством (ЕКА), точно отслеживалось, когда он входил в атмосферу Титана – крупнейшего из спутников Сатурна.

0.3.2.8 Горнодобывающие технологии

Методы обработки изображений, описанные в п. 0.3.2.4, могут также непосредственно применяться при подземных геологоразведочных работах на месторождениях нефти и полезных ископаемых. Данные, полученные при помощи сети сейсмографов, проводящих измерения после серии небольших поверхностных взрывов, обрабатываются аналогичным образом.

⁵ См.: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/html>.

0.3.2.9 Радиолокационная астрономия

Радиолокационная астрономия отличается от радиоастрономии тем, что в ней используется как *передача*, так и *прием* радиоволн. Вследствие этого с учетом двусторонних потерь на расходимость пучка ее применение ограничено изучением объектов в окосолнечном пространстве. Тем не менее это единственный метод, пригодный для обнаружения мелкого космического мусора. Типичным применением радиолокационной астрономии является обнаружение и отслеживание околоземных объектов (NEO) (метеоритов и астероидов), которые приближаются к Земле или могут оказывать воздействие на Землю. Радиолокационная астрономия предоставляет обширный набор средств изучения подобных объектов. В этом разрезе радиолокационная астрономия представляет собой службу прогнозирования и предотвращения природных бедствий в межпланетном масштабе. Кроме того, радиолокаторы способны обнаруживать космический мусор на околоземной орбите, позволяя операторам спутников уводить космические аппараты от потенциально возможных столкновений. Это к тому же единственный метод, позволяющий исследовать плотность космического мусора размером менее приблизительно 1 см.

Методы обработки изображений, применяемые в радиолокационной астрономии (для ближнего поля), используются в гражданских и военных целях для обработки изображений, получаемых от орбитальных космических аппаратов.

0.4 Радиомониторинг Солнца

0.4.1 Введение

Радиомониторинг Солнца представляет собой специальную область радиоастрономии, которая играет важную роль в исследованиях космической погоды, помогает составлению прогнозов космической погоды и своевременно предупреждает об активности в виде солнечных вспышек, которые могут повлиять на жизнедеятельность человека. Наша чувствительность к солнечной активности стала причиной возникновения новой научной дисциплины – "космическая погода". Она изучает условия космического околоземного пространства путем измерения электромагнитного излучения и поведения солнечной плазмы. В длительных и средних по длительности временных масштабах влияние колебаний солнечной активности на климат по значимости находится на одном уровне с вулканическими явлениями и деятельностью человека. В малых временных масштабах космическая погода также играет важную роль. Это связано с тем, что солнечная активность, в особенности выбросы коронального вещества (СМЕ), могут вызывать сбои в работе технической инфраструктуры в космосе, в воздухе и на Земле. В период максимальной солнечной активности корональные выбросы случаются один раз в день или чаще.

Если объединить данные, полученные от наземных радиоспектрографов, с дополнительными данными, полученными со спутников, то можно получить предварительные оценки массы, энергии, скорости, а также направления распространения выбросов коронального вещества задолго до того, как они достигнут Земли. На основе результатов этих измерений можно предположить масштаб неблагоприятных воздействий и определить время, в течение которого они могут достичь Земли. Тем самым обеспечивается возможность смягчения негативных последствий этих воздействий на целый ряд технологий, изобретенных человеком, таких как сети электросвязи, спутниковые навигационные системы, космонавтика (запуск спутников, пилотируемые полеты), авиация и системы электроснабжения. Кроме всего прочего, солнечная активность вызывает постепенное ухудшение характеристик силовых трансформаторов, коррозию магистральных трубопроводов, а также оказывает множество других неблагоприятных воздействий. Серьезную угрозу может также представлять гигантская солнечная вспышка – случайное опасное природное явление, происходящее не столь часто. Если не смягчить последствия подобных событий, то могут возникнуть глобальные перебои в работе технических систем, от которых зависит жизнь нашего общества. Примером может служить геомагнитная буря, произошедшая в марте 1989 года, когда ущерб от воздействия мощной вспышки на Солнце составил более 1 млрд. долл. США. В наше время, если заранее не будут приняты надлежащие меры, гигантская солнечная вспышка может вызвать повреждения, ущерб от которых будет гораздо более существенным. Фактически, согласно некоторым оценкам, вероятный ущерб от такого события может составить от 2 до 3 трлн. долл. США, а время восстановления – от 2 до 3 лет, поскольку многие из заменяемых узлов, которые могут потребоваться (например, при ремонте энергосистемы), стоят

слишком дорого, чтобы хранить их про запас. Эти риски, которые невозможно контролировать, свидетельствуют о необходимости создания систем раннего оповещения, работающих на основе средств непрерывного мониторинга Солнца, в частности наземных солнечных радиотелескопов.

Существует множество способов мониторинга солнечной активности, одним из которых является простой подсчет солнечных пятен. Преимущество радиоизмерений заключается в том, что они могут выполняться автоматически с поверхности Земли, почти или совсем не нуждаются во вмешательстве человека, а также не требуют больших финансовых затрат. Кроме того, можно поддерживать калибровку данных, качество и непрерывность измерений на протяжении длительного времени.

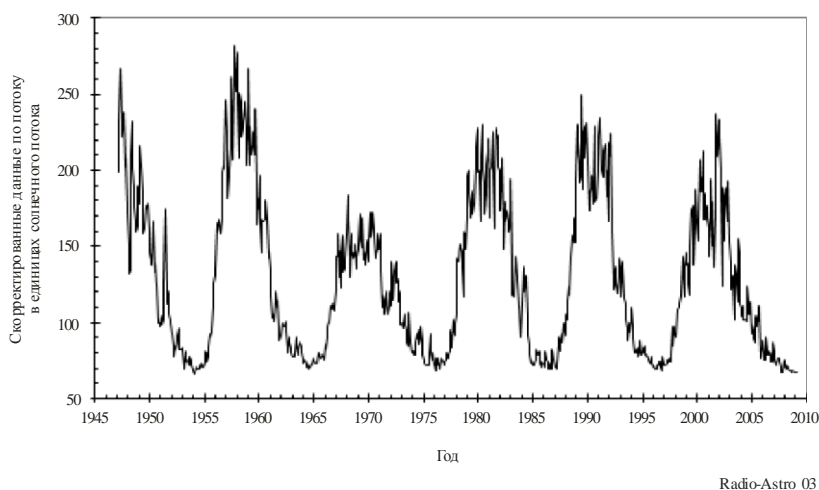
0.4.2 Краткий обзор радиомониторинга Солнца

Результаты радиоизмерений Солнца служат непосредственными индикаторами уровня и характера солнечной активности. Они могут также использоваться в качестве предварительных данных для других параметров, которые трудно или невозможно измерить с надлежащей точностью и достаточной продолжительностью. Мониторы потока солнечного излучения представляют собой радиотелескопы специальной конструкции. Они оборудованы антеннами, которые достаточно малы для того, чтобы "увидеть" солнечный диск целиком с равной чувствительностью, и приемниками, обладающими сверхвысокими линейными динамическим диапазонами, и предназначены для точного измерения солнечного потока.

Результаты исследований показали, что солнечный поток на частоте 2,8 ГГц (10,7 см) имеет высокую корреляцию с более свежими данными по ультрафиолетовым и рентгеновским потокам, полученным от космических аппаратов, а также с некоторыми параметрами солнечного ветра. Все эти потоки энергии непосредственно участвуют в нагреве верхних слоев атмосферы. Поскольку измерения, проводимые в космосе, стали доступны лишь с 1990-х годов и нет гарантии, что они будут непрерывно проводиться в будущем (с учетом ограниченного срока службы космических спутников), при прогнозировании сопротивления атмосферы для спутников и поддержании их орбит используется индекс потока частотой 2,8 ГГц. Частота 2,8 ГГц изначально была выбрана наугад, хотя существует размытый максимум в медленно изменяющемся радиоизлучении или S-компоненте радиоизлучения Солнца на сантиметровых длинах волн (длина волны примерно 10 см). Однако это лишь один пример из непрерывного спектра излучения от 0,5 до 10 ГГц, возникающего вследствие различных процессов на Солнце. Для более тщательного изучения источников этого излучения, а также для более точного определения долгосрочных "климатических" предварительных параметров измерение потока необходимо производить на нескольких частотах. Для решения этих задач планируется установка новых мониторов потока в Европе, Северной Америке и Японии. Однако абсолютные измерения могут проводиться только в полосах частот, доступных для радиоастрономической службы (РАС).

РИСУНОК 0.3

Среднегодовые значения потока солнечного радиоизлучения на частоте 2,8 ГГц по данным наблюдения Национального исследовательского совета Канады с 1947 года



0.4.3 Влияние и значение для общества

Области знаний, в которых могут использоваться данные о потоках солнечного радиоизлучения, разделяются на две широкие категории – экологическую (окружающая среда) и техническую/инфраструктурную.

0.4.3.1 Изучение/мониторинг, касающиеся применений в области экологии

Солнечное радиоизлучение используется в качестве предварительных данных для всех потоков излучений, важных с точки зрения окружающей среды, которые влияют на вертикальную температурную структуру и другие параметры атмосферы на высоте более 80 км (в ионосфере). Измерение этих параметров проводится при помощи разнообразных датчиков состояния окружающей среды. Однако при получении исходных данных для моделирования необходима количественная оценка показателей солнечного потока. Например, плотность атмосферы на высотах свыше 100 км моделируется с использованием потока солнечного радиоизлучения на частоте 2,8 ГГц в качестве (эмпирических) входных данных.

0.4.3.2 Технические/инфраструктурные применения

Время от времени солнечное излучение, особенно в спектре ОВЧ, является достаточно сильным и способно ухудшить рабочие характеристики радиосистем (например, систем связи), увеличивая их уровни шума.

Эффекты, связанные с воздействием Солнца на спутники

Окружающая среда, в которой работают спутники, наполнена частицами с высокой энергией, испускаемыми Солнцем. Они способны вызывать временные ухудшения или необратимые повреждения электронных схем, а также накопление на космическом аппарате электрического заряда, из-за которого могут возникать фантомные команды, нарушающие его нормальное функционирование. Спутники на низкой околоземной орбите также подвержены повышению атмосферного сопротивления, из-за которого могут изменяться их расположение и возрастать темпы сокращения их орбит. Общие уровни солнечной активности, обозначаемые индексами, такими как поток солнечного радиоизлучения на частоте 2,8 ГГц, используются для прогнозирования степени нагрева и расширения в верхних слоях атмосферы и последствий для спутниковых орбит.

Воздействия на ионосферу

Поскольку ионосферу формирует Солнце, изменения солнечной активности приводят к одновременным изменениям в ионосфере, что может привести как к улучшению характеристик связи,

так и к полной ее потере, которая может продолжаться в течение многих часов, если рентгеновские лучи, испускаемые Солнцем, значительно увеличат уровень ионизации слоя D. Ионосфера является крайне важной средой для работы систем связи, поэтому прогноз ионосферных условий также имеет огромное значение – МСЭ использует радиоданные как для диагностики ионосферы в текущих условиях, так и для облегчения прогнозирования их вероятных краткосрочных изменений.

На дальних, пролегающих через полюсы маршрутах коммерческой авиации используется ВЧ-связь. Это связано с тем, что на высоких широтах ($> 82^\circ$) инфраструктура ОВЧ-связи отсутствует, а пояс геостационарных спутников близок к горизонту. Поскольку возмущения ионосферы на высоких широтах происходят особенно часто и доставляют наибольшие проблемы, для прогнозирования ионосферных условий вблизи полюсов должны проводиться радиоизмерения солнечной активности. Это позволит предоставить авиакомпаниям информацию, достаточную для внесения в случаях необходимости надлежащих корректировок в планы полетов.

Геомагнитные воздействия на наземные системы

Как быстрые, так и медленные флуктуации магнитного поля Земли возникают вследствие изменения скорости и плотности солнечного ветра, а особенно из-за воздействия сгустков плазмы, выбрасываемых во время вспышек на Солнце и выбросов коронального вещества. Эти флуктуации индуцируют электрический ток в металлических структурах большой протяженности, таких как линии электропитания, трубопроводы, телефонные кабели и железнодорожные пути. Токи, возбуждаемые в линиях электропередачи, сдвигают рабочие точки трансформаторов. При большой нагрузке это может привести к насыщению сердечника и к перегреву обмоток. Однако мощные магнитные бури, подобные той, что произошла 13 марта 1989 года, вызывают намного более сильные токи, что может привести к мгновенному отказу трансформаторов, как случилось в канадском городе Квебек. Это происшествие стало причиной выхода из строя распределительной сети энергоснабжения более чем на 9 часов. Экономический ущерб от отказа инфраструктуры, связанный с потерями в промышленном производстве, составил порядка 1 млрд. долл. США.

РИСУНОК 0.4

**Трансформатор распределительной сети энергоснабжения,
сгоревший в результате солнечной вспышки
13 марта 1989 года**



Radio-Astro_04

Токи, индуцируемые в рельсах железнодорожных путей, могут создавать помехи системам сигнализации и датчиковым системам определения местоположения поездов. Кроме того, эти токи создают небольшую разность потенциалов между неоднородностями металла трубопроводов и между сварными швами, тем самым ускоряя катодную коррозию.

Трубопроводы, протяженность которых может составлять тысячи километров, зачастую проходят по территориям со сложными условиями рельефа и неблагоприятным климатом. В таких местах проверка и обслуживание трубопроводов обходятся весьма дорого. При этом любая неисправность может обойтись еще дороже и нанести серьезный ущерб окружающей среде. Следовательно, необходимо разработать концепции проверки и обслуживания, основанные на геомагнитной активности.

0.5 Тенденции развития радиоастрономии

В настоящее время основным направлением развития радиоастрономии является увеличение чувствительности на всех частотах. В связи с тем что современные приемники приближаются к квантовому порогу на многих частотах, технологии развиваются в сторону увеличения собирающей площади антенн и использования более широких рабочих полос пропускания. Действующие телескопы подвергаются реконструкции, предусматривающей возможность работы с широкополосными приемниками (от 1 до 8 ГГц в зависимости от частоты) для наблюдений как в непрерывном спектре, так и в спектральных линиях. На международном уровне реализуется ряд проектов по созданию радиотелескопов нового поколения, обладающих значительно большей собирающей площадью антенн.

Вот несколько примеров:

- 1) проект антенной решетки площадью в 1 кв. км (SKA), предусматривающий строительство гигантской сети радиоинтерферометров с суммарной собирающей площадью в 1 кв. км и протяженностью базовых линий до 3000 км, работающей в диапазоне частот от 100 МГц до 25 ГГц;
- 2) низкочастотная антенная решетка (LOFAR), развернутая в Нидерландах и соседних странах, представляет собой сеть радиоинтерферометров с суммарной собирающей поверхностью в 100 000 кв. м и протяженностью базовых линий до 1000 км, работающую в диапазоне частот от 30 до 250 МГц;
- 3) большая миллиметровая/субмиллиметровая антенная решетка в Атакаме (ALMA) содержит 64 антенны, расположенных на плато в Андах на высоте 5 км, и работает в диапазоне частот от 30 до 850 ГГц.

0.6 Выводы

Радиоастрономия открыла совершенно новые и непредсказуемые радиофизические явления, такие как космическое микроволновое фоновое (реликтовое) излучение, межзвездный ионизированный газ и плазма, а также пульсары, квазары и черные дыры. С помощью радиоастрономии удалось неоднократно проверить некоторые фундаментальные теории физики, такие как общая теория относительности. Радиоастрономические исследования стали своеобразной лабораторией для фундаментальных явлений физики, которые не поддаются изучению другими методами.

Спектр, который использует радиоастрономическая служба, имеет большое социально-экономическое значение. Однако его полезные свойства трудно оценить в количественном выражении, поскольку они используются обществом в целом, часто в рамках прикладных задач, решаемых другими технологиями. Зачастую они реализуются на протяжении длительных периодов времени, с трудом поддаваясь прогнозированию. Радиоастрономическая служба разработала технологии, которые широко применяются в столь различных областях, как медицинская диагностика, электросвязь, стандарты времени и частоты, наблюдение Земли, методы вычислений, навигация, геофизика и горнодобывающая промышленность.

Многие виды деятельности в рамках службы РАС организуются на глобальном уровне, следовательно, вопросы, связанные с использованием спектра, должны рассматриваться в мировом масштабе. Односторонние решения в данном случае могут оказывать глобальное влияние на использование соответствующих частот и проведение возможных измерений.

Нестабильность магнитного поля Солнца является причиной возникновения энергетических солнечных вспышек и выбросов коронального вещества. Эти явления могут напрямую ухудшить или повредить многие электронные системы и наземную инфраструктуру, причиняя тем самым значительный экономический ущерб. Наземный мониторинг солнечного радиоизлучения обеспечивает надежный, постоянный и экономически выгодный способ контроля солнечной активности на протяжении более 60 лет. Эта технология, хорошо изученная и проверенная временем, гарантирует своевременное предупреждение о нестационарных процессах.

ГЛАВА 1

Введение

1.1 Сектор радиосвязи и всемирные конференции радиосвязи

Настоящий Справочник посвящен в основном аспектам радиоастрономии, которые связаны с координацией частот, т. е. с регулируемым использованием радиочастотного спектра для исключения помех путем заключения взаимных соглашений между радиослужбами. На международном уровне использование спектра регулируется Международным союзом электросвязи (МСЭ) – специализированным учреждением Организации Объединенных Наций.

Сектор радиосвязи (МСЭ-R), который является одним из секторов МСЭ, был создан 1 марта 1993 года; он пришел на смену Международному консультативному комитету по радио (МККР) и его Секретариату, которые до того времени выполняли аналогичные функции. В структуру МСЭ-R входят всемирные и региональные конференции радиосвязи, ассамблеи радиосвязи, Радиорегламентарный комитет, исследовательские комиссии по радиосвязи, Консультативная группа по радиосвязи и Бюро радиосвязи, возглавляемое избираемым директором.

Регламент радиосвязи МСЭ, который служит основой для планового использования радиочастотного спектра, является результатом работы всемирных конференций радиосвязи (ВКР), ранее известных как всемирные административные радиоконференции (ВАРК), которые созываются с интервалом в несколько лет. Целью этих конференций является введение новых требований к использованию спектра в такой форме, которая по возможности оказывается взаимоприемлемой для всех стран-участниц. Результаты таких ВКР имеют форму договора, который подписывают администрации стран-участниц. На ВКР также разрабатываются повестка дня следующей ВКР и резолюции, которые, как правило, содержат предложения по исследованиям (касающимся пунктов следующей повестки дня), которые должны проводиться исследовательскими комиссиями. Как и для большинства сфер применения международного права, при обеспечении выполнения Регламента радиосвязи возникают трудности, и это во многом зависит от доброй воли участников. Проведению ВКР предшествуют подготовительные собрания к конференциям (ПСК). На них тщательно прорабатываются отчеты по техническим, эксплуатационным и регламентарным вопросам, которые должны быть рассмотрены на конференции.

Исследовательские комиссии по радиосвязи (ИК) создаются ассамблеей радиосвязи. Они изучают вопросы и готовят проекты рекомендаций по техническим, эксплуатационным и регламентарным/процедурным аспектам радиосвязи. Эти исследовательские комиссии по радиосвязи рассматривают такие проблемы, как предпочтительные полосы частот для различных служб, пороговые уровни неприемлемых помех, совместное использование полос частот разными службами, желаемые предельные уровни излучений и т. д. Кроме того, они предоставляют исходные материалы для проекта отчета ПСК по вопросам повестки дня, относящимся к их компетенции. В рамках ИК организуются рабочие группы (РГ) и целевые группы (ЦГ), которые занимаются конкретными рабочими вопросами. В настоящее время (2013 г.) структура исследовательских комиссий Сектора МСЭ-R такова:

- 1-я Исследовательская комиссия – Управление использованием спектра;
- 3-я Исследовательская комиссия – Распространение радиоволн;
- 4-я Исследовательская комиссия – Спутниковые службы;
- 5-я Исследовательская комиссия – Наземные службы;
- 6-я Исследовательская комиссия – Вещательные службы;
- 7-я Исследовательская комиссия – Научные службы.

Помимо этого, Координационный комитет по словарю (CCV) и Специальный комитет по регламентарным процедурным вопросам (SCRPM) отвечают за вопросы, которые являются общими для всех комиссий.

Дополнительная информация о секторе МСЭ-R, подробные данные об исследовательских комиссиях и рабочих группах, о проводимой ими работе, а также документация размещены на веб-сайте МСЭ-R <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&mlink=rhome&lang=en>.

Рабочая группа 7D, занимающаяся вопросами радиоастрономии, является одной из четырех рабочих групп в составе ИК-7 МСЭ-R (Научные службы). Деятельность остальных трех групп связана с космической эксплуатацией, космическими исследованиями, пассивным и активным дистанционным зондированием, метеорологией, а также с сигналами времени и стандартными частотами. В сферу деятельности РГ 7D наряду с радиоастрономией, как правило, включают вопросы поиска внеземных цивилизаций (SETI) и радиолокационной астрономии, работа которой осуществляется с поверхности Земли, а также вопросы радиоастрономической службы, работающей в космосе в составе службы космических исследований.

Международные собрания исследовательских комиссий и рабочих групп проводятся с регулярными интервалами – как правило, два раза в год с участием делегаций из многих стран. Целевые группы обычно создаются на ограниченный период времени для выполнения конкретных задач, и они проводят свои собрания в сроки, отвечающие их потребностям. Методы работы исследовательских комиссий и их рабочих групп подробно описываются в Резолюции 1 МСЭ-R. В большинстве случаев ИК и РГ занимаются изучением соответствующих вопросов, которые были им распределены. Ответы на эти вопросы, как правило, оформляются в виде Рекомендаций или Отчетов МСЭ-R.

Рекомендации МСЭ-R составляют основную часть технической, эксплуатационной и регламентарно-процедурной информации, которая согласована участвующими администрациями. Эта информация используется также для предоставления исходных данных, разработанных в соответствии с конкретными пунктами повестки дня ВКР. Многие из результатов работы исследовательских комиссий включаются таким образом в Регламент радиосвязи. Помимо этого, сами по себе рекомендации и отчеты МСЭ-R обычно рассматриваются пользователями спектра как авторитетные руководящие указания. Это, в частности, относится к рекомендациям МСЭ-R, которые, не будучи обязательными документами, в значительной степени соблюдаются, периодически пересматриваются и публикуются. Значительная часть важнейших материалов по радиоастрономии, приведенных в рекомендациях и отчетах 7-й Исследовательской комиссии, составляет основу настоящего Справочника.

1.2 Регламент радиосвязи и распределение частот

Распределение частот на международном уровне осуществляется на конференциях ВКР приблизительно для 40 радиослужб, определенных в Регламенте радиосвязи. На ВКР присутствуют представители более 190 администраций – членов МСЭ со всего мира, многих компаний, занимающихся вопросами электросвязи и информационных технологий, а также общепризнанных научных и международных организаций. Только администрации – члены МСЭ могут вносить предложения и имеют право голоса. Однако другие организации также могут, но иными способами, пытаться повлиять на принятие решений по различным пунктам повестки дня. Более полное описание принципов работы ВКР и участия в них радиоастрономов приводится, например, в работе Гергели [2002].

В целях распределения радиочастотного спектра весь мир разделили на три района: Район 1 включает Европу, Африку и северную Азию, Район 2 включает Северную и Южную Америку, а Район 3 включает южную Азию и Австралазию (Австралию с Океанией). Для каждой конкретной полосы частот распределение может различаться в разных районах. Нередко полосы частот совместно используются двумя или более службами. В целом распределения могут осуществляться на первичной или на вторичной основе. Служба с первичным распределением может создавать помехи службе со вторичным распределением, однако вторичной службе запрещается создавать помехи службе с первичным распределением в одной и той же полосе частот. Распределения частот приведены в Статье 5 Регламента радиосвязи. Большая часть соответствующей информации указана в Таблице

распределения частот; кроме этого, дополнительные распределения содержатся в пронумерованных примечаниях к этой Таблице.

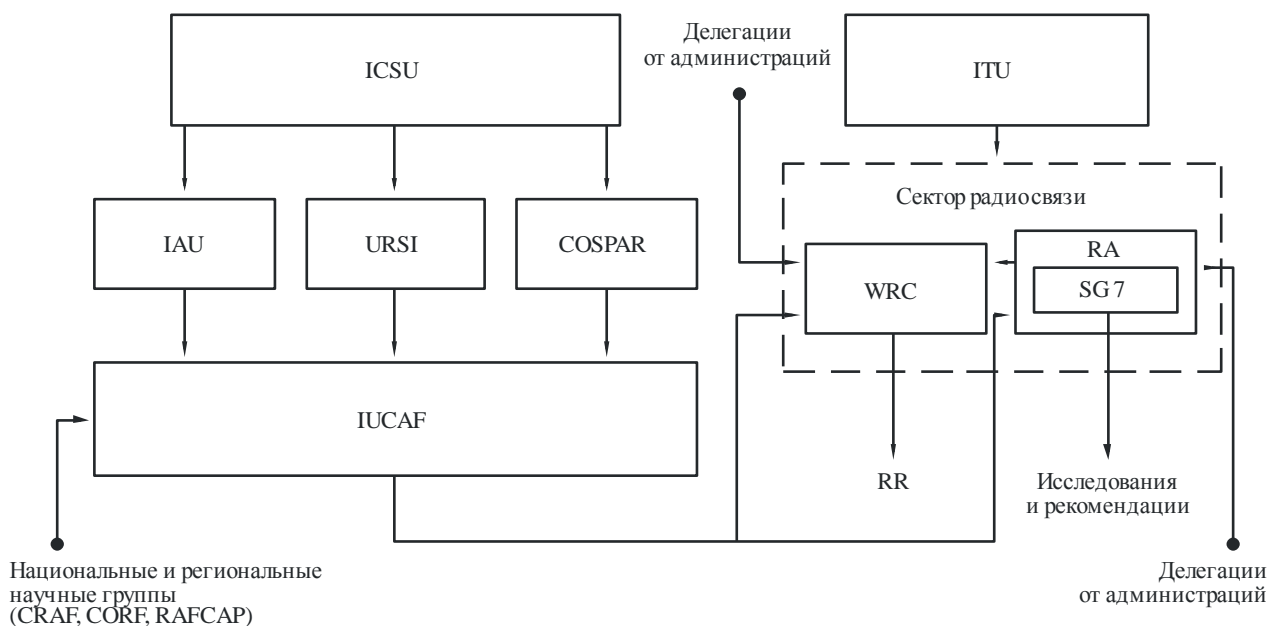
В ряде стран вопросы распределения спектра решаются государственными организациями, которые сильно различаются в разных администрациях. Во многих странах управление использованием радиочастотного спектра входит в сферу деятельности более крупных организаций, в ведении которых может также находиться почтовая и телефонная службы, транспорт, торговля и т. д. Такие организации играют основную роль в определении национальной позиции, которую они защищают на ВКР. Администрации, участвующие в международных договорах ВКР, сохраняют суверенные права на спектр в пределах своих государственных границ и могут допускать отклонения от международного регламента в той степени, в которой это не создает вредных помех на территориях других администраций. При разработке Регламента радиосвязи многие администрации требуют введения исключений в определенных полосах частот для удовлетворения конкретных национальных требований.

1.3 Радиоастрономия в качестве службы радиосвязи

Радиоастрономия была впервые официально признана службой радиосвязи на ВАРК в 1959 году. В то время под эгидой Международного совета научных союзов (ICSU) три научных союза образовали Межсоюзную комиссию по распределению частот для радиоастрономической и космических научных служб (IUCAF) в целях рассмотрения вопросов научного использования радиочастотного спектра. Тремя союзами-основателями были Международный астрономический союз (IAU), Международный научный радиосоюз (URSI) и Комитет по исследованию космического пространства (COSPAR), каждый из которых стал членом IUCAF. IUCAF участвует в работе ВКР в качестве признанной международной организации, однако не имеет права голоса. Радиоастрономы действуют через свои национальные организации или IUCAF, чтобы добиться рассмотрения своих проблем в Секторе радиосвязи или включить их в повестку дня ВКР. Помимо IUCAF, национальных и региональных комитетов, таких как Комитет по радиочастотам Национальной академии наук США (CORF), согласованное участие радиоастрономов обеспечивают Европейский комитет по частотам для радиоастрономии (ESF-CRAF) и Комитет по частотам для радиоастрономии Азиатско-Тихоокеанского региона (RAFCAP). На Рисунке 1.1 показаны некоторые взаимосвязи между организациями, участвующими в процессах координации частот для радиоастрономии.

РИСУНОК 1.1

Взаимосвязи между международными организациями, участвующими в координации частот для службы РАС



RA – Ассамблея радиосвязи
 SG 7 – 7-я Исследовательская комиссия

Radio-Astro_11

где (в алфавитном порядке):

CORF	Committee on Radio Frequencies	Комитет по радиочастотам
COSPAR	Committee on Space Research	Комитет по космическим исследованиям (КОСПАР)
CRAF	Committee on Radio Astronomical Frequencies	Комитет по радиоастрономическим частотам
RAFCAP	Radio Astronomy Frequency Committee in the Asia-Pacific Region	Комитет по радиоастрономическим частотам в Азиатско-Тихоокеанском регионе
IAU	International Astronomical Union	Международный астрономический союз (МАС)
ICSU	International Council of Scientific Unions	Международный совет научных союзов (МСНС)
ITU	International Telecommunication Union	Международный союз электросвязи (МСЭ)
IUCAF	Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science	Межсоюзная комиссия по распределению частот для радиоастрономических и космических исследований (ИЮКАФ)
RA	Radiocommunication Assembly	Ассамблея радиосвязи
SG 7	Study Group 7	7-я Исследовательская комиссия (ИК7)
URSI	International Union of Radio Science	Международный научный радиосоюз (МНРС)
WRC	World Radiocommunication Conference	Всемирная конференция по радиосвязи (ВКР)

В разделе 1 Статьи 1 Регламента радиосвязи радиоастрономия определяется как астрономия, основанная на приеме радиоволн космического происхождения. В Таблице распределения частот наибольшую защиту для радиоастрономии обеспечивают те полосы, которые распределены для радиоастрономической службы на первичной основе и используются совместно только с другими пассивными (не передающими) службами. Следующими по степени защищенности полосами являются полосы, распределенные для радиоастрономии на первичной основе, но она делит их в этом качестве с одной или несколькими активными (передающими) службами. Когда полосы частот распределяются для радиоастрономии на вторичной основе, обеспечивается меньшая защищенность.

Для многих полос защита обеспечивается в Регламенте радиосвязи не с помощью непосредственных записей в таблице распределений, а в виде примечаний. Примечания бывают нескольких видов. Для полосы частот, распределенной исключительно пассивным службам, примечание № 5.340 Регламента радиосвязи указывает, что все излучения в этой полосе частот запрещены. Другие примечания используются в том случае, когда радиоастрономии распределена только часть приведенной в таблице полосы. Примечания другого вида используются для тех полос или частей полос, которые не распределены радиоастрономической службе, но тем не менее применяются для важных астрофизических наблюдений. Это побуждает администрации принимать все практически возможные меры для защиты радиоастрономии при осуществлении частотных присвоений другим службам. Хотя такие примечания не обеспечивают никакой правовой защиты, они часто оказываются полезными для радиоастрономии в тех случаях, когда требуется координация с другими службами. Полосы частот, распределенные для радиоастрономической службы, приведены в Добавлении 1 к этому Справочнику.

1.4 Проблемы распределения частот для радиоастрономии

По ряду своих особенностей радиоастрономия отличается от большинства служб, использующих радиочастотный спектр. Радиоастрономия является пассивной службой, занимающейся только приемом данных. Пассивное зондирование используют и некоторые другие службы, такие как служба спутникового исследования Земли.

Радиоастрономические сигналы очень слабые, их плотность потока мощности на несколько порядков (на десятки децибел) ниже тех, которые используются большинством других служб. Высокочувствительные приемные системы, которые требуются для радиоастрономии, очень подвержены влиянию помех. Эта уязвимость еще усиливается за счет природы космических сигналов. Большинство сигналов имеют вид случайного шума без характерной модуляции, которая позволила бы выделять их на фоне других сигналов. Совместное использование полос частот с активными службами затруднительно. Как правило, оно возможно лишь в тех случаях, когда нет прямой видимости между радиоастрономической антенной и передатчиком, работающим в той же полосе частот. Еще одной проблемой являются нежелательные излучения, которые создаются в радиоастрономической полосе частот активными службами, работающими в других полосах. Эта проблема обостряется с ростом использования методов широкополосной цифровой модуляции, ультраширокой полосы и расширения спектра. Широкомасштабное использование нелицензированных беспроводных устройств, в частности смартфонов, планшетов или портативных компьютеров, которые могут беспрепятственно оказаться в зоне близости от радиотелескопа, еще более усугубляет эту проблему. Все эти факторы представляют собой потенциальную угрозу для радиоастрономии, и защита только при помощи распределения частот является недостаточной, чтобы гарантировать проведение радиоастрономических наблюдений без помех.

Радиоастрономы не всегда могут произвольно выбирать частоты для своей работы. Многие изучаемые ими космические сигналы имеют вид спектральных линий, охватывающих ограниченный диапазон частот. Эти линии генерируются на характеристических частотах, связанных с переходами между квантованными энергетическими состояниями атомов или молекул. Поэтому для наблюдения этих линий необходимо произвести распределения на конкретных частотах. Распределения для многих из наиболее важных линий были проведены в прошлом, когда спектр радиочастот не так интенсивно использовался другими службами. Сегодня продолжают обнаруживать новые важные линии, и многие из них не попадают в распределенные полосы. Для спектральных линий далеких галактик наблюдаемые частоты, которые обычно попадают в полосы частот радиоастрономии, могут смещаться из этой полосы за счет эффекта Доплера в связи с большой скоростью движения галактик относительно

Земли. Поэтому потенциальный научный интерес представляют практически все части радиочастотного спектра. Однако в связи с распределением для активных служб наблюдения на многих частотах бывают крайне затруднены и даже невозможны. В некоторых случаях можно свести к минимуму помехи с помощью подходящего выбора места для телескопов или определенных периодов времени для наблюдения. Желательно было бы получить дополнительные распределения частот для радиоастрономии, однако по ряду причин реализовать это затруднительно. На каждой ВКР разрабатываются проект повестки дня для следующей конференции и предварительная повестка дня для еще одной последующей конференции. Таким образом, даже в наиболее благоприятном случае каждый пункт, перед тем как попасть в повестку дня конференции, требует значительного времени и усилий на подготовку. Администрации вносят предложения по будущим пунктам повестки дня. При этом, как правило, администрации выбирают те предложения, которые, по их мнению, в наибольшей степени отвечают национальным интересам. Таким образом, более высокий приоритет может быть отдан другим службам. Даже если пункт повестки дня, относящийся к радиоастрономии, поддерживается администрациями, проявляющими интерес к данной науке, в МСЭ, где большинство решений принимается на основе консенсуса, таких администраций относительно мало.

В связи с большими трудностями, возникающими для радиоастрономов при совместном использовании частот с активными службами, и невозможностью произвольного выбора частот радиоастрономия с трудом вписывается в систему распределений частот и регламентирования. Тем не менее к пассивным службам относятся с уважением не в последнюю очередь потому, что наборы полос частот, распределенные радиоастрономической службе, позволили сделать целый ряд важных научных открытий и по-прежнему жизненно необходимы для существования этой службы.

ССЫЛКИ

Gergely, T. [2002] World Radiocommunication Conferences in “Spectrum Management for Radio Astronomy; proceedings of the IUCAF summer school held at Green Bank, W. VA, June 9-14, 2002, Eds. B. M. Lewis and D. T. Emerson, Charlottesville, VA.

ГЛАВА 2

Характеристики радиоастрономической службы

2.1 Радиоастрономическая служба

Радиоастрономия и радиоастрономическая служба (РАС) определяются в пп. **13** и **58** Статьи **1** РР как астрономия, основанная на приеме радиоволн космического происхождения. В сумме эти космические излучения создают космический фоновый шум для технических средств связи. Поскольку радиоастрономия является пассивной службой, она не использует передачу радиоволн в распределенных для нее полосах, таким образом использование этих полос не создает помех любой другой службе. С другой стороны, крайне слабые сигналы космического радиоизлучения по сравнению с интенсивностью осуществляемой руками человека передачи делает радиоастрономические наблюдения очень чувствительными к помехам от других служб радиосвязи. В настоящее время радиоастрономия использует электромагнитный спектр на частотах от значений ниже 1 МГц до приблизительно 1000 ГГц, при этом ограничения диапазона связаны в первую очередь с доступностью технологий. В принципе для РАС научный интерес представляет весь спектр радиочастот.

Радиоастрономия появилась в 1932 году, когда Карл Г. Янски обнаружил существование радиоволн внеземного происхождения [Jansky, 1935]; и сегодня она является общепризнанной и важной частью наблюдательной астрономии. Если говорить о Солнечной системе, радиоастрономия пополнила багаж наших знаний о Солнце (например, о физических процессах, ответственных за радиоизлучение плазмы), планетах и межпланетном пространстве. В более крупном масштабе исследования космических источников радиоизлучения, проводимые на многих частотах, позволяют получить информацию о межзвездных газовых облаках и образовании в них звезд, межзвездных магнитных полей, структуре и эволюции галактик и космологических параметрах Вселенной в целом. С другой стороны, спектральные линии изучения атомов и молекул на собственных частотах информируют нас о составе, движении и физических характеристиках межзвездных газовых облаков. Значительная часть информации, полученной методами радиоастрономии, уникальна и доступна только на основе приема радиоволн. Так, например, атомарный нейтральный водород (HI), базовый элемент Вселенной, может быть обнаружен только по линии радиоизлучения на частоте 1420 МГц, а его распределение и перемещение может быть изучено только путем измерения интенсивности и доплеровских сдвигов этого излучения.

При исследовании космических источников радиоизлучения радиоастрономы измеряют все свойства электромагнитного излучения. К ним относятся интенсивность, частота, поляризация, направление (положение на небосводе), а также временные отклонения этих параметров. Плотность потока мощности космического радиоизлучения у поверхности Земли, как правило, невелика. В большинстве случаев эти излучения соответствуют характеристикам случайного шума. Исключениями являются: а) импульсные излучения от пульсаров с предельно регулярными периодами; б) межпланетные и ионосферные сцинтилляции радиоисточников малого диаметра; в) нерегулярные вспышки некоторых звезд (в том числе Солнца); г) изменения в масштабе месяцев некоторых источников радиоизлучения, включая эффекты, связанные с вспышками гамма-излучений; и е) изменения, связанные с планетой Юпитер. Лучшее время для наблюдения источников радиоизлучения обычно определяется природными явлениями, такими как положение источника на небосводе и вращение Земли. В отличие от случая активных (передающих) служб, радиоастрономы не могут изменять ни характер принимаемого сигнала, ни его излучаемую мощность. Сигнал также не может кодироваться для повышения вероятности его обнаружения. Обзор по радиоастрономии, включая приборы, основные результаты и астрофизическую интерпретацию, см. в работе [Burke and Graham-Smith, 2002].

2.2 Происхождение и характер космического радиоизлучения

Космическое радиоизлучение образуется в результате действия нескольких различных механизмов. Тепловое излучение создается любым объектом, температура которого выше абсолютного нуля.

В частности, оно создается горячей плазмой, а также нейтральным газом (межзвездные газовые облака, горячие оболочки звезд и т. д.) и твердыми телами. Кроме того, считается, что микроволновый фон Вселенной представляет собой остаточное тепловое излучение горячего газа на самой ранней стадии развития Вселенной. С другой стороны, нетепловое излучение, в основном синхротронное, возникает от спирального движения релятивистских электронов в магнитном поле. Сюда входит также гиро-синхротронное и электронно-циклотронное мазерное излучение, а также излучение плазменных волн. И наконец, излучение в виде спектральных линий возникает за счет переходов между энергетическими состояниями отдельных атомов и молекул.

В частотной области эти процессы приводят к двум характерным типам излучения – а именно, широкополосному непрерывному излучению и узкополосному излучению спектральных линий.

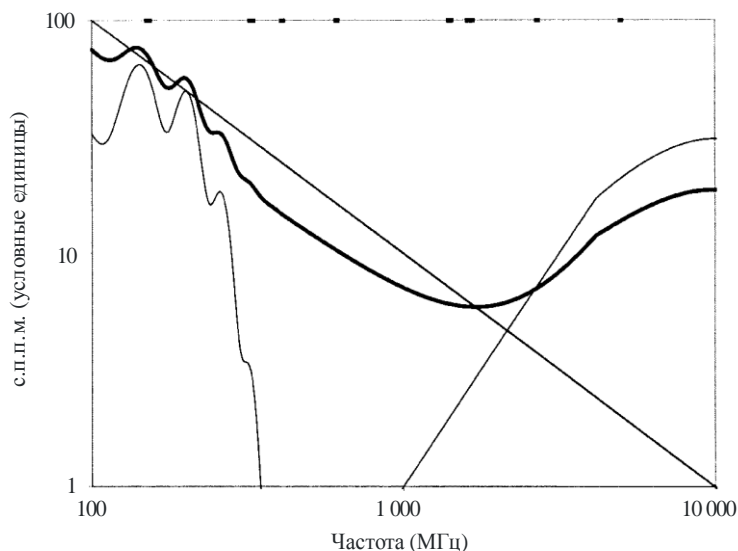
2.3 Непрерывное излучение

Непрерывное излучение создается разнообразными радиоисточниками; это излучение относительно равномерно распределяется по большей части спектра радиочастот. В общем случае нетепловые источники демонстрируют зависимость интенсивности излучения от частоты, которая отличается от зависимости тепловых источников. Кроме того, на эту зависимость могут влиять облака газа и пыли, находящиеся между источником и наблюдателем. Наблюдения небосвода, касающиеся непрерывного излучения, позволили обнаружить существование многих дискретных источников радиоизлучения, накладывающихся на широкий фон. Почти изотропная составляющая фона с яркостной температурой 2,73 К связана с тепловым излучением в ту эпоху, когда газ во Вселенной впервые стал непрозрачным для радиоизлучения. Слабая угловая структура этого излучения, измеренная на частотах между 30 и 300 ГГц, дает сведения о космологической плотности и других параметрах Вселенной. Эти измерения проводили с помощью радиометров, установленных на шарах и спутниках [Smoot *et al.*, 1992; Bennet *et al.*, 2003; Planck collaboration *et al.*, 2011], а также в наземных пунктах с сухой атмосферой [Pryke *et al.*, 2002], в целях сведения к минимуму влияния атмосферы Земли. Фоновое радиоизлучение также содержит гребенку интенсивного излучения, идущего из плоскости нашей Галактики (Млечного Пути), с явно выраженным максимумом в направлении к центру Галактики. В некоторых направлениях зубцы излучения выходят за пределы этой плоскости. Галактическое излучение обычно нетепловое, но гребенка, определяющая плоскость Галактики, также содержит тепловой вклад от ионизированного газа.

Непрерывное излучение, наблюдаемое из многих направлений небосвода, возникает в результате сочетания разных физических механизмов, что иллюстрируется спектром на Рисунке 2.1. Для получения этого спектра необходимы наблюдения на нескольких частотах, позволяющие производить оценку сочетания задействованных механизмов излучения, тем самым определяя физические условия внутри и вокруг источника.

РИСУНОК 2.1

Спектр источника непрерывного радиоизлучения



Спектральная плотность потока мощности (с.п.п.м.) изображена в виде функции частоты. Волнистая линия в левой части представляет излучение плазмы, диагональ из верхнего левого угла в нижний правый угол – синхронное излучение, а кривая линия в правой части – тепловое излучение. Жирная линия соответствует наблюдаемому спектру. Относительные величины различных компонентов могут сильно меняться при переходе от источника к источнику. Полосы частот (до 10 ГГц), распределенные радиоастрономической службе, указаны на верхнем краю диаграммы.

Radio-Astro_21

Большинство дискретных источников, расположенных вне плоскости галактики, являются внегалактическими. В основном это нетепловые источники, которые оптически определяются как удаленные галактики и квазизвездные объекты (квазары), которые распределяются более или менее случайным образом по небосводу. Радиоастрономические наблюдения таких источников позволили построить модель активного галактического ядра (AGN) с массивным центральным объектом, который может быть черной дырой, окруженной аккреционным диском с втекающим газом и вытекающими струями частиц очень высоких энергий, которые взаимодействуют с магнитными полями и создают широкие области радиоизлучения. С другой стороны, большинство объектов в пределах нескольких градусов от плоскости галактики принадлежат нашей Галактике. Они включают тепловые источники, связанные с областями ионизованного водорода (области HII), или звезды (включая Солнце), или планеты, а также нетепловые источники, включающие остатки сверхновых звезд (разлетающиеся остатки взорвавшихся звезд). Кроме того, наблюдалось радиоизлучение из областей HII и остатков сверхновых звезд в соседних галактиках.

Нетепловое излучение, наблюдаемое от внегалактических источников и источников в плоскости галактики (включая фон и остатки сверхновых), нередко бывает частично линейно поляризованным. Это излучение является синхротронным излучением, которое вырабатывается при вращении (и, соответственно, ускорении) электронов в магнитных полях с линейной поляризацией, собственное направление поляризации которой перпендикулярно направлению магнитного поля. Таким образом, существование поляризации в космическом радиоизлучении предполагает наличие определенной упорядоченности соответствующих магнитных полей. Исследования поляризованного излучения от остатков сверхновой позволило проникнуть в механизм взаимодействия этих остатков с окружающими межзвездными магнитными полями. Однако собственное направление поляризации обычно отличается от наблюдаемого направления, поскольку оно претерпевает вращение Фарадея под действием электронов в магнитных полях между источником излучения и Землей. Поскольку

вращение Фарадея изменяется обратно пропорционально квадрату частоты, оно может быть измерено при помощи результатов наблюдения поляризации, полученных в некотором диапазоне частот. Таким образом, исследования вращения Фарадея являются мощным средством для изучения плотности электронов и магнитных полей, присутствующих в межзвездной среде.

Некоторые явления, представляющие астрофизический интерес, можно наблюдать только на частотах 30 МГц и ниже. В качестве примеров можно привести поглощение непрерывного излучения активным ионизированным газом в нашей Галактике, самопоглощение в радиогалактиках и квазарах, а также низкочастотное излучение разреженной плазмы, присутствующей в скоплениях галактик.

2.3.1 Изменчивость непрерывного излучения во времени

Временная изменчивость излучения с непрерывным спектром – это довольно распространенное явление. Такое излучение может принимать различные формы: вспышки, которые длятся от долей наносекунд до нескольких часов, пульсирующее излучение с периодом повторения в интервале от миллисекунд до секунд, непериодические изменения, происходящие в течение недель и месяцев, или периодические синусоидальные изменения.

Исключительным по интенсивности источником вспышек энергии радиоизлучения разных типов с коротким периодом является Солнце, которые дают важную информацию о соответствующих физических процессах, происходящих в плазме [McLean and Labrum, 1985]. Эти вспышки наиболее интенсивны на частотах ниже 300 МГц. Кроме того, вспышки, возникающие за счет возмущений в атмосфере Солнца, могут постепенно увеличиваться по частоте за время своего существования. У других звезд были обнаружены коррелированные вспышки радиоизлучения и оптического излучения, при этом планета Юпитер также является источником интенсивных вспышек, которые возникают спорадически на частотах ниже 30 МГц [Roberts, 1963].

У планеты Юпитер проявляется особая форма изменчивости, помимо постоянного теплового излучения, исходящего от ее диска и отмеченного выше вспышками, поскольку в магнитосфере планеты существуют пояса ван Аллена. Они генерируют поляризованное нетепловое синхротронное излучение, которое является остронаправленным и концентрируется у экваториальных поясов. Поскольку магнитная ось Юпитера смещена относительно оси вращения, то интенсивность и направление поляризации наблюдаемого на Земле нетеплового излучения в процессе вращения планеты изменяются синусоидально.

На звездах типа белых карликов, обладающих мощными магнитными полями, часто происходят сильные вспышки радиоизлучения на частотах вплоть до нескольких гигагерц, что дает возможность проведения исследований плазмы в их атмосфере.

Ионосфера Земли и межпланетная среда Солнечной системы могут вызывать мерцания наблюдаемого радиоизлучения от источников с небольшими угловыми размерами. Частота мерцания может составлять несколько герц. На основе характеристики этого мерцания можно получить информацию как о размере источника, так и о неоднородности и перемещениях межпланетной среды. Хотя мерцание наблюдается и у некоторых пульсаров, его причиной служит межзвездная, а не межпланетная среда.

Некоторые источники радиоизлучения в отдельных квазарах проявляют изменчивость радиоизлучения во времени в масштабе недель. Радиоизлучение оптически определяемых источников, таких как сверхновые, новые, а также источники рентгеновского излучения, меняется синхронно с изменениями оптической яркости.

В астрофизике пульсары, возможно, являются источниками импульсного излучения, представляющими наибольший интерес. Их в крайне высокой степени регулярное импульсное излучение было открыто в 1967 году [Hewish *et al.*, 1968]. Пульсары – это звезды, почти полностью состоящие из нейтронов (т. е. из вещества в очень плотном состоянии). Большинство известных пульсаров расположено в нашей Галактике, периоды их импульсов варьируются в диапазоне от 1 мс до 8 с. Период импульса определяется вращением звезды, а продолжительность импульса зависит от угла между линией наблюдения (LoS) и осью вращения звезды и обычно составляет несколько процентов от периода импульса. Излучение пульсара, как правило, наблюдают в диапазоне частот 30 МГц – 3 ГГц. Для определения средних профилей импульса обычно используют методы усреднения импульсов со временем интегрирования, равным нескольким часам. Импульсы некоторых пульсаров

бывают по своей природе линейно поляризованными. По пути через межзвездное пространство к Земле импульсы диспергируются, и их направление поляризации меняется за счет вращения Фарадея (см. п. 2.3.2). Измерения дисперсии и вращения Фарадея позволяют определить плотность электронов и напряженность магнитного поля вдоль направления линии прямой видимости. Аналогичным образом измерения времени прихода импульсов в течение нескольких лет позволяют определить положения и движения пульсаров по небосводу (истинное движение). Данные по долговременной стабильности пульсаров, особенно с миллисекундными периодами, служат основанием для их возможного использования в будущем в качестве стандартных часов для службы времени (см. главу 7). Всемирное сообщество наблюдателей проводит временную привязку миллисекундных пульсаров в надежде на то, что этот передовой проект в конечном счете позволит им непосредственно обнаружить излучение гравитационной волны.

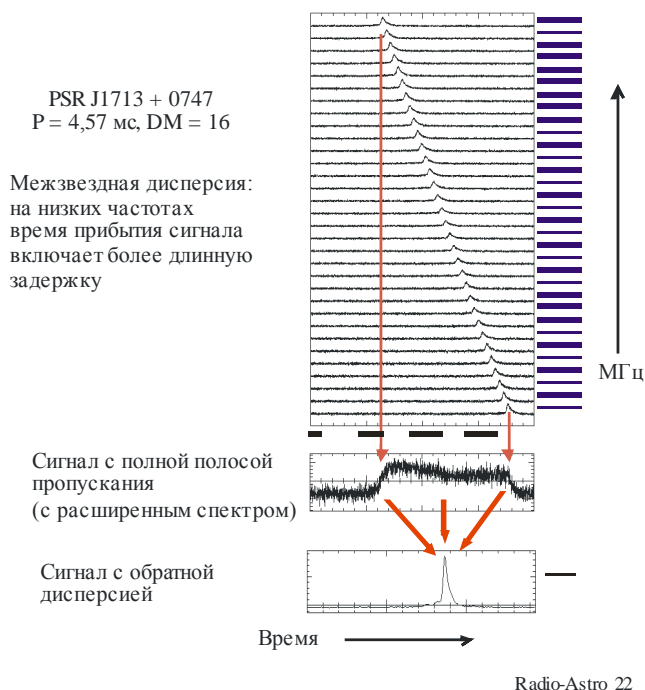
Уровни поверхностной интенсивности магнитного поля пульсаров, по оценкам, соответствуют значениям в диапазоне $10^4 - 10^9$ Тл, а в магнетарах в качестве крайних случаев они могут достигать 10^{10} Тл. Сильное магнитное поле в сочетании с быстрым вращением индуцирует сильные электрические поля и создает плотную релятивистскую плазму вокруг нейтронной звезды, перенося мощный поток энергии. Мощное когерентное радиоизлучение представляется в виде побочного результата рассеяния энергии в магнитосфере, хотя более точное определение свидетельствует о том, что данное излучение составляет только незначительную часть ($10^{-4} - 10^{-6}$) глобальной потери энергии плазмы. Эти экстраординарные условия электромагнитного поля являются маловероятными в масштабе всей Вселенной, их также невозможно воспроизвести в наземных лабораториях. Пульсары являются идеальным испытательным полигоном для законов физики, а тот факт, что процесс их радиоизлучения в течение сорока лет не был до конца изучен, является еще одним подтверждением необходимости масштабных исследований в данной области. Радиоизлучение проще всего наблюдать в диапазоне частот 30 МГц – 1,5 ГГц, однако потоки излучения многих источников на частоте 40 ГГц составляют в среднем несколько сотен микроянских ($100 \text{ мкЯн} = -300 \text{ дБ(Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1})$). Их можно обнаружить только при помощи больших антенн на частоте до 90 ГГц. Для определения среднего профиля импульса в основном используют синхронизированные по фазе методы усреднения импульсов, время интегрирования которых составляет от нескольких минут до нескольких часов. Чувствительность радиотелескопа при обнаружении периодического импульсивного излучения со средним радиопотоком в S_{\min} определяется в работе [Logimer & Kramer, 2005]:

$$S_{\min} = \frac{kT_{\text{sys}}}{G \sqrt{n_p \Delta t \cdot \Delta \nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}} .$$

Здесь G – это усиление антенны, n_p – количество усредненных поляризаций, Δt – время интеграции, $\Delta \nu$ – исследуемая полоса частот, P – период импульсов, а W – ширина импульса. Следовательно, для любого среднего уровня излучения порог обнаружения узких импульсов ($W \ll P$) принимает значение, пропорциональное квадратному корню коэффициента заполнения $\eta = W/P$. В то же время пиковый поток в $\eta^{-1} = P/W$ раз мощнее среднего потока. В результате порог обнаружения узких пиковых импульсов пропорционален $\eta^{-1/2}$ и увеличивается по мере сужения импульсов при одной и той же средней мощности.

РИСУНОК 2.2

Дисперсия импульсов в межзвездной среде (диапазон L)



Дисперсия в сильно разреженной межзвездной плазме приводит к искажению радиоимпульсов. При этом импульсы на высоких частотах приходят раньше по сравнению с аналогичными импульсами на более низких частотах, а задержка обратно пропорциональна квадрату частоты. Поскольку в данном случае речь идет о больших расстояниях, воздействие в большинстве частотных полос оказывается довольно сильным и искажает профили импульсов даже в полосах шириной в несколько мегагерц. Сигнал должен подвергнуться обратной дисперсии, и только после этого может быть обнаружен профиль.

Радиоимпульсы от некоторых источников линейно поляризованы. По пути через межзвездную среду к Земле импульсы подвергаются дисперсии, и их направление поляризации меняется за счет вращения Фарадея (см. п. 2.3.2). Совместные измерения дисперсии и вращения Фарадея дают информацию о значениях плотности электронов и магнитных полях вдоль линии наблюдения пульсара.

Измерения времени прихода импульсов, продолжающиеся в течение нескольких лет, дают информацию о положении и движении пульсаров по небосводу (истинное движение), а также об орбитальном движении нейтронной звезды при наличии спутников. Первые планеты, открытые за пределами Солнечной системы, были обнаружены на орбите вокруг пульсара. Исключительная стабильность и предсказуемость пульсаров как источников радиоимпульсов делает их идеальными инструментами для проверки постулатов общей теории относительности. Излучение гравитационных волн пульсарами, находящимися на низких орбитах вокруг других нейтронных звезд и белых карликов, является одним из прогнозов общей теории относительности, которые подтверждены импульсными временными измерениями. Проводятся дополнительные проверки постулатов общей теории относительности и сравнение ее прогнозов с прогнозами других теорий гравитации с использованием результатов измерения времени, а также при помощи измерения небольших отклонений времени прихода импульсов от нескольких пульсаров, рассеянных по небосводу. Эта методика в принципе способна обнаруживать гравитационные волны большой длины.

В настоящее время точность долгосрочного отсчета времени пульсаров составляет порядка 0,1 мкс (для наилучших примеров источников), а стабильность отсчетов времени приближается к наилучшим атомным стандартам времени. Стабильность отсчетов времени, присущая пульсарам, потенциально позволяет использовать эти источники в качестве эталонных часов будущего для служб отсчета времени (см. главу 7) и для автономной навигации в аппаратах исследования дальнего космоса.

Большинство из приблизительно 2000 обнаруженных пульсаров расположены в нашей Галактике. Радиообсерватории, ведя поиск пульсаров, преследуют различные цели. Одна из них – обнаружение пульсаров, вращающихся на орбитах вокруг других компактных объектов, таких как нейтронные звезды, пульсары, а возможно, и черные дыры. Исследования проводятся путем записи радиошума, исходящего из определенной точки пространства, и последующего поиска периодических отклонений в диапазоне от миллисекунд до нескольких секунд.

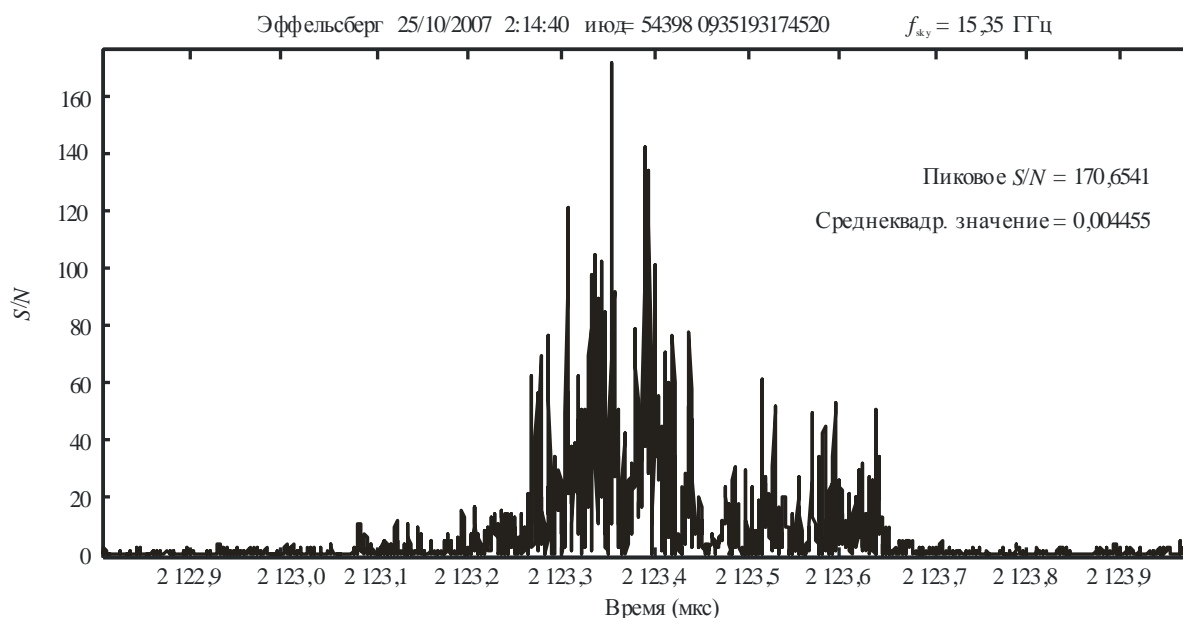
Переходная и кратковременная изменчивость в пульсарах

Профили отдельных импульсов, исходящих от пульсара, изменяются от импульса к импульсу, при этом средний профиль остается неизменным в течение нескольких лет и аналогичен его "отпечатку пальца". Такого рода отклонения отдельных импульсов могут быть слабыми или сильными и отличаются для каждого объекта. У наиболее мощных источников наблюдаются так называемые гигантские радиоимпульсы, в которых пиковый поток может превышать среднее значение в 10^6 – 10^8 раз.

РИСУНОК 2.3

Гигантский радиоимпульс от пульсара "Краб" на частоте 15,35 ГГц [Jessner *et al.*, 2010]

Пиковый поток равен 6800 Ян (~9000 К для 100-метровой антенны). Общая продолжительность показанной записи равна 1,2 мкс.



Radio-Astro_23

Гигантские импульсы сильно поляризуются, а пик их излучения находится на субнаносекундной шкале времени. Считается, что механизм их излучения представляет собой крайний случай обычного радиоизлучения пульсара, однако до конца он еще не изучен. Радиоастрономы обнаруживают и исследуют гигантские импульсы при помощи устройств регистрации неустановившихся процессов с высокой частотой выборки и механизмом срабатывания, способным выделять из шума мощные кратковременные сигналы.

Не все импульсы, излучаемые пульсарами, могут быть обнаружены в любое время. Межзвездные мерцания (подобные мерцанию звезд в ночном небе, но вызываемые изменчивостью межзвездной среды) модулируют их радиоизлучение и, представляя собой воздействие параметров плазмы, также сильно зависят от частоты. Изучение мерцания пульсаров проводится в целях лучшего понимания структуры и распределения плотности электронов в межзвездной среде в разных масштабах расстояний.

Однако некоторые пульсары испускают излучение довольно нерегулярно. Некоторые из этих объектов время от времени пропускают (аннулируют) небольшое количество импульсов, однако в ряде случаев пульсар "молчит" на протяжении многих дней, а затем внезапно возобновляет излучение. Крайним случаем такого поведения являются вращающиеся радиотранзиенты (RRATS), представляющие собой источники излучения с мощными, но короткими вспышками, длящимися лишь несколько секунд, которые можно обнаружить лишь один или два раза в день. Для их обнаружения и исследования необходима большая антенна, работающая в полосе радиочастот, свободной от внезапных импульсных помех.

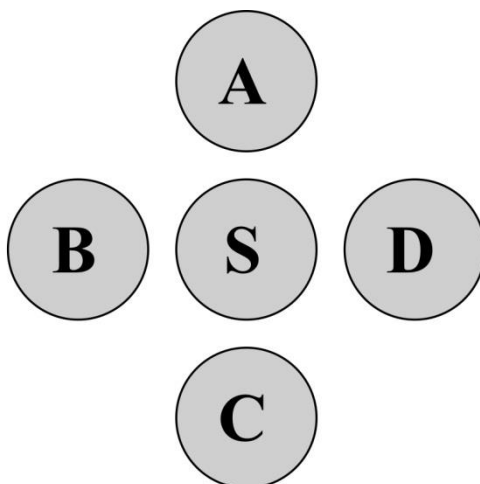
2.3.2 Измерение непрерывного излучения

На некоторых частотах, для того чтобы установить частотную зависимость непрерывного излучения, требуется проведение измерений. Измерения достаточно проводить с интервалами частот в одну октаву, поскольку спектр непрерывного излучения, как правило, сглаженный. Однако для измерения дисперсии пульсаров, вращения Фарадея, а также спектров самопоглощения желательно использовать интервалы с меньшим расстоянием между частотами. Чувствительность измерения повышается при использовании больших относительных значений ширины полосы на каждой частоте, при этом желательным значением считается 10%, а минимальным – 2%. Полосы частот, распределенные радиоастрономической службе для измерений в непрерывном спектре, рассматриваются в главе 3.

Большинство наблюдений источников радиоизлучения на частотах выше приблизительно 100 МГц проводилось с использованием "сферических зеркал" – антенн с параболическим отражателем. Их можно использовать как отдельное устройство или в виде антенных решеток. Ограничивающим фактором при использовании однозеркальных радиотелескопов является их угловое разрешение, которое соответствует их ширине диаграммы направленности по уровню половинной мощности. Их можно с достаточной эффективностью использовать для создания карт только той структуры на небосводе, которая образует углы, равные по меньшей мере нескольким значениям ширины диаграммы направленности антенны, например для радиоизлучения от Млечного пути, Солнца, Луны и от некоторых ближайших галактик. Обычно применяют разделение картируемого участка небосвода на последовательность растровых разверток, разделенных между собой не более чем на половину ширины диаграммы направленности, или на сетку точек с расстоянием между ними не более половины ширины диаграммы направленности. Создание карты может занять много времени, и при этом неявно предполагается, что источник и окружающая среда, в которой проводятся измерения, за это время не изменяются. В общем случае процедура измерений планируется таким образом, чтобы во время развертки угол места точки наблюдения оставался постоянным. Вследствие этого влияние наземного излучения в боковых лепестках во время развертки остается постоянным и его проще исключить. Однако во многих случаях однозеркальные телескопы обладают шириной диаграммы направленности большей, чем у наблюдаемого источника. В таких случаях измерения заключаются в определении параметров (например, интенсивности, поляризации) излучения от исследуемого источника и сравнения их с параметрами излучения от соседних участков небосвода. В идеальном случае строится карта участка вокруг источника, включая сам источник, так, чтобы можно было оценить избыток излучения над фоном. Однако когда время не позволяет сделать это, проводятся измерения для источника и для участков, охватывающих его, как показано на Рисунке 2.4. В большинстве случаев измеряемые параметры в процессе наблюдения существенно не меняются и могут быть усреднены по времени для каждого направления на небосвод. Изменения на выходе приемника за короткие промежутки времени показаны на Рисунке 2.5. Вклад источника в общее принимаемое излучение оценивается как $S - (A + B + C + D)/4$, где буквы обозначают средние уровни принимаемой мощности в соответствующих направлениях наведения на Рисунке 2.4.

РИСУНОК 2.4

Типичные направления наведения для наблюдения с помощью однозеркального телескопа

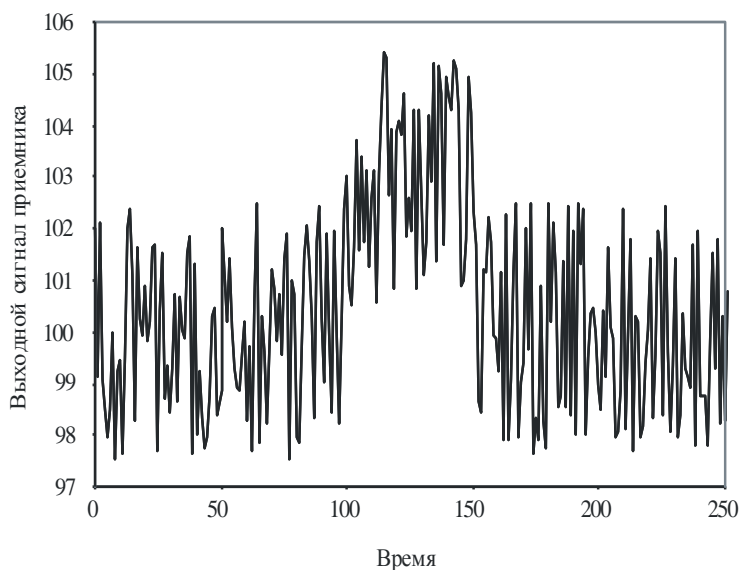


Типовая процедура, используемая для измерения источника, находящегося на направлении антенного луча, когда луч ориентирован в сторону *S*. Антенна при наведении в этом направлении, помимо источника, "видит" фоновое излучение небосвода, наземное излучение, принимаемое от боковых лепестков антенны, а также нежелательные излучения, свойства которых могут меняться в зависимости от направления и времени. Окружающие точки *A*, *B*, *C* и *D* являются близлежащими точками на небосводе. Окружности соответствуют уровням -10 дБ или ниже в диаграмме направленности антенны.

Radio-Astro_24

РИСУНОК 2.5

Пример выходного сигнала приемника при наблюдении с помощью однозеркального телескопа



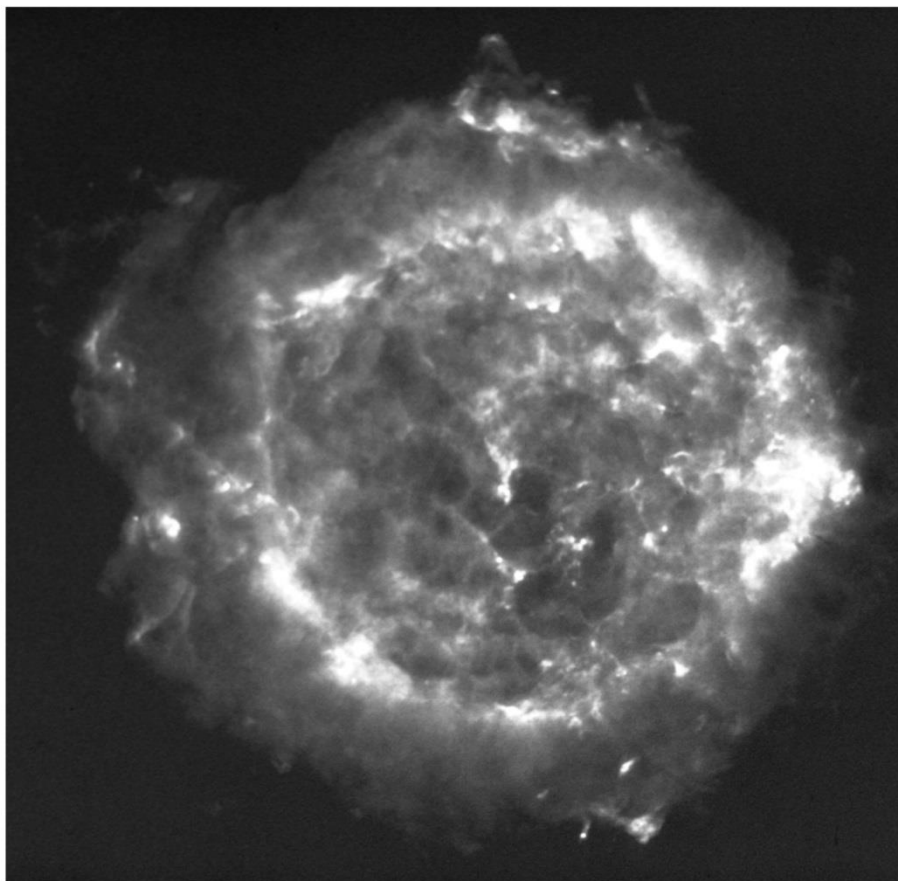
Radio-Astro_25

Выходной сигнал приемника (ось ординат) как функция времени (ось абсцисс) при проведении части наблюдения аналогичного типа, показанного на Рисунке 2.4. Левая часть записи соответствует положению *B*, центральная часть – положению *S*, а правая часть – положению *D*. В этой записи время интеграции составляет лишь несколько секунд. Впоследствии данные могут быть усреднены по времени, затраченному на каждое положение, а результаты по многим направлениям наведения могут быть дополнительно усреднены, что позволит достичь желаемого отношения S/N .

Решетка из двух или нескольких антенн, используемая в качестве инструмента картирования или получения изображения, имеет поле картирования, приблизительно равное ширине диаграммы направленности на уровне половинной мощности отдельной антенны, входящей в решетку, и разрешение, равное ширине диаграммы направленности на уровне половинной мощности для решетки. Каждая пара антенн в решетке действует как фильтр пространственных частот, измеряя амплитуду одной составляющей Фурье в изображении. Если в решетке достаточное количество антенн и они расположены в виде двумерной структуры, то за короткое время можно определить достаточно много составляющих Фурье, и изображение может быть получено за одно наблюдение. Другие решетки, такие как синтезирующий радиотелескоп в Радиоастрофизической обсерватории Доминиона в Канаде, являются линейными и используют вращение Земли для развертки изображения в разных направлениях. Наблюдения проводятся в течение примерно 12 часов с использованием фиксированных расстояний между антеннами, причем позднее исследования могут быть расширены за счет проведения дополнительных наблюдений с использованием различных расстояний между антеннами, с тем чтобы собрать достаточный объем информации в целях получения изображения. Антенны перемещают в новое положение через каждые 12 часов измерений. Синтезированную диаграмму направленности антенны для решетки не формируют, пока не будут обработаны данные для всей серии наблюдений источника, и затем определяется размер пикселей в полученном изображении. Пример синтезированного изображения показан на Рисунке 2.6. Наблюдения для получения этого радиоизображения были проведены на частоте 5 ГГц с помощью большой антенной решетки (VLA), т. е. решетки из 27 антенн, находящейся в Нью-Мехико.

РИСУНОК 2.6

Пример радиоизображения



Радиоизображение, созданное в непрерывном спектре на частоте 5 ГГц на основе результатов наблюдений при помощи решетки VLA, состоящей из 27 антенн. Объектом служит радиисточник Кассиопея А – остаток сверхновой, взорвавшейся приблизительно 300 лет назад. Угловой диаметр основной структуры равен 4 дуговым минутам (около 1/7 диаметра Луны), а угловое разрешение составляет примерно 0,6 дуговой секунды. При взрыве сверхновой внешние слои массивной звезды были выброшены с высокой скоростью, а затем подверглись замедлению, вызванному межзвездным газом. Внутреннее содержимое звезды, расширяющееся с меньшей скоростью, прорывается наружу, формируя структуры типа пузырей. В диапазоне оптических длин волн через самые крупные телескопы видны лишь несколько слабых нитей. Изображение опубликовано с любезного разрешения NRAO/AUI.

Подробная структура и пространственное распределение радиоизлучения в источниках позволяют глубже понять механизм, вызывающий генерацию радиоизлучения. Не считая использование особых обстоятельств, в которых источник закрывается луной или планетой, очень детальное картирование требует применения больших антенных решеток. Например, система, способная обеспечивать угловое разрешение в несколько дуговых секунд, должна иметь размер порядка 100 000 длин волн. Самые мелкие угловые детали в масштабе приблизительно 10^{-4} дуговой секунды можно получить с помощью методов VLBI с антеннами, расположенными на расстоянии тысяч километров одна от другой. Результирующее разрешение превышает, по крайней мере на порядок, лучшее угловое разрешение, которое сегодня можно получить в любой другой части электромагнитного спектра. Международная небесная система координат, принятая Международным астрономическим союзом для измерений местоположения, задается положениями более 200 внегалактических радиисточников, которые были измерены с точностью до 0,5 дуговой миллисекунды с использованием методов VLBI [Ma *et al.*, 1998]. Поскольку все антенны в решетке VLBI должны работать на одной и той же частоте, а отдельные антенны могут находиться в разных странах или на орбите Земли, необходима защита полос частот радиоастрономической службы на всемирной основе.

2.4 Излучение спектральных линий

Излучение спектральных линий межзвездными газовыми облаками обусловлено атомами и молекулами при потере или приобретении ими энергии в процессе столкновений между собой или радиационного возбуждения соседними звездами. В облаке из определенных атомов и молекул это приводит к переходам между энергетическими состояниями с излучением серии дискретных спектральных линий. Относительные значения интенсивности, частоты и ширины линий задаются физическими условиями и зависят от вида молекулы, плотности, температуры и распределения скоростей. При некоторых обстоятельствах интенсивность линий существенно увеличивается за счет мазерного эффекта, который часто возникает в областях образования звезд и в околозвездных оболочках погасших звезд. Спектральные линии можно также наблюдать в тех случаях, когда атомы или молекулы в облаке избирательно поглощают излучение, поступающее от источника непрерывного фонового излучения, видимого через облака.

Хотя исходная (собственная) частота спектральной линии определяется и конкретным атомом/молекулой и переходом, наблюдаемая линия также подвергается доплеровскому сдвигу в соответствии с радиальной скоростью атома/молекулы, т. е. движением относительно наблюдателя вдоль линии зрения. При больших скоростях наблюдаемая частота существенно смещается от исходного значения, зачастую далеко за нижние частотные пределы полосы, распределенной для радиоастрономической службы. Доплеровские сдвиги в линии HI на частоте 1420 МГц, в частности, позволили определить характеризуемую спиральными ветвями структуру и вращение как нашей собственной Галактики, так и многих внешних галактик.

2.4.1 Типы спектральных линий

Радиоастрономы наблюдают несколько типов спектральных линий. Первым был обнаружен сверхтонкий переход с переворотом спина в нейтральном атомарном водороде (HI) на частоте около 1420 МГц (длина волны 21 см), и произошло это в 1951 году [Ewen and Purcell, 1951]. Это открытие стало важной вехой в астрономии, поскольку последующие наблюдения по всему небосводу дали первую общую картину истинной спиральной структуры нашей Галактики. Теперь мы знаем, что нейтральный атомарный водород находится в избыточном количестве в большинстве галактик, что делает эту спектральную линию исключительно важной для изучения межзвездного газа в галактиках в целом. Однако большая скорость разбегания дальних галактик приводит к тому, что их излучение HI часто претерпевает доплеровский сдвиг к частотам за нижним пределом защищенной радиоастрономической полосы 1400–1427 МГц. В действительности эту линию наблюдали при поглощении на таких низких частотах, как 300 МГц.

Первая молекулярная линия (соответствующая гидроксильному радикалу OH на частоте 1,6 ГГц) была обнаружена в 1963 году. Прошло несколько лет, прежде чем обнаружили другие молекулы, но с тех пор наблюдали более 10 000 переходов для приблизительно 125 межзвездных молекул и их изотопов. Перечень обнаруженных переходов в диапазоне частот от 0,7 до 350 ГГц можно найти в работе [Lovas, 2004]. Реально только для некоторых из этих линий можно обеспечить защиту в рамках Регламента радиосвязи, но защита желательна для тех линий, которые считаются наиболее важными с астрофизической точки зрения (см. главу 3).

Молекулярные линии возникают в нескольких типах межзвездных облаков газа – диффузных облаках малой плотности; изолированных холодных темных облаках, часто содержащих молекулы, которые нестабильны на Земле; а также в гигантских плотных молекулярных облаках, содержащих области HI, молодых горячих звездах и звездах на стадии формирования. В этих облаках содержится значительная доля общей массы нашей Галактики, однако молекулы составляют только часть этой массы, так как основным материалом служит атомарный водород. Мазерные линии, как особый тип спектральных линий, характерны только для некоторых молекул. Они возникают за счет усиления фонового непрерывного излучения. В нашей Галактике они являются интенсивными, очень узкополосными и зачастую поляризованными. Эти линии представляют особый интерес, поскольку указывают на плотные области облаков, в которых рождаются звезды. Некоторые из них также могут свидетельствовать о вытянутых оболочках погасших звезд. В некоторых галактиках вблизи ядра было обнаружено широкополосное сверхъяркое (мегамазерное) мазерное излучение. Исследования

спектральных линий нашей Галактики дают информацию о молекулярных облаках, процессах эволюции звезд, а также о спиральной структуре Галактики и химической эволюции. Благодаря повышению чувствительности и углового разрешения современных антенных решеток подобные свойства также исследуются в других галактиках. Исследования более удаленных галактик обычно включают изучение особенностей спектральных линий наиболее распространенных элементов – водорода и окиси углерода. Наблюдение молекулярных линий от астрономических источников позволило также провести лабораторное моделирование окружающих их условий в целях синтеза молекул, в частности цианогексатриина – молекулы с углеродной цепью HC_7N [Kroto *et al.*, 1978]. Интересным побочным продуктом этих лабораторных исследований было открытие сферической углеродной молекулы бакминстерфуллерена C_{60} [Kroto *et al.*, 1985].

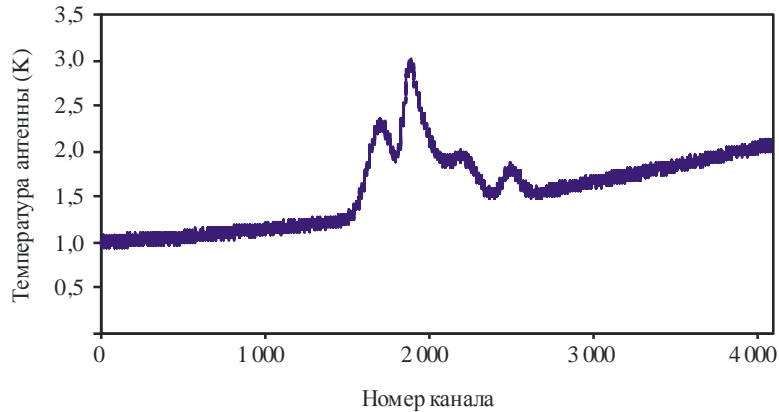
Рекомбинационные линии излучаются атомами водорода, гелия, углерода и т. д., когда их электроны переходят из высокоэнергетического состояния в состояние с более низкой энергией. Этот процесс обычно следует за рекомбинацией иона с электроном. Первые линии радиорекомбинации были обнаружены астрономами в СССР в 1964 году [Sorotchenko *et al.*, 1964]. В областях горячего ионизированного газа возникает множество рекомбинационных линий, распределенных по радиоспектру [Lilley and Palmer, 1968]; некоторые из них находятся в полосах РАС, распределенных для наблюдений непрерывного спектра, а другие – в полосах РАС, которые изначально были распределены для специальных наблюдений других линий, в частности HI или OH. Наблюдения за интенсивностью и формами рекомбинационных линий позволяют определить физические условия, в которых они возникают. Наиболее яркие из этих линий появляются в результате переходов между соседними энергетическими уровнями водорода, где их интенсивность, как правило, составляет несколько процентов от тепловой интенсивности непрерывного спектра.

2.4.2 Измерение спектральных линий

Для наблюдения спектральных линий полосу пропускания приемника при помощи цифровой обработки сигнала промежуточной частоты (ПЧ) разделяют на большое количество частотных каналов одинаковой ширины. На Рисунке 2.7 приведен типичный выходной сигнал, получаемый при наблюдении с одной параболической антенной. Узкополосные излучения спектральных линий от атомов или молекул в космическом газовом облаке расширяются, как правило, за счет доплеровского сдвига, который обусловлен движением газа. Поэтому сведения об интенсивности и частоте можно использовать, чтобы сделать заключение о перемещении и массе материала в облаке. Однако спектральные данные без поправок искажаются за счет отклонения от равномерности полосы пропускания приемника, стоячих волн в системе антенна/облучатель и возможной неоднородности спектра фонового излучения. Эти эффекты обычно устраняются при помощи повторных наблюдений на слегка измененной центральной частоте, чтобы исключить влияние наклона и пульсаций в полосе пропускания, и повторных наблюдений в соседних положениях на небосводе, чтобы исключить фоновое излучение. Что касается излучения HI, широко распространенного на небосводе, полностью устранить влияние излучения, принимаемого боковыми лепестками, затруднительно. Для этого необходимы подробные данные обо всей диаграмме направленности антенны и некоторая информация о распределении космического газа, непреднамеренно полученная боковыми лепестками.

РИСУНОК 2.7

Пример профиля выходного сигнала приемника для спектральной линии нейтрального водорода



По оси ординат показан выходной сигнал приемника, пропорциональный температуре антенны, а по оси абсцисс – номер спектрального канала. Полосы пропускания каналов выбираются соответствующими ширине спектральной линии. Одночастотная спектральная линия расширена до показанного профиля за счет движения в облаке излучающего вещества вдоль линии видимости от антенны. Наклонная базовая линия отражает комбинацию влияния приборов и, возможно, фонового излучения, которые корректируются при последующем приведении данных.

Radio-Astro_27

Наблюдаемый профиль линии, т. е. изменение интенсивности в зависимости от частоты подвержено доплеровскому сдвигу от естественной собственной частоты за счет радиальной скорости атомов/молекул относительно наблюдателя. Турбулентное движение внутри облака расширяет наблюдаемый профиль. Если радиальная скорость v_r мала по сравнению со скоростью света c , то ее связь с относительным сдвигом частоты $\frac{\Delta f}{f}$ дается выражением

$$v_r = -c \frac{\Delta f}{f} .$$

Следует отметить, что знак скорости положителен для удаления, что приводит к отрицательному сдвигу частоты, т. е. уменьшению частоты, которое часто называют "красным смещением". Поскольку дифференциальное вращение в пределах нашей Галактики подразумевает, что наблюдаемые радиальные скорости галактических объектов находятся в диапазоне ± 300 км/с, данные по скорости фактически дают третье измерение (вдоль линии наблюдения), которое дополняет проекцию распределения вещества на небосводе. Кроме того, поляризация некоторых видов излучения линий, в частности мазерного излучения, также может предоставлять информацию о магнитных полях в этих облаках.

Если речь идет о молекулярном облаке, то интенсивность профиля на конкретной частоте зависит от температуры, плотности столба и оптической глубины на этой частоте. Эти параметры часто можно разделить, если данная линия имеет структуру, связанную со сверхтонким расщеплением участвующих в переходе энергетических уровней; в противном случае эти параметры могут быть определены путем сравнения различных переходов в одной и той же молекуле. Последний метод особенно полезен при устранении неопределенностей, вызываемых излучением оптически толстой среды, путем изучения одной из наименее распространенной в межзвездном пространстве модификаций изотопа, в частности излучения ^{13}CO вместо ^{12}CO .

Спектральные линии в радиодиапазоне особенно хорошо подходят для точного измерения доплеровских сдвигов, поскольку радиочастоты могут быть легко измерены с высокой точностью. Доплеровские измерения орбитального движения мазерных источников, излучающих линию воды на

22 ГГц, в сочетании с VLBI-измерениями их положения с высоким угловым разрешением позволили непосредственно измерить расстояние до галактики NGC4258, которое составляет $7,2 \pm 0,3$ Мпс⁶. Таким образом, были получены результаты первых прямых измерений расстояния до внегалактического объекта, полностью независимые от любых других астрономических измерений [Herrnstein *et al.*, 1999].

Каждый канал спектрометра соответствует определенному диапазону доплеровского сдвига, поэтому если антенная решетка используется для наблюдения спектральных линий, для каждого канала формируется отдельное изображение. Во множестве случаев доплеровский сдвиг может интерпретироваться как расстояние, таким образом, вместо карты данных мы получаем куб данных, представляющий распределение вещества источника в кубе пространства.

Зачастую для получения чувствительности, необходимой для того, чтобы сделать интересные с астрофизической точки зрения заключения, требуются многочасовые наблюдения. Вредные помехи должны отсутствовать в достаточно широкой полосе, чтобы она включала линии с доплеровским сдвигом вместе с полосами сравнения, охватывающими излучение линии.

2.5 Современная практика

Совершенствование технических средств вносит значительный вклад в развитие радиоастрономии. Речь идет о постоянном росте центральных частот применяемых приемников, а также о снижении их системной температуры и увеличении полосы пропускания. В настоящее время повсеместно распространены серверы цифровых баз данных, доступ к ним можно осуществлять с помощью компьютера. Это позволяет проводить кратковременные сеансы подключения. Полученный на выходе сигнал (до его усреднения в целях достижения нужной чувствительности) может быть проверен на предмет наличия серьезных РЧ-помех. Прогресс в области скорости передачи данных и более чем доступный по цене объем памяти позволяют сохранять крупные массивы данных для последующей обработки с использованием усложненных алгоритмов. Больше всего пользы от многих таких разработок получают астрономы, ведущие VLBI-наблюдения. Получение данных в реальном времени по волоконно-оптическим сетям стало теперь возможным при одновременном использовании телескопов, расположенных в Северной и Южной Америке, а также в Европе и Южной Африке. При этом происходит сокращение объема информации, и законченные изображения могут быть получены практически в режиме реального времени. За прошедшее десятилетие для данного типа наблюдений полоса пропускания несколько раз увеличивалась вдвое с заметным повышением чувствительности. Для сравнения, результаты VLBI-наблюдений хранились ранее на магнитной ленте, и в последующие месяцы их объем необходимо было сокращать; с 60-х годов XX века радиоастрономам, ведущим однозеркальные наблюдения спектральных линий, больше не приходится работать в столь медленном режиме.

Технический прогресс изменил предпочтительный режим проведения наблюдений непрерывного спектра. В настоящее время целесообразнее использовать цифровой спектрометр, который позволяет идентифицировать мощные РЧ-помехи и удалять их из спектров до начала измерений в непрерывном спектре. Кроме того, более широкие полосы пропускания современных приемников послужили для наблюдателей хорошим стимулом к использованию режимов наблюдения, которые для проведения исследований вне распределенных полос частот РАС имеют встроенную защиту против РЧ-помех. Другие наблюдатели получают достоверные астрономические данные путем использования узкополосных режекторных фильтров (в ряде случаев высокотемпературного сверхпроводящего типа) для подавления мощных нежелательных сигналов, возникающих вблизи границы выбранной полосы пропускания; а также путем использования высокой спектральной разрешающей способности, с тем чтобы методы резекции можно было применить к антропогенным узкополосным элементам. Тем не менее служба РАС пока нуждается в распределенных для нее полосах как в целях точной калибровки данных, так и для минимизации неоднозначности при наблюдениях спектральных линий, вызванной РЧ-помехами.

⁶ Один мегапарсек (Мпс) равен $3,26 \times 10^6$ световых лет.

2.6 Выводы

Радиоастрономия играет существенную роль в изучении проблем фундаментальной физики и астрономии Вселенной. Многие исследуемые явления нельзя наблюдать в других частях электромагнитного спектра. В качестве примеров можно отметить излучение линий нейтральным атомарным водородом, микроволновое фоновое излучение и его угловую структуру, которая имеет важнейшее значение для космологии, большие области синхротронного излучения, связанные с радиогалактиками, и области образования звезд, закрытые пылью на частотах оптического диапазона. Кроме того, в области радиочастот можно добиться наивысшего углового разрешения и наиболее точных значений углового положения, а также наиболее точных доплеровских сдвигов. Таким образом, радиоастрономия является не просто приложением к традиционным оптическим методам, а играет ведущую роль в исследованиях, проводимых во многих областях астрономии и астрофизики.

ССЫЛКИ

- BENNET, C. *et al.* [2003] "The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission", *Astrophysical Journal*, Vol 583 (1), p. 1–23.
- BURKE, B. F. and GRAHAM-SMITH, F. [2002] *An introduction to radio astronomy*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- EWEN, H. I. and PURCELL, E. M. [1951] Observations of a line in the galactic radio spectrum. *Nature*, Vol. 168, p. 356.
- HERRNSTEIN, J. R., MORAN, J. M., GREENHILL, L. J., DIAMOND, P. J., INOUE, M., NAKAI, N., MITOSHI, M., HENKEL, C. and RIESS, A. [1999] A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk. *Nature*, Vol. 158, p. 539.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- JANSKY, K. G. [1935] A note on the source of interstellar interference. *Proc. IRE*. Vol. 23, p. 1158-1163.
- JESSNER, A. *et al.* [2010] Giant pulses with nanosecond time resolution detected from the Crab pulsar at 8.5 and 15.1 GHz, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 524, id.A60.
- KROTO, H. W., KIRBY, C., WALTON, D. R. M., AVERY, L. W., BROTON, N. W., MACLEOD, J. M. and OKA, T. [1978] The detection of cyanohexatriyne in Heiles's cloud 2. *Astrophys. J.*, Vol. 219, L133-L137.
- KROTO, H. W., HEATH, J. R., O'BRIEN, S. C., CURL, R. F. and SMALLEY, R. E. [1985] C_{60} : Buckminsterfullerene. *Nature*, Vol. 318, p. 162-163.
- LILLEY, A. E. and PALMER, P. [1968] Tables of radio frequency recombination lines. *Astrophys. J.*, Suppl. Series, Vol. 16, p. 143-174.
- D. LORIMER, D. and KRAMER, M. [2005]: *Handbook of Pulsar Astronomy*, CUP, Cambridge (U.K.).
- LOVAS, F. J. [2004] Recommended rest frequencies for observed interstellar molecular microwave transitions – 2002 revision. *J. Phys. and Chem. Ref. Data*. Vol. 33, p. 117-335.
- MA, C., ARIAS, E. F., FEY, A. L., GONTIER, A.-M., JACOBS, C. S., SOVERS, O. J., ARCHINAL, B. A. and CHARLOT, P. [1998] The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 516-546.
- MCLEAN, D. J. and LABRUM, N. R. [1985] *Studies of the sun at metre wavelengths*. Cambridge University Press.
- Planck Collaboration *et. al.* [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys*, Vol. 536, 1.
- PRYKE, C., HALVERSON, N. W., LEITCH, E. M., KOVAC, J., CARLSTROM, J. E., HOLZAPFEL, W. L. and DRAGOVAN, N. [2002] Cosmological parameter extraction from the first season of observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 46-51.
- ROBERTS, J. A. [1963] Radio emission from the planets. *Planet and Space Sci.*, Vol. 11, p. 221.
- SMOOT, G. F. and 27 co-authors [1992] Structure of the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J.*, Vol. 396, L1-L5.
- SOROTCHENKO, R. L., BORODZITCH, O. S., DRAVSKIKH, Z. V. and KOLBASSOV, V. A. [1964] Proc. of the XIIth General Assembly of the International Astronomical Union, Hamburg, Germany.

ГЛАВА 3

Предпочтительные полосы частот для радиоастрономических наблюдений

3.1 Общие соображения

3.1.1 Радиоастрономические наблюдения с помощью наземного оборудования

Выбор частоты для наземной радиоастрономии зависит от того, какое явление будет наблюдаться, и от атмосферы Земли (тропосферы и ионосферы). Ионосфера оказывает сильное влияние на наблюдения на частотах ниже 30 МГц; проведенные измерения позволяют предположить, что самая низкая практически пригодная частота для наземных наблюдений составляет около 1,5 МГц (см. п. 3.2.1); и большая часть наблюдений проводится на частотах выше приблизительно 20 МГц. Тропосфера влияет на наблюдения за счет поглощения сигналов в первую очередь кислородом (O_2) и парами воды (H_2O). Затухание за счет резонанса этих молекул схематически показано на Рисунке 3.1. Влияние других компонентов атмосферы, например CO, NO, и NO_2 , пренебрежимо мало. Хотя некоторые первые открытия галактического радиоизлучения были сделаны на нескольких десятках мегагерц (т. е. на дециметровых длинах волн), общая тенденция в радиоастрономии – переход на измерения на более высоких частотах.

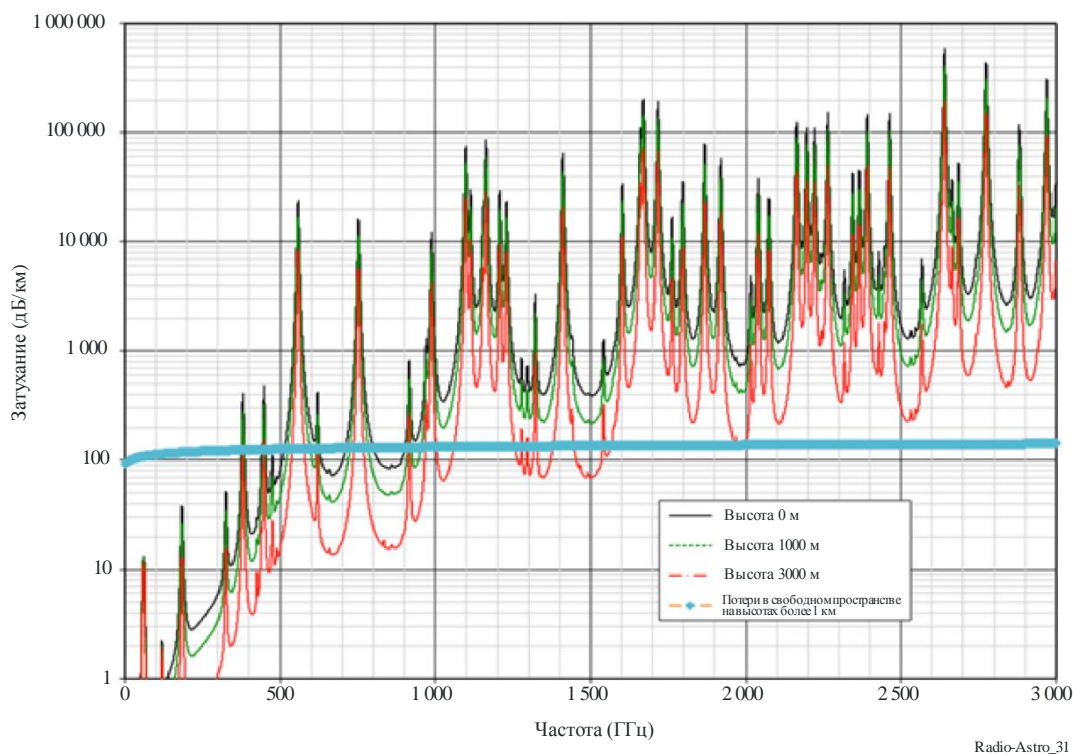
Высокое угловое разрешение, обеспечиваемое параболическими антеннами, разработка предварительных усилителей с низким уровнем шума и успехи исследований на более высоких частотах внесли свой вклад в эту тенденцию. Радиоастрономы первыми использовали частоты выше 100 ГГц, и сегодня наблюдения проводятся на очень высоких частотах – до 1000 ГГц. Большой миллиметровый/субмиллиметровый антенный комплекс в Атакаме (ALMA) был запущен в эксплуатацию в 2010 году⁷. Антенная решетка ALMA, расположенная в Чили, в пустыне Атакама, позволяет вести наблюдения в диапазоне частот от 30 до 950 ГГц, а ее пространственное разрешение составляет 0,01 дуговой секунды. При помощи комплекса ALMA планируется изучить подробную структуру зон формирования планет, вопросы возникновения и эволюции галактик, взаимосвязи между Вселенной и происхождением жизни, а также изучить прочие, до сих пор не исследованные области астрономии.

Несмотря на новые результаты, полученные на высоких частотах, существуют представляющие астрофизический интерес явления, которые происходят только на более низких частотах, например, поглощение при свободно-свободном переходе в ионизованных областях Галактики, собственное поглощение внегалактических источников радиоизлучения и механизмы низкочастотного излучения разряженной плазмы в скоплениях галактик.

⁷ <http://www.almaobservatory.org/>

РИСУНОК 3.1

Атмосферное затухание на горизонтальных трассах на высоте 1 км, рассчитанное на четырех различных высотах. На графике в справочных целях отображены также потери в свободном пространстве на высотах выше 1 км



Radio-Astro_31

3.1.2 Космические радиоастрономические наблюдения

Космические наблюдения являются относительно новой областью радиоастрономии. Ряд космических радиоастрономических наблюдений был проведен, например, спутниками "COBE", "SWAS", "ODIN HALCA", "WMAP" и "PLANCK".

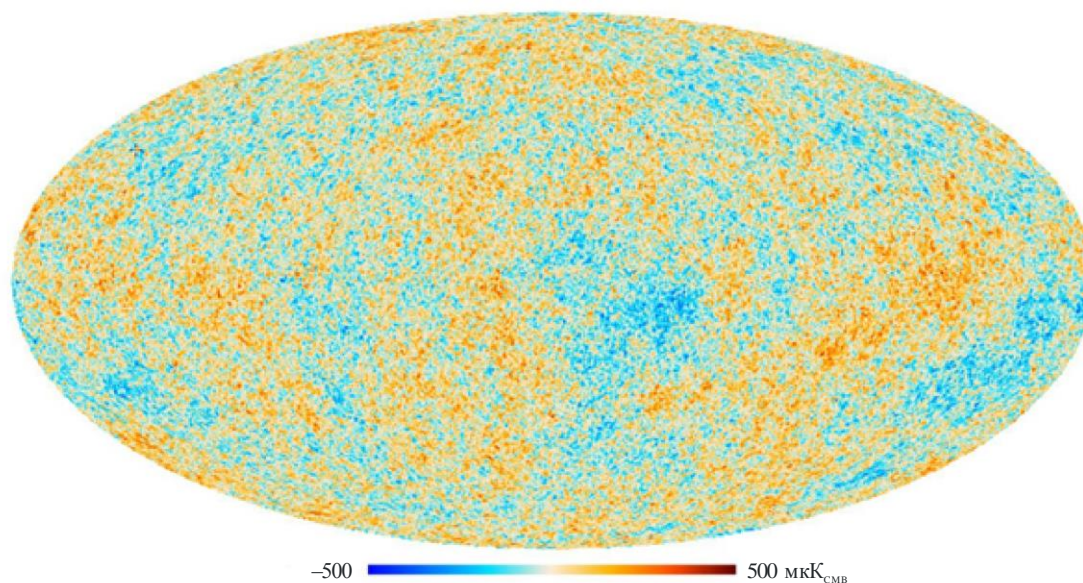
Спутники "COBE", "WMAP" и "PLANCK" обнаружили явление анизотропии космического микроволнового фонового (реликтового) излучения и нанесли на карту соответствующие данные. Информация о распределении космического микроволнового фонового излучения, полученная в ходе измерений спутником "PLANCK" на частотах между 30 и 857 ГГц (см. Рисунок 3.2), позволяет определить возраст Вселенной – 13,8 миллиардов лет. Кроме того, был установлен примечательный факт – обычные атомы (так называемые барионы) составляют лишь 4,9% Вселенной, темная материя (материя, состоящая не из атомов) – 26,8%, а темная энергия (в форме космологической постоянной) образует 68,3% Вселенной, в связи с этим скорость расширения Вселенной возрастает.

С помощью спутников "SWAS" и "ODIN" наблюдались частоты выше 100 ГГц и до 500 ГГц для измерения распространенности H_2O , O_2 и других спектральных линий, которые почти невозможно наблюдать с поверхности Земли.

Спутник "HALCA" был объединен с наземными радиотелескопами для проведения первых космических экспериментов с радиоинтерферометром со сверхдлинной базой (VLBI) на 1,4; 1,6 и 5 ГГц. Ввиду отсутствия атмосферного поглощения космическая радиоастрономия очень важна для наблюдения в диапазонах частот, в которых невозможно провести наземные наблюдения.

РИСУНОК 3.2

На основе наблюдений со спутника "PLANCK", проводившихся в течение 15,5 месяцев, была создана детальная (на весь небосвод) картина зарождающейся Вселенной



Radio-Astro_32

На основе наблюдений со спутника "PLANCK", проводившихся в течение 15,5 месяцев, была создана детальная (на весь небосвод) картина зарождающейся Вселенной. На изображении показаны (разным цветом) температурные колебания, возраст которых составляет 13,77 миллиарда лет, ставшие теми "семенами", из которых впоследствии образовались галактики. На изображении показан диапазон температур ± 500 мК.

Автор: ESA and the Planck Collaboration⁸

3.2 Предпочтительные полосы непрерывного излучения

Одна из целей наблюдения непрерывного излучения в радиоастрономии состоит в достаточно подробном определении изменения частоты излучения, чтобы можно было сделать заключение относительно лежащих в его основе физических механизмов. Обычно для этого бывает достаточно провести наблюдения в каждой октаве спектра, хотя при некоторых обстоятельствах требуется меньший шаг. Выбор полос частот следует проводить от самой нижней частоты до самой высокой частоты, при которой обычно возможны наземные наблюдения, т. е. приблизительно от 10 МГц до 1000 ГГц.

В главе 4 показано, что для наблюдений непрерывного спектра минимальный детектируемый сигнал обратно пропорционален корню квадратному из ширины полосы. Поэтому при отсутствии помех использование как можно более широкой полосы частот обеспечивает лучшую чувствительность и повышает эффективность применения большинства астрономических приборов. Для чувствительных измерений значение 2% считается минимальной шириной полосы, а желательно иметь 10%.

В Таблице 3.1 приведен перечень полос частот ниже 275 ГГц, распределенных службе РАС, которые предпочтительнее использовать для наблюдений непрерывного спектра (см. также Таблицу 3 в Рекомендации МСЭ-R RA.314).

⁸ <http://www.esa.int/Planck>

ТАБЛИЦА 3.1

**Распределенные для РАС полосы частот ниже 275 ГГц,
которые предпочтительно использовать
для наблюдения непрерывного спектра**

Полоса частот (МГц)	Ширина полосы (%)	Полоса частот (ГГц)	Ширина полосы (%)
13,360–13,410	0,37	10,6–10,7	0,94
25,550–25,670	0,49	15,35–15,4	0,33
37,5–38,25	1,98	22,21–22,50	1,30
73–74,6 ⁽¹⁾	2,17	23,6–24,0	1,68
150,05–153 ⁽²⁾	1,95	31,33–31,8	1,58
322–328,6	2,03	42,5–43,5	2,33
406,1–410	0,96	76–116	41,67
608–614 ⁽³⁾	0,98	123–158,5	25,22
1 400–1 427	1,91	164–167	1,81
1 660–1 670	0,60	200–231,5	14,60
2 655–2 700	1,68	241–248	2,87
4 800–5 000	4,08	250–275	9,52

⁽¹⁾ Распределение (первичное) в Районе 2, рекомендуется защита в Районах 1 и 3.

⁽²⁾ Распределение (первичное) в Районе 1, Австралии и Индии.

⁽³⁾ Распределение (первичное) в Районе 2, Африканской зоне радиовещания (606–614 МГц), Китае (606–614 МГц) и Индии. В Районе 1 (кроме Африканской зоны радиовещания) и в Районе 3 эта полоса распределяется на вторичной основе.

Принятый для радиоастрономии уровень защиты не одинаков для всех полос, и в некоторых случаях он недостаточен, чтобы данной полосой могли полностью пользоваться радиоастрономы. Некоторые полосы совместно используются с активными (передающими) службами, примеры проблем при совместном использовании рассмотрены в главе 5.

При наличии требуемой защиты некоторые полосы, приведенные в Таблице 3.1, удовлетворяют минимальным требованиям (ширина полосы 2%) для охвата частот. Однако примечательно, что из наиболее широко используемых полос в низкочастотном диапазоне (ниже 76 ГГц), только диапазон 1414 МГц приближается к минимальным требованиям для ширины полосы. Ситуация существенно отличается для диапазона частот выше 76 ГГц, поскольку распределения для РАС были расширены на ВКР-2000, и четыре полосы превышают полосу пропускания в 10%.

3.2.1 Наблюдения на низких частотах

Радиоастрономические наблюдения на частотах ниже приблизительно 50 МГц сталкиваются с проблемами, которые не возникают на более высоких частотах. Недостаточно приборов, которые бы обеспечивали высокое угловое разрешение; для разрешения лучше одного градуса требуются антенны протяженностью несколько километров. Некоторые обсерватории, занимающиеся вопросами радиоастрономии на низких частотах, разработали интерферометры, позволяющие увеличить пространственное разрешение. Ниже 13 МГц радиоастрономической службе не распределена ни одна полоса. Поскольку международная связь, в частности радиовещательная служба, широко использует низкие частоты для распространения волн с помощью отражения от ионосферы, крайне сложно найти на Земле места для радиоастрономии, изолированные от мешающих сигналов. На наблюдения на низких частотах влияет ионосфера Земли, которая меняется в зависимости от времени суток, времени года и солнечной активности. Можно успешно проводить наблюдения, только если электронная плотность в слое F достаточно низка, чтобы обеспечить прохождение через ионосферу, и если

относительно мало неоднородностей в километровом масштабе, чтобы минимизировать искажения диаграммы направленности антенны за счет эффекта мерцаний. Несколько наземных наблюдений на частотах ниже 10 МГц было проведено в Тасмании, которая является выгодным местом с точки зрения ионосферных ограничений и отсутствия помех. Проведенные там наблюдения в начале 1960-х годов показали, что частота 1,5 МГц является практическим пределом для наземных радиоастрономических измерений.

3.2.2 Высокочастотные полосы для наблюдения непрерывного спектра

На частотах выше 20 ГГц приходится выбирать полосы, чтобы избежать максимумов атмосферного поглощения в связи с наличием кислорода (O_2) и паров воды (H_2O). Выбираемые полосы частот для наблюдения непрерывного спектра должны лежать в пределах минимумов атмосферного поглощения вблизи 30, 90, 150, 240, 410, 470, 670 и 850 ГГц. Поэтому несмотря на ограниченный выбор, все же имеются пригодные интервалы выборки. В настоящее время радиоастрономические полосы распределяются только до частоты 275 ГГц, и принятая политика выбора полос, содержащих важные спектральные линии, определила выбор диапазона частот для многих полос, особенно на высоких частотах. Следует отметить, что полосы 275–323 ГГц, 327–371 ГГц, 388–424 ГГц, 426–442 ГГц, 453–510 ГГц, 623–711 ГГц, 795–909 ГГц и 926–945 ГГц определены для использования администрациями в интересах радиоастрономической службы. В XXI веке активным службам требуется все больше высокочастотных полос для широкополосной связи. На ВКР-2012 было принято пересмотренное примечание 5.565, которое гласит: "Все частоты в диапазоне 1000–3000 ГГц могут быть использованы как активными, так и пассивными службами".

В Отчете МСЭ-R RA.2189 приведены результаты исследований по совместному использованию частот в диапазоне 275–3000 ГГц. В Отчете сделан вывод, что совместное использование частот радиоастрономией и активными службами в диапазоне 275–3000 ГГц не представляет проблем по следующим причинам.

На земле, в условиях близких к наихудшим, наземная линия связи в диапазоне 275–1000 ГГц должна находиться на большой высоте и функционировать с максимально возможной мощностью. При этом большая параболическая антенна направлена непосредственно на телескоп, и на телескопе возникает сигнал, который может оказывать неблагоприятное воздействие на радиоастрономические наблюдения. На частотах выше 1000 ГГц источник помех должен находиться на расстоянии в пределах 1 км, работая с максимальной мощностью, и должен быть направлен непосредственно на телескоп, чтобы превышался пороговый уровень помех; вероятнее всего, столь близко расположенная линия связи должна либо управляться самой радиообсерваторией, либо она неофициально, на местном уровне, должна координировать работу с обсерваторией, на которую воздействуют помехи.

Если речь идет о помехах от передатчиков на борту воздушных судов, то в связи с малой шириной луча источника помех и высоким уровнем атмосферного ослабления на наклонной трассе помехи могут возникнуть лишь в том случае, если самолет летит непосредственно над радиотелескопом. Однократное прохождение сигналов от передатчика на частоте 275 ГГц и на высоте 7000 м или более над обсерваторией не приведет к превышению уровня помех, указанного в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Отклонение курса самолета более чем на $\sim 1/5$ км может привести к фактическому отсутствию наблюдаемых помех.

Что касается помех, создаваемых спутниками, то совокупность конкурирующих факторов, включающих размер проекции луча, относительную скорость и потери в свободном пространстве, создает относительно постоянный защитный запас над экстраполированными пороговыми уровнями помех, указанными в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Если предположить, что нет дополнительных помех, связанных с затуханием в атмосфере, и что спутник проходит непосредственно над телескопом, средний уровень сигнала за время интеграции 2000 с оказывается ниже порогового уровня помех на 18 дБ или более. Предполагается, что даже сигналы, передаваемые геостационарными спутниками, не обладают уровнем, достаточным для возникновения помех.

3.3 Полосы для наблюдения спектральных линий

Наблюдения спектральных линий должны осуществляться на конкретных частотах, задаваемых спектром излучения интересующих атомов или молекул. Линии, которые представляют наибольшую

важность для астрофизики на частотах ниже 1000 ГГц, перечислены в Таблицах 3.2 и 3.3 (см. также Таблицы 1 и 2 в Рекомендации МСЭ-R RA.314). Помимо этого, Рекомендация МСЭ-R RA.1860 "Предпочтительные полосы частот для радиоастрономических измерений в диапазоне 1–3 ТГц" содержит весьма длинный перечень спектральных линий, наиболее важных с точки зрения астрофизики, в диапазоне от 1000 до 3000 ГГц. Они основаны на рекомендации Международного астрономического союза (МАС) и выбраны из тысячи линий, которые были обнаружены или предсказаны в микроволновом спектре⁹. Перечень наиболее важных линий периодически обновляется МАС, и изменения вносятся в журнал IAU Proceedings, а также в Рекомендации МСЭ-R RA.314 и RA.1860.

Значения ширины полосы, требуемые для наблюдения указанных в Таблицах 3.2 и 3.3 линий, определяются доплеровскими сдвигами частоты относительно собственных частот линий, вызванными радиальной скоростью излучающей области относительно наблюдателя на Земле. Для большинства молекул диапазон скоростей составляет ± 300 км/с, учитывающий диапазон радиальных скоростей спектральных линий, возникающих в нашей Галактике. Это соответствует доплеровскому сдвигу в $\pm 0,1\%$ от собственной частоты. Однако наблюдается все большее число спектральных линий в составе излучений из других галактик, и предложенные минимальные полосы для некоторых линий в таблицах были расширены в сторону низких частот, чтобы учесть более высокие скорости удаления этих галактик. Многие из линий уже были обнаружены во внешних галактиках. В таких случаях предлагаемые минимальные полосы придется соответствующим образом изменить в будущих пересмотрах перечней.

Многие перечисленные в Таблице 3.2 линии признаны в Таблице распределения частот РР представляющими интерес для РАС. В некоторых случаях принятая ширина полосы по крайней мере не меньше указанной в Таблице 3.2, но статус распределения ниже первичного и предоставлена недостаточная защита. В особенности это справедливо для более длинных волн, так как апертура приема по боковым лепесткам изотропной антенны $\lambda^2/4\pi$ возрастает с 10 мм^2 на частоте 30 ГГц до 10^5 м^2 на частоте 300 МГц. Для некоторых спектральных линий, наблюдаемых в излучении от далеких галактик, например ОН (1612, 1720 МГц), СН (3263, 3335 и 3349 МГц), H_2CO (4830 МГц) и H_2O (22,235 ГГц), распределенные значения ширины полосы недостаточны. Большинство из обнаруженных тысяч спектральных линий, не включенных в Таблицу 3.2, вообще не имеют защиты. С увеличением использования спектра активными службами наблюдение многих из этих линий может стать практически невозможным. Это, в частности, относится к линиям в полосах (или вблизи них), распределенных для служб с передачами со спутников.

⁹ Splatalogue – база данных астрономической спектроскопии <http://splatalogue.net/>; Кёльнская база данных молекулярной спектроскопии <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/>; Рекомендуемые институтом NIST собственные частоты для наблюдаемых межзвездных молекулярных микроволновых переходов <http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl>.

ТАБЛИЦА 3.2
**Наиболее важные для радиоастрономии радиочастотные линии
на частотах ниже 275 ГГц**

Вещество	Собственная частота	Предлагаемая минимальная полоса	Примечания ⁽¹⁾
Дейтерий (DI)	327,384 МГц	327,0–327,7 МГц	
Водород (HI)	1 420,406 МГц	1 370,0–1 427,0 МГц	(2), (3)
Гидроксильная группа (OH)	1 612,231 МГц	1 606,8–1 613,8 МГц	(4)
Гидроксильная группа (OH)	1 665,402 МГц	1 659,8–1 667,1 МГц	(4)
Гидроксильная группа (OH)	1 667,359 МГц	1 661,8–1 669,0 МГц	(4)
Гидроксильная группа (OH)	1 720,530 МГц	1 714,8–1 722,2 МГц	(3), (4)
Метиладин (CH)	3 263,794 МГц	3 252,9–3 267,1 МГц	(3), (4)
Метиладин (CH)	3 335,481 МГц	3 324,4–3 338,8 МГц	(3), (4)
Метиладин (CH)	3 349,193 МГц	3 338,0–3 352,5 МГц	(3), (4)
Формальдегид (H ₂ CO)	4 829,660 МГц	4 813,6–4 834,5 МГц	(3), (4)
Метанол (CH ₃ OH)	6 668,518 МГц	6 661,8–6 675,2 МГц	(3)
Гелий (³ He ⁺)	8 665,650 МГц	8 657,0–8 674,3 МГц	(3), (6)
Метанол (CH ₃ OH)	12,178 ГГц	12,17–12,19 ГГц	(3), (6)
Формальдегид (H ₂ CO)	14,488 ГГц	14,44–14,50 ГГц	(3), (4)
Циклопропенилиден (C ₃ H ₂)	18,343 ГГц	18,28–18,36 ГГц	(3), (4), (6)
Пары воды (H ₂ O)	22,235 ГГц	22,16–22,26 ГГц	(3), (4)
Аммиак (NH ₃)	23,694 ГГц	23,61–23,71 ГГц	(4)
Аммиак (NH ₃)	23,723 ГГц	23,64–23,74 ГГц	(4)
Аммиак (NH ₃)	23,870 ГГц	23,79–23,89 ГГц	(4)
Монооксид серы (SO)	30,002 ГГц	29,97–30,03 ГГц	(6)
Метанол (CH ₃ OH)	36,169 ГГц	36,13–36,21 ГГц	(6)
Монооксид кремния (SiO)	42,519 ГГц	42,47–42,57 ГГц	(3)
Монооксид кремния (SiO)	42,821 ГГц	42,77–42,86 ГГц	
Монооксид кремния (SiO)	43,122 ГГц	43,07–43,17 ГГц	
Монооксид кремния (SiO)	43,424 ГГц	43,37–43,47 ГГц	
Дикарбонмоносульфид (CCS)	45,379 ГГц	45,33–45,44 ГГц	(6)
Моносульфид углерода (CS)	48,991 ГГц	48,94–49,04 ГГц	
Кислород (O ₂)	61,1 ГГц	56,31–63,06 ГГц	(5), (6), (7)

ТАБЛИЦА 3.2 (окончание)

Вещество	Собственная частота	Предлагаемая минимальная полоса	Примечания ⁽¹⁾
Дейтерированная вода (HDO)	80,578 ГГц	80,50–80,66 ГГц	
Циклопропенилиден (C ₃ H ₂)	85,339 ГГц	85,05–85,42 ГГц	
Монооксид кремния (SiO)	86,243 ГГц	86,16–86,33 ГГц	
Формилий (H ¹³ CO ⁺)	86,754 ГГц	86,66–86,84 ГГц	
Монооксид кремния (SiO)	86,847 ГГц	86,76–86,93 ГГц	
Этинильная группа (C ₂ H)	87,3 ГГц	87,21–87,39 ГГц	(5)
Цианистый водород (HCN)	88,632 ГГц	88,34–88,72 ГГц	(4)
Формилий (HCO ⁺)	89,189 ГГц	88,89–89,28 ГГц	(4)
Изоцианид водорода (HNC)	90,664 ГГц	90,57–90,76 ГГц	
Диазенилий (N ₂ H ⁺)	93,174 ГГц	93,07–93,27 ГГц	
Моносulfид углерода (CS)	97,981 ГГц	97,65–98,08 ГГц	(4)
Монооксид серы (SO)	99,300 ГГц	99,98–100,18 ГГц	
Метилацетилен (CH ₃ C ₂ H)	102,5 ГГц	102,39–102,60 ГГц	(5)
Метанол (CH ₃ OH)	107,014 ГГц	106,91–107,12 ГГц	
Монооксид углерода (C ¹⁸ O)	109,782 ГГц	109,67–109,89 ГГц	
Монооксид углерода (¹³ CO)	110,201 ГГц	109,83–110,31 ГГц	(4)
Монооксид углерода (C ¹⁷ O)	112,359 ГГц	112,25–112,47 ГГц	(6)
Цианогруппа (CN)	113,5 ГГц	113,39–113,61 ГГц	(5)
Монооксид углерода (CO)	115,271 ГГц	114,88–115,39 ГГц	(4)
Кислород (O ₂)	118,750 ГГц	118,63–118,87 ГГц	(7)
Формальдегид (H ₂ ¹³ CO)	137,450 ГГц	137,31–137,59 ГГц	(6)
Формальдегид (H ₂ CO)	140,840 ГГц	140,69–140,98 ГГц	
Моносulfид углерода (CS)	146,969 ГГц	146,82–147,12 ГГц	
Оксид азота (NO)	150,4 ГГц	149,95–150,85 ГГц	(5)
Метанол (CH ₃ OH)	156,602 ГГц	156,45–156,76 ГГц	
Пары воды (H ₂ O)	183,310 ГГц	183,12–183,50 ГГц	
Монооксид углерода (C ¹⁸ O)	219,560 ГГц	219,34–219,78 ГГц	
Монооксид углерода (¹³ CO)	220,399 ГГц	219,67–220,62 ГГц	(4)
Цианогруппа (CN)	226,6 ГГц	226,37–226,83 ГГц	(5)
Цианогруппа (CN)	226,8 ГГц	226,57–227,03 ГГц	(5)
Монооксид углерода (CO)	230,538 ГГц	229,77–230,77 ГГц	(4)
Моносulfид углерода (CS)	244,953 ГГц	244,72–245,20 ГГц	(6)
Оксид азота (NO)	250,6 ГГц	250,35–250,85 ГГц	(5)
Этинильная группа (C ₂ H)	262,0 ГГц	261,74–262,26 ГГц	(5)
Цианистый водород (HCN)	265,886 ГГц	265,62–266,15 ГГц	
Формилий (HCO ⁺)	267,557 ГГц	267,29–267,83 ГГц	
Изоцианид водорода (HNC)	271,981 ГГц	271,71–272,25 ГГц	

(1) Если не указано примечание ⁽²⁾ или ⁽⁴⁾, то пределы полосы соответствуют частотам с доплеровским сдвигом, отвечающим радиальным скоростям ±300 км/с (соответствует линиям излучения в нашей Галактике).

(2) Требуется расширение в сторону низких частот выделенной полосы 1400–1427 МГц для больших доплеровских сдвигов для HI, наблюдаемых в удаленных галактиках.

(3) Текущее международное распределение не является первичным и/или не соответствует требованиям к ширине полосы, более подробно см. РР.

(4) Поскольку частоты этих линий используются также для наблюдения других галактик, перечисленные значения ширины полос включают доплеровские сдвиги, отвечающие радиальным скоростям до 1000 км/с. Необходимо отметить, что HI наблюдают на частотах с красным смещением к 500 МГц, а некоторые линии наиболее широко распространенных молекул обнаружены в галактиках со скоростями до 50 000 км/с, что отвечает снижению частоты до 17%.

(5) Имеется несколько близко расположенных линий, связанных с этими молекулами. Приведенные полосы достаточно широки для наблюдения всех линий.

(6) Частота этой линии не попадает ни в одну полосу, распределенную для радиоастрономии, и не отмечена как используемая радиоастрономией в Статье 5 РР.

(7) Эти линии можно наблюдать только за пределами атмосферы Земли.

ТАБЛИЦА 3.3
**Наиболее важные для радиоастрономии
 радиочастотные линии на частотах между 275 и 1000 ГГц**

Вещество	Собственная частота (ГГц)	Предлагаемая минимальная полоса (ГГц)	Примечания ⁽¹⁾
Диазенилий (N ₂ H ⁺)	279,511	279,23–279,79	
Моносульфид углерода (CS)	293,912	292,93–294,21	
Гидроний (H ₃ O ⁺)	307,192	306,88–307,50	
Дейтерированная вода (HDO)	313,750	313,44–314,06	
Монооксид углерода (C ¹⁸ O)	329,330	329,00–329,66	
Монооксид углерода (¹³ CO)	330,587	330,25–330,92	
Моносульфид углерода (CS)	342,883	342,54–343,23	
Монооксид углерода (CO)	345,796	345,45–346,14	
Цианистый водород (HCN)	354,484	354,13–354,84	
Формилий (HCO ⁺)	356,734	356,37–357,09	
Кислород (O ₂)	368,498	368,13–368,87	
Диазенилий (N ₂ H ⁺)	372,672	372,30–373,05	(2)
Пары воды (H ₂ O)	380,197	379,81–380,58	(2)
Гидроний (H ₃ O ⁺)	388,459	388,07–388,85	
Моносульфид углерода (CS)	391,847	390,54–392,24	
Кислород (O ₂)	424,763	424,34–425,19	
Монооксид углерода (C ¹⁸ O)	439,088	438,64–439,53	
Монооксид углерода (¹³ CO)	440,765	440,32–441,21	
Монооксид углерода (CO)	461,041	460,57–461,51	
Дейтерированная вода (HDO)	464,925	464,46–465,39	
Углерод (C I)	492,162	491,66–492,66	
Дейтерированная вода (HDO)	509,292	508,78–509,80	
Цианистый водород (HCN)	531,716	529,94–532,25	(2)
Моносульфид углерода (CS)	538,689	536,89–539,23	(2)
Пары воды (H ₂ ¹⁸ O)	547,676	547,13–548,22	(2)
Монооксид углерода (¹³ CO)	550,926	549,09–551,48	(2)
Пары воды (H ₂ O)	556,936	556,37–557,50	(2)
Аммиак (¹⁵ NH ₃)	572,113	571,54–572,69	(2)
Аммиак (NH ₃)	572,498	571,92–573,07	(2)
Монооксид углерода (CO)	576,268	574,35–576,84	(2)
Моносульфид углерода (CS)	587,616	587,03–588,20	(2)
Дейтерированная вода (HDO)	599,927	599,33–600,53	(2)
Пары воды (H ₂ O)	620,700	620,08–621,32	(2)
Хлористый водород (HCl)	625,040	624,27–625,67	
Хлористый водород (HCl)	625,980	625,35–626,61	
Моносульфид углерода (CS)	636,532	634,41–637,17	
Монооксид углерода (¹³ CO)	661,067	658,86–661,73	
Монооксид углерода (CO)	691,473	690,78–692,17	
Кислород (O ₂)	715,393	714,68–716,11	(2)
Моносульфид углерода (CS)	734,324	733,59–735,06	(2)
Пары воды (H ₂ O)	752,033	751,28–752,79	(2)
Кислород (O ₂)	773,840	773,07–884,61	(2)
Цианистый водород (HCN)	797,433	796,64–798,23	
Формилий (HCO ⁺)	802,653	801,85–803,85	
Монооксид углерода (CO)	806,652	805,85–807,46	
Углерод (C I)	809,350	808,54–810,16	
Моносульфид углерода (CS)	832,057	829,28–832,89	
Кислород (O ₂)	834,146	833,31–834,98	
Моносульфид углерода (CS)	880,899	877,96–881,78	
Пары воды (H ₂ O)	916,172	915,26–917,09	(2)
Монооксид углерода (CO)	921,800	918,72–922,72	(2)
Моносульфид углерода (CS)	929,723	926,62–930,65	
Пары воды (H ₂ O)	970,315	969,34–971,29	(2)
Моносульфид углерода (CS)	978,529	977,55–979,51	(2)
Пары воды (H ₂ O)	987,927	986,94–988,92	(2)

(1) Пределы полосы соответствуют частотам с доплеровским сдвигом, отвечающим радиальным скоростям ±300 км/с (соответствует линиям излучения в нашей Галактике).

(2) Эти линии можно наблюдать только за пределами атмосферы Земли.

ГЛАВА 4

Чувствительность радиоастрономических наблюдений к помехам

4.1 Введение

Измеряемое в радиоастрономии излучение почти всегда имеет гауссово распределение вероятностей для амплитуды. За исключением случаев излучений узкополосных спектральных линий, оно имеет такие же статистические характеристики, что и излучение теплового шума Земли и ее атмосферы или шума самого приемника. Более того, космическое радиоизлучение очень слабое. В радиоастрономических наблюдениях отношение сигнала к шуму (S/N) в РЧ- и ПЧ-каскадах приемника обычно находится в пределах от -20 до -60 дБ, т. е. вклад мощности от исследуемого источника в 10^{-2} – 10^{-6} раз меньше, чем нежелательная шумовая мощность атмосферы, Земли и цепей приемника. В большинстве систем связи соответствующее отношение S/N имеет порядок единицы и более. Поскольку радиоастрономические сигналы такие слабые по сравнению с сигналами других служб, радиоастрономические наблюдения очень чувствительны к радиопомехам, и, исключая пульсары, космические сигналы обычно не имеют характерной модуляции, которая помогла бы выделить их на фоне шума или отделить от разнообразных мешающих сигналов.

Причина того, что наблюдения со столь низким отношением S/N позволяют получить полезные результаты измерений, заключается в том, что если в других радиослужбах информация обычно содержится в изменении свойств передаваемого сигнала (т. е. в модуляции), то в радиоастрономических измерениях обычно наблюдают средние характеристики сигнала. Когда в ПЧ-каскадах приемника с помощью детектора измеряют общую мощность шума и выход детектора усредняется за много секунд, а иногда и за много часов, это приводит к существенному снижению статистических флуктуаций измеряемых величин. В настоящее время можно определить частичные изменения общего уровня помех, которые составляют величину порядка 10^{-8} от среднего уровня. Для этого необходимо провести усреднение по меньшей мере 10^{16} независимых выборок. Примером высокой чувствительности радиоастрономических наблюдений может служить угловая структура космического фонового излучения, нанесенная на карту при помощи спутника "PLANCK" [Planck Collaboration *et al.*, 2011], который в настоящее время работает в точке Лагранжа L_2 Солнце-Земля, отмеченной в Рекомендации МСЭ-R RA.1417. Были измерены колебания фоновой температуры $2,8$ К, составляющие величину порядка 10^{-6} , что на 75 дБ и более ниже шумовой температуры системы в приемниках на спутнике. Высокая чувствительность таких наблюдений достигается за счет потери информации о краткосрочных изменениях любых характеристик сигнала, которые теряются при усреднении, необходимом для снижения флуктуаций шума. За открытие этих флуктуаций [Smoother *et al.*, 1992], которые указывают на зарождение крупномасштабной структуры в сегодняшней Вселенной, в 2006 году была присуждена Нобелевская премия по физике. Это четвертый случай присуждения такой премии за исследования в области радиоастрономии.

В качестве исторической ссылки описываемый в этой главе метод анализа пороговых уровней помех был впервые приведен в приложении к Отчету 224-1 бывшего МККР [Oslo, 1966]. Пороговые уровни помех, приведенные в этом Отчете, после последующих пересмотров и дополнений послужили основой для координации частот в радиоастрономии и были включены в Приложение 1 к Рекомендации МСЭ-R RA.769, а также в Таблицы 4.1 и 4.2 в этой главе.

4.2 Основные соображения, касающиеся уровня помех

4.2.1 Критерий определения уровня вредных помех

На практике повышенный уровень мощности на выходе приемника за счет присутствия мешающего сигнала недостаточно постоянен, чтобы его можно было калибровать и вычестить из измеряемой мощности. В дополнение к изменениям за счет модуляции передачи, мешающие сигналы, распространяющиеся на большие расстояния, имеют большие флуктуации амплитуды, возникающие за счет изменений в атмосфере и других факторов, которые влияют на потери при прохождении трассы.

Сигналы от подвижных станций на перемещающихся транспортных средствах меняются с изменением трассы между передатчиком и радиотелескопом. Даже если величина мешающей п.п.м. постоянна, принимаемый уровень мощности меняется, если используется слежение радиотелескопа за источником, при котором изменяются уровни боковых лепестков в направлении передатчика. При низких уровнях помехи приводят к добавлению флуктуаций, которые обычно не удается отделить от флуктуаций, обусловленных шумом системы, а в некоторых случаях и от астрономического сигнала. Однако, в общем случае, флуктуации на выходе приемника за счет помех не усредняются с увеличением времени интеграции таким же образом, как чисто случайный шум.

Критерием для определения интенсивности, при которой мешающий сигнал считается неприемлемым (вредным), служит уровень нежелательного излучения, который приводит к увеличению на 10% ошибок измерения в сравнении с ошибками только за счет шума системы. Обычно при расчете помех предполагают, что этот уровень помех совпадает с уровнем, который вызывает увеличение на 10% среднеквадратичных флуктуаций на выходе приемника, обусловленных шумами системы. Рассмотрим типичное измерение, при котором измеряют принятую от радиоисточника мощность, определяя разность между сигналами на выходе приемника сначала при антенне, направленной на источник, а затем при отстройке от этого положения, чтобы измерить уровень фона от небосвода. Предположим, что помехи имеют место при измерении радиоисточника, но отсутствуют при сравнительных измерениях фонового уровня, или наоборот, как это бывает в случае прерывистого сигнала связи. Тогда если помехи на выходе приемника составляют 10% от среднеквадратичного уровня шума, то общая ошибка измерения мощности от источника увеличивается на величину до 10%. Можно зрительно представить себе такой эффект с помощью увеличения на 10% длины "усов" (т. е. величины ошибки) при измерении мощности источника, которые можно нанести на график в зависимости от каких-то других астрономических параметров. Отметим также, что в отсутствие помех увеличение на 10% среднеквадратичной неопределенности измерения соответствует потерям 20% времени наблюдения. В таких условиях измерения все еще, вероятно, дают полезные результаты, но получаемые данные существенно менее достоверны.

4.2.2 Характеристики направленности антенны

Радиоастрономические наблюдения обычно проводят с помощью больших антенн с высоким усилением или антенных комплексов, чтобы обеспечить требуемую чувствительность и угловое разрешение на небосводе. Радиотелескопы могут состоять из крупных одиночных антенн или комплексов из множества антенн. При типичной ширине диаграммы направленности от нескольких дуговых секунд до нескольких градусов вероятность попадания источника помех в основной лепесток обычно достаточно мала, и поэтому должны учитываться только помехи, попадающие через боковые лепестки. Рекомендуемая модель боковых лепестков больших параболических антенн приведена в Рекомендации МСЭ-R SA.509 (серия "Космические применения и метеорология"), которая основана на эмпирических данных для ряда больших антенн с диаметром более 100 длин волн на частотах между 2 и 30 ГГц и значениях угла φ от оси главного лепестка более чем 1° . Коэффициент усиления антенны в области боковых лепестков меняется по угловой шкале на величину порядка λ/D , где λ – длина волны, а D – ширина апертуры антенны. Огибающая коэффициента усиления (G) для боковых лепестков описывается следующей моделью:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad 1^\circ < \varphi < 47,8^\circ; \quad (4.1)$$

$$G = -10 \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad 47,8^\circ < \varphi < 180^\circ.$$

Влияние мешающего сигнала четко зависит от угла падения относительно оси главного лепестка (пеленга) антенны, поскольку, как показывает модель, усиление бокового лепестка меняется от +32 до -10 дБ в зависимости от этого угла. Однако в п. 4.3 целесообразно рассчитывать пороговые уровни вредных помех для конкретного уровня бокового лепестка, и для этого используют 0 дБи. Для модели бокового лепестка в уравнении (4.1) значение 0 дБи, т. е. усиление, равное усилению изотропного излучателя, получается при угле $19,1^\circ$ от главного лепестка. Следует отметить, что расчет проводится для порогового уровня п.п.м. или спектральной п.п.м. при приеме с коэффициентом усиления бокового лепестка 0 дБи, и поэтому порог помех в приемнике для радиоастрономии будет превышен, если

помехи будут попадать через боковые лепестки с усилением больше 0 дБи, т. е. для значений φ менее чем $19,1^\circ$. Итак, если сигнал порогового уровня падает в направлении, которое лежит в конусе с половиной угла при вершине, равном $19,1^\circ$, с центром на оси главного лепестка, то принятая мощность превысит критерий вредных помех. Телесный угол этого конуса в радианах Σ равен $2\pi(1 - \cos \varphi)$. Грубой оценкой вероятности приема помех в конусе с углом $19,1^\circ$ служит величина Σ , деленная на $2B$ стерадиан над горизонтом, с которого могут быть получены мешающие сигналы. Для $\varphi = 19,1^\circ$ получаем $\Sigma/2B = 5,5\%$. Для более современных конструкций антенн предложена модель бокового лепестка по формуле $29 - 25 \log \varphi$ (см., например, Рекомендацию МСЭ-R S.580). Для этой модели значение φ для 0 дБи равно $14,5^\circ$, а соответствующее значение $\Sigma/2B$ равно $3,2\%$. В другой модели бокового лепестка (см. Рекомендацию МСЭ-R S.1428) используют формулу $34 - 30 \log \varphi$, согласно которой угол для 0 дБи равен $13,6^\circ$, а соответствующее значение $\Sigma/2B$ равно $2,8\%$. Верхний предел суммарного процента времени, в течение которого допустимы помехи выше вредного порогового уровня, приведен в Рекомендации МСЭ-R RA.1513 и равен 5% , из которых не более 2% могут поступать из любой одной сети (см. п. 4.2.4.). Указанные выше три значения $\Sigma/2B$ ($5,5$; $3,2$ и $2,8\%$) достаточно хорошо согласуются с данными цифрами, и это служит основанием для выбора уровня в 0 дБи для бокового лепестка в качестве подходящего варианта при расчете п.п.м. и спектральной п.п.м., соответствующей порогу вредных помех.

В конкретных случаях спутников НГСО возникает динамическая ситуация, т. е. позиции спутников относительно диаграммы направленности радиоастрономической антенны сильно меняются со временем в масштабе шкалы времени интеграции в 2000 с. Для анализа помех в этом случае требуется интеграция отклика при переменных уровнях боковых лепестков, например с использованием концепции эквивалентной плотности потока мощности (э.п.п.м.), определяемой в п. 22.5С РР. Кроме того, обычно приходится объединять составляющие помех, создаваемых радиотелескопу от нескольких спутников в пределах той или иной конкретной системы. При таких расчетах предполагают, что пока не будет создана специальная модель для радиоастрономических антенн, можно использовать при предоставлении такой антенны характеристики направленности для антенн диаметром более 100λ по Рекомендации МСЭ-R S.1428 (см. Приложение 1 к этой главе).

Описанные выше модели боковых лепестков пригодны для симметричных параболоидов, к недостаткам которых относится рассеяние излучения конструкцией опоры фокальной плоскости. Уровни боковых лепестков отражателей со смещенными облучателями и незатененной апертурой обычно на $10-15$ дБ ниже тех, которые даются моделью. Для радиоастрономии разработано лишь несколько антенн, имеющих конструкцию со смещенными облучателями. Для больших антенн симметричная конструкция оказывается более экономичной, а также может быть предпочтительней для измерений поляризации.

4.2.3 Время усреднения (время интеграции)

Операцию усреднения по времени, которая снижает флуктуации шума, обычно выполняют в два и более этапов. Обычно данные усредняются за время от нескольких десятков миллисекунд до нескольких десятков секунд и затем записывают в цифровой форме. Этот первый шаг уменьшает объем данных, но позволяет позже без существенной потери данных удалить нерегулярности типа коротких выбросов сильных помех. Последующее усреднение часто проводят в автономном режиме во время дальнейшего сокращения данных. Например, наблюдения могут состоять из многократных измерений двух и более разных точек на небосводе для сравнения уровня мощности, принимаемого от радиисточника (вместе с фоновым излучением небосвода), с уровнем мощности в исходном положении для фона. Для каждого положения требуется отдельное усреднение. Сюда можно включать данные для разных сеансов наблюдения, и общее время усреднения может увеличиваться до десятков или сотен часов [Owen and Morrison, 2008; Walter *et al.*, 2012]. Зачастую предел задается временем, доступным на большом радиотелескопе. Столь продолжительное усреднение необходимо при поиске исключительно слабых сигналов. При этом усреднение множества отдельных записей спектра для одной точки небосвода является нормальной практикой. Как правило, при исследовании порогов помех в качестве характерного времени усреднения используют интервал в 2000 с. Часто используют и большее время усреднения. Интервал 360 000 с (100 ч) может считаться типичным для наземных наблюдений, где требуется особо высокая чувствительность. Поскольку чувствительность наблюдения меняется как корень квадратный из времени наблюдения, то различие между 2000 с и 360 000 с

соответствует разнице в чувствительности в 11,3 дБи для астрономического сигнала и для помех. Проводятся также некоторые наблюдения меняющихся со временем явлений, например наблюдения звездных и солнечных вспышек, а также межпланетных мерцаний, для которых требуются намного более короткие периоды времени.

4.2.4 Процент времени потерь на помехи

Во многих случаях помехи имеют случайный характер, например от сигналов подвижной связи, или сильно меняются по интенсивности со временем в зависимости от условий распространения. При определении, вредны ли такие сигналы для наблюдений в радиоастрономии, необходимо указать максимальный процент времени, в течение которого допустимы вредные помехи. Для большинства служб такой процент времени приведен в различных рекомендациях, и он обычно меняется от 0,01% для связи, от которой зависит безопасность человеческой жизни, до нескольких процентов для служб со сбором данных, который можно повторять. Для радиоастрономии суммарные потери в 5% от всех источников являются максимальной допустимой величиной. Поскольку в радиоастрономических наблюдениях часто приходится сталкиваться с помехами от нескольких источников в соседних полосах частот, максимальная допустимая потеря времени для каждой отдельной службы составляет 2%. Эти цифры приведены в Рекомендации МСЭ-R RA.1513. Они требуются для проведения расчета по методу Монте-Карло при определении необходимых ограничений для источников случайных помех (см. п. 4.8).

4.3 Чувствительность радиоастрономических систем и пороговые значения вредных помех

4.3.1 Теоретические соображения

Мерой чувствительности наблюдений в радиоастрономии служит увеличение уровня мощности на входе приемника, которое вызывает изменение на выходе приемника, равное среднеквадратичным флуктуациям шума. Выход детектора приемника является функцией общей мощности на входе приемника. Общая входная мощность состоит из мощности полезного сигнала и мощности нежелательного шума (например, теплового шума и шума приемника). Оба вклада обусловлены случайными процессами и качественно их разделить невозможно. Однако оба имеют средний уровень мощности, и если эти уровни удастся установить с достаточной точностью, то можно определить наличие полезного сигнала. (Предполагается, что усиление и другие параметры приемной системы остаются постоянными за время наблюдения.) Статистическое среднее для стационарной случайной переменной типа мощности шума P , можно определить с точностью, которая обратно пропорциональна корню квадратному из количества независимых выборок N , и стандартное отклонение для этого среднего равно

$$\Delta P \approx \frac{P}{\sqrt{N}}. \quad (4.2)$$

Использованные выше параметры ΔP и P можно определить или в пересчете на мощность шума в полосе пропускания приемника или как спектральную плотность мощности (Вт/Гц). В приведенном ниже анализе они обозначают спектральную плотность мощности. Стандартное отклонение ΔP также является среднеквадратичным значением. С помощью наблюдения для достаточного количества выборок N можно провести с высокой точностью измерение мощности радиошума. При снижении флуктуаций ΔP до значения, меньшего мощности полезного сигнала, становится возможным обнаружение очень слабых сигналов. В полосе шириной Δf приемник может измерять приблизительно $2\Delta f$ независимых выборок в секунду, и с помощью увеличения времени усреднения t (которое также называют временем интеграции) можно получить очень большое значение N . Это можно представить в виде

$$N \approx 2\Delta f t, \quad (4.3)$$

и если это соотношение объединить с уравнением (4.2), то получим

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{K}{\sqrt{\Delta f t}}, \quad (4.4)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от конкретного оборудования и метода наблюдения [Kraus, 1966]. Для базовых систем общей мощности (т. е. измеряющих общую мощность шума, поступающую от антенны) $K = 1$, и для общности здесь будет использовано это значение. Следует отметить, что в тех случаях, когда время наблюдения поровну делится между источником и опорной точкой, как описано в п. 4.2.1, требуемое значение t равно половине общего времени наблюдения. Среднеквадратичная ошибка разности между измерениями источника и опорной точки также равна ошибке измерения источника, умноженной на $\sqrt{2}$.

Флуктуации шума для спектральной плотности мощности ΔP в уравнении для чувствительности (4.4) связаны с общей чувствительностью системы (флуктуациями шума), выраженной в виде температурных флуктуаций ΔT через постоянную Больцмана k :

$$\Delta P \approx k \Delta T, \quad (4.5)$$

и уравнение для чувствительности записывается следующим образом:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f t}}, \quad (4.6)$$

где:

$$T = T_A + T_R; \quad (4.7)$$

T – это температура системы, и она представляет собой сумму T_A (шумовой температуры антенны, которая обусловлена космическим излучением, излучением атмосферы Земли и излучением Земли), и T_R (шумовой температуры приемника).

4.3.2 Оценки чувствительности и уровней вредных помех

Уравнения (4.4) или (4.6) можно использовать для оценки чувствительности и уровней помех для радиоастрономических наблюдений. Результаты в предположении времени t наблюдения (или интеграции) в 2000 с, как описано в п. 4.2.3, приведены в Таблицах 4.1 и 4.2. Чувствительность, выраженная в единицах температуры или спектральной плотности мощности, представляет собой уровень на входе приемника, требуемый для увеличения выходного сигнала на величину, равную среднеквадратичным флуктуациям шума. В Таблице 4.1 (наблюдения непрерывного спектра) для частот ниже 71 ГГц значение Δf принято равным ширине распределенной радиоастрономической полосы. Выше этой частоты использовано значение 8 ГГц, которое характерно для ширины полосы, обычно используемой для наблюдений непрерывного спектра в этом диапазоне. В Таблице 4.2 (наблюдения спектральных линий) Δf представляет собой характерную для спектральной линии ширину полосы канала. Исползованные для Δf значения соответствуют скорости около 3 км/с, которая является промежуточной между значениями, обычными для спектральных линий источников в нашей Галактике и во внешних галактиках. Следует отметить, что пять последних строк в Таблицах 4.1 и 4.2 относятся к частотам в диапазоне выше 275 ГГц, в котором не выделено никаких полос в момент написания этой редакции Справочника. Эти частоты выбраны произвольным образом, и соответствующие пороги вредных помех предназначены только для предварительных оценок.

Уровни вредных помех, приведенные в Таблицах 4.1 и 4.2, выражены как уровни помех, которые вводят в ΔP (или ΔT) составляющую, равную 10% от среднеквадратичных флуктуаций за счет шума системы, т. е.

$$\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f. \quad (4.8)$$

В общем соответствующие столбцы в Таблицах 4.1 и 4.2 можно рассчитать следующими методами:

- ΔT с помощью уравнений (4.6) и (4.7);
- ΔP с помощью уравнения (4.5);
- ΔP_H с помощью уравнения (4.8).

Помехи можно также выразить в единицах падающей на антенну плотности потока мощности (п.п.м.) для всей ширины полосы или в виде спектральной п.п.м. S_H в расчете на 1 Гц ширины полосы¹⁰. Как описано в п. 4.2.2, эти значения приведены для антенны с усилением в направлении прихода помех, равным усилению изотропной антенны (которая имеет эффективную площадь $c^2/4\pi f^2$, где c – скорость света, а f – частота). Значения $S_H \Delta f$ (дБ(Вт/м²)) получены из ΔP_H (дБВт) путем добавления

$$20 \log f - 158,5 \quad \text{дБ}, \quad (4.9)$$

где f выражена в герцах. Значение S_H затем получают путем вычитания $10 \log \Delta f$ для учета ширины полосы. Можно также представить S_H одной следующей формулой:

$$S_H = \frac{0,4 \pi k (T_A + T_R) f^2}{c^2 \sqrt{\Delta f t}}. \quad (4.10)$$

На Рисунке 4.1 графически представлены уровни вредных помех для службы РАС, полученные из Таблиц 4.1 и 4.2, где величина S_H (дБ(Вт/(м²·Гц))) отложена на графике в зависимости от частоты. Кривая непрерывного спектра не получается сглаженной, поскольку разные полосы частот имеют различную распределенную для них ширину.

Чувствительность радиоастрономической приемной системы для широкополосного (непрерывного) излучения повышается с увеличением ширины полосы (уравнения (4.4) и (4.6)). Это обусловлено тем, что мощность шума растет при увеличении ширины полосы, но поскольку сигнал также является широкополосным шумом, то же самое происходит и с сигналом. Отношение мощности S/N в РЧ- или ПЧ-каскадах до детектора остается постоянным вне зависимости от ширины полосы. Однако с увеличением ширины полосы улучшается точность определения уровня мощности как корня квадратного из ширины полосы, и поэтому соответствующим образом повышается чувствительность.

В уравнениях (4.4) и (4.6) предполагается, что можно добиться любой желаемой чувствительности при достаточно больших значениях ширины полосы и/или времени наблюдения. Однако на практике иные факторы, кроме рассмотренных выше статистических факторов, накладывают ограничения на чувствительность радиоастрономических наблюдений. В качестве примера таких иных воздействий можно привести стабильность приемника и флуктуации затухания и фазовой траектории в атмосфере Земли. Для уровней чувствительности, приведенных в Таблицах 4.1 и 4.2, использованы значения

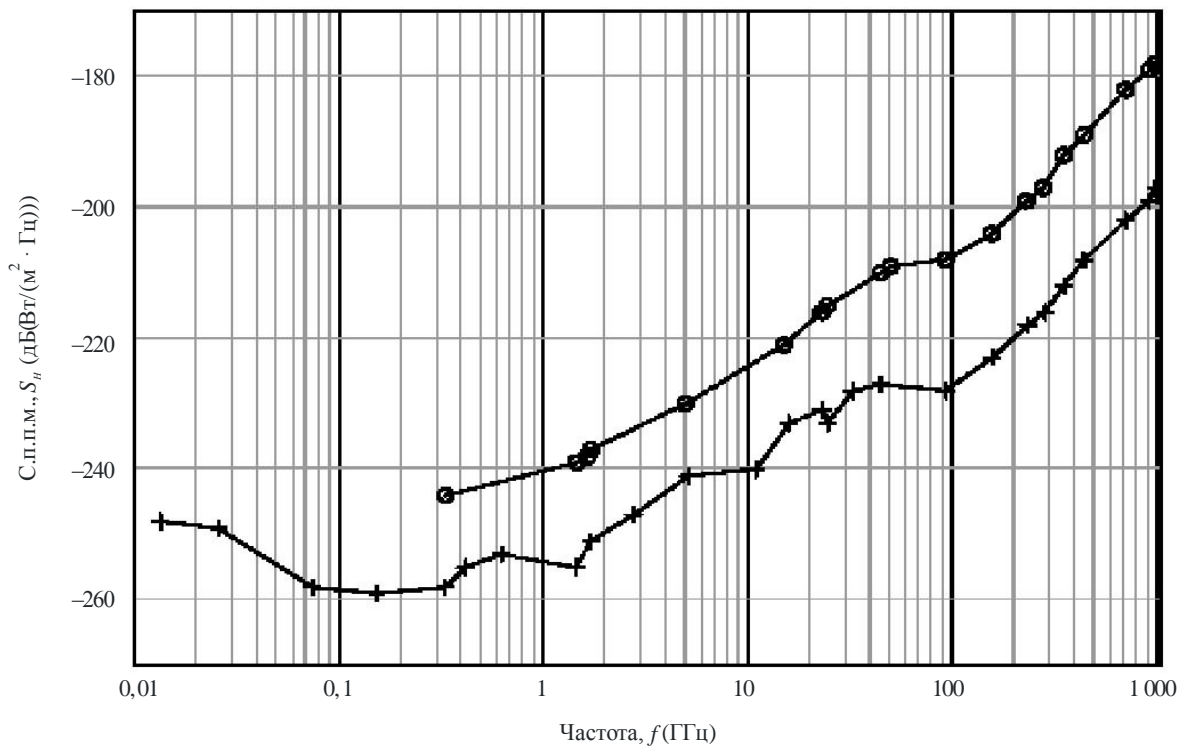
¹⁰ Здесь использована рекомендованная терминология Сектора радиосвязи (Рекомендация МСЭ-R V.574), по которой "плотность потока мощности" относится к параметрам в единицах Вт/м², а "спектральная плотность потока мощности" относится к параметрам типа S_H в единицах Вт/(м²·Гц). В радиоастрономии S_H называют "плотность потока" и выражают в единицах под названием "янский" (Ян):

1 Ян = 10⁻²⁶ Вт/(м² · Гц), т. е. –260 дБ(Вт/(м² · Гц)).

ширины полосы и времени интеграции, для которых указанные другие факторы обычно несущественны. Однако следует подчеркнуть, что эти уровни чувствительности не являются теоретическим пределом и они обычно превышаются в тех случаях, когда данные можно интегрировать в течение многих часов.

РИСУНОК 4.1

Рассчитанные в Таблицах 4.1 и 4.2 пороговые уровни помех в зависимости от частоты



Radio-Astro_41

На Рисунке 4.1 показаны пороговые значения спектральной плотности потока мощности для непрерывного спектра (крестики) и спектральной линии (кружки) из Таблиц 4.1 и 4.2, нанесенные на график в зависимости от частоты.

В Отчете МСЭ-R RA.2131 "Дополнительная информация о пороговых уровнях вредных помех, создаваемых радиоастрономическим наблюдениям, в Рекомендации МСЭ-R RA.769" приведены эквивалентные значения напряженности электрического поля, соответствующие записям в Таблицах с 4.1 по 4.3.

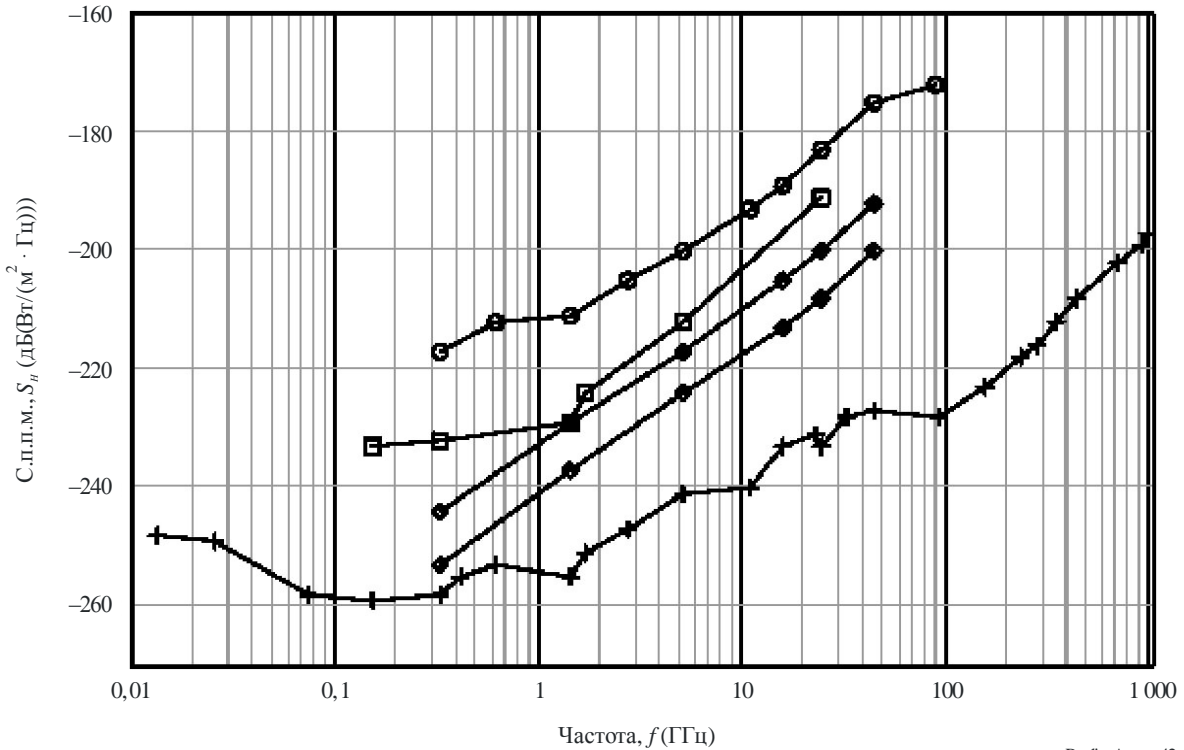
4.4 Отклик интерферометров и антенных комплексов на радиопомехи

Потребность в высоком угловом разрешении для радиоастрономических наблюдений привела к разработке интерферометров и антенных комплексов, которые играют все более важную роль в изучении источников с угловыми размерами в несколько дуговых минут и менее. Интерферометры обычно дают угловое разрешение в λ/L радиан, где λ – длина волны, а L – наибольшее расстояние между антеннами в проекции на плоскость, если смотреть от радиоисточника. Для таких инструментов два эффекта снижают отклик на помехи. Они связаны с частотой колебания биений интенсивности, возникающих при объединении выходов двух антенн, а также с тем, что компоненты мешающего сигнала, полученного разными и широко разнесенными антеннами, претерпевают разную относительную задержку по времени до их объединения. Анализ этих эффектов более сложен, чем в случае отдельных антенн, рассмотренном в п. 4.3. Эти эффекты обсуждаются в работах [Thompson, 1982; Thompson *et al.*, 1986 и 2001]. Вообще говоря, основной результат состоит в том, что эффективное время интеграции, в течение которого помехи влияют на измерение, снижается от общего времени наблюдения до среднего времени одного собственного колебания. Оно обычно меняется от нескольких секунд для компактной антенной решетки с $L \sim 1000 \lambda$ до времени менее миллисекунды для антенных

комплексов, расположенных на разных континентах, с $L \sim 10^7 \lambda$. И так, в сравнении с одиночной радиоастрономической антенной интерферометр обладает помехоустойчивостью, которая повышается по мере увеличения размеров антенного комплекса, выраженных в длинах волн.

РИСУНОК 4.2

Пороговые уровни вредных помех для наблюдений непрерывного спектра с использованием систем радиотелескопов нескольких типов



Radio-Astro_42

Расчетные пороговые уровни вредных помех для нескольких типовых антенных комплексов в режиме непрерывного спектра приведены на Рисунке 4.2. Ромбы обозначают VLA, нижняя кривая приведена для конфигурации *D* (наибольшее разнесение антенн 1 км), а верхняя кривая – для конфигурации *A* (наибольшее разнесение антенн 36 км). Квадраты обозначают антенный комплекс MERLIN, а белые кружки – VLBI (Таблица 4.3). Для VLA в Национальной радиоастрономической обсерватории в Нью-Мехико, Соединенные Штаты Америки, расстояния между антеннами составляют до 1 км в конфигурации *D* и до 36 км в конфигурации *A*. Для комплекса MERLIN радиоастрономических лабораторий Наффилда, Джодрелл Бэнк, Соединенное Королевство, эти расстояния доходят до 218 км. Результаты зависят от пространственного разнесения антенн, и поэтому для двух конфигураций VLA и для MERLIN получаются разные кривые. Эти результаты также основаны на предположении, что создающий помехи передатчик находится в стационарном положении относительно земли и что мощность сигнала помехи, принимаемого через боковые лепестки антенны, остается постоянной во все время наблюдения.

ТАБЛИЦА 4.1

Пороговые уровни вредных помех для радиоастрономических наблюдений непрерывного спектра

Центральная частота ⁽²⁾ , f (МГц)	Принятая ширина полос ⁽³⁾ , Δf (МГц)	Минимальная шумовая температура антенны, T_A (К)	Шумовая температура приемника, T_R (К)	Чувствительность системы (флуктуации шума)		Пороговые уровни помех ⁽¹⁾		
				Температура ΔT (мК)	Спектральная плотность мощности ΔP (дБ(Вт/Гц))	Входная мощность ΔP_H (дБВт)	п.л.м. $S_H \Delta f$ (дБ(Вт/м ²))	Спектральная п.л.м. S_H (дБ(Вт/(м ² · Гц)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13,385	0,05	50 000	60	5 000	-222	-185	-201	-248
25,610	0,12	15 000	60	972	-229	-188	-199	-249
73,8	1,6	750	60	14,3	-247	-195	-196	-258
151,525	2,95	150	60	2,73	-254	-199	-194	-259
325,3	6,6	40	60	0,87	-259	-201	-189	-258
408,05	3,9	25	60	0,96	-259	-203	-189	-255
611	6,0	20	60	0,73	-260	-202	-185	-253
1 413,5	27	12	10	0,095	-269	-205	-180	-255
1 665	10	12	10	0,16	-267	-207	-181	-251
2 695	10	12	10	0,16	-267	-207	-177	-247
4 995	10	12	10	0,16	-267	-207	-171	-241
10 650	100	12	10	0,049	-272	-202	-160	-240
15 375	50	15	15	0,095	-269	-202	-156	-233
22 355	290	35	30	0,085	-269	-195	-146	-231
23 800	400	15	30	0,050	-271	-195	-147	-233
31 550	500	18	65	0,083	-269	-192	-141	-228
43 000	1 000	25	65	0,064	-271	-191	-137	-227
89 000	8 000	12	30	0,011	-274	-189	-129	-228
150 000	8 000	14	30	0,011	-278	-189	-124	-223
224 000	8 000	20	43	0,016	-277	-188	-119	-218
270 000	8 000	25	50	0,019	-276	-187	-117	-216
335 000	8 000	55	64	0,030	-274	-185	-113	-212
420 000	8 000	95	80	0,044	-272	-183	-109	-208
670 000	8 000	185	130	0,079	-270	-181	-103	-202
875 000	8 000	175	170	0,086	-269	-180	-100	-199
940 000	8 000	235	180	0,104	-268	-179	-98	-197

⁽¹⁾ Принято время интеграции 2000 с при использовании времени интеграции 15 мин, 1, 2, 5 или 10 ч; приведенные значения в таблице следует скорректировать соответственно на +1,7; -1,3; -2,8; -4,8 или -6,3 дБ. Указанные уровни помех относятся к измерению с приемом одиночной антенной общей мощности. Для других типов измерений могут годиться менее жесткие уровни, как указано в п. 4.4. Для передатчиков на геостационарной орбите желательно скорректировать уровни на -15 дБ (т. е. уровни оказываются на 15 дБ ниже), как описано в п. 4.7.3.

⁽²⁾ Эта таблица не предназначена для указания полного списка радиоастрономических полос, а в ней приведены только характерные примеры в спектре. Расчет уровней помех основан на центральной частоте, приведенной в столбце (1), хотя не все районы имеют одинаковые распределения.

⁽³⁾ На частотах выше 71 ГГц в столбце (2) использовано значение 8 ГГц, которое характерно для ширины полосы, обычно используемой для наблюдений непрерывного спектра в этом диапазоне.

ТАБЛИЦА 4.2

Пороговые уровни вредных помех для радиоастрономических наблюдений спектральных линий

Центральная частота ⁽²⁾ , f (МГц)	Принятая ширина канала для спектральной линии, Δf (кГц)	Минимальная шумовая температура антенны, T_A (К)	Шумовая температура приемника, T_R (К)	Чувствительность системы (флуктуации шума)		Пороговые уровни помех ⁽¹⁾		
				Температура ΔT (мкК)	Спектральная плотность мощности ΔP (дБ(Вт/Гц))	Входная мощность ΔP_H (дВт)	папам. $S_H \Delta f$ (дБ(Вт/м ²))	Спектральная папам. S_H (дБ(Вт/м ² · Гц))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	60	22,3	-245	-215	-204	-244
1 420	20	12	10	3,48	-253	-220	-196	-239
1 612	20	12	10	3,48	-253	-220	-194	-238
1 665	20	12	10	3,48	-253	-220	-194	-237
4 830	50	12	10	2,20	-255	-218	-183	-230
14 500	150	15	15	1,73	-256	-214	-169	-221
22 200	250	35	30	2,91	-254	-210	-162	-216
23 700	250	35	30	2,91	-254	-210	-161	-215
43 000	500	25	65	2,84	-254	-207	-153	-210
48 000	500	30	65	3,00	-254	-207	-152	-209
88 600	1 000	12	30	0,94	-259	-209	-148	-208
150 000	1 000	14	30	0,98	-259	-209	-144	-204
220 000	1 000	20	43	1,41	-257	-207	-139	-199
265 000	1 000	25	50	1,68	-256	-206	-137	-197
335 000	1 000	55	64	2,66	-254	-204	-132	-192
420 000	1 000	95	80	3,91	-253	-203	-129	-189
670 000	1 000	185	130	7,04	-250	-200	-122	-182
875 000	1 000	175	170	7,71	-250	-200	-119	-179
940 000	1 000	235	180	9,28	-249	-199	-118	-178

(1) Принято время интеграции 2000 с при использовании времени интеграции 15 мин, 1, 2, 5 или 10 ч; приведенные значения в таблице следует скорректировать соответственно на +1,7; -1,3; -2,8; -4,8 или -6,3 дБ. Указанные уровни помех относятся к измерению с приемом одиночной антенной общей мощности. Для других типов измерений могут годиться менее жесткие уровни, как указано в п. 4.4. Для передатчиков на геостационарной орбите желательно скорректировать уровни на -15 дБ (т. е. уровни оказываются на 15 дБ ниже), как описано в п. 4.7.3.

(2) Эта таблица не рассчитана на указание полного списка радиоастрономических полос, а в ней приведены только характерные примеры в спектре.

Описание столбцов в Таблицах 4.1 и 4.2

Столбец

- (1) Центральная частота полосы частот, распределенной для радиоастрономии (Таблица 4.1), или номинальная частота спектральной линии (Таблица 4.2).
- (2) Принятая или распределенная ширина полосы (Таблица 4.1) или принятая типичная ширина канала, используемая для наблюдений спектральной линии (Таблица 4.2).
- (3) Минимальная шумовая температура антенны, в которую свой вклад внесли ионосфера, атмосфера Земли, излучение Земли, а также излучение галактики и космическое фоновое излучение.
- (4) Шумовая температура приемника, характерная для высокочувствительной системы. Для частот выше 1 ГГц эти значения относятся к криогенным приемникам.
- (5) Общая чувствительность системы в милликельвинах, рассчитанная по уравнению (4.6) с использованием сочетания шумовой температуры антенны и приемника, указанной ширины полосы и времени интеграции 2000 с.
- (6) Совпадает с приведенным выше в (5), но выражено в спектральной плотности мощности шума с помощью уравнения $\Delta P_s = k\Delta T$, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ (Дж/К) (постоянная Больцмана). Значения ΔP_s приведены в децибелах.
- (7) Уровень мощности на входе приемника, считающийся вредным для высокочувствительных наблюдений (ΔP_H). Данный критерий обсуждается п. 4.2.3, и в расчетах представлен как $\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$. Значения ΔP_H приведены в децибелах.
- (8) Плотность потока мощности п.п.м, требуемая для получения уровня мощности ΔP_H в системе приема с изотропной приемной антенной. Значения $S_H \Delta f$ приведены в децибелах.
- (9) Спектральная плотность потока мощности с.п.п.м., требуемая для получения уровня мощности ΔP_H в полосе приема (Таблица 4.1) или в канале спектральной линии (Таблица 4.2) с изотропной приемной антенной. Значения S_H приведены в децибелах. Для получения надлежащих уровней мощности в опорной полосе шириной 4 кГц или 1 МГц следует добавить соответственно 36 или 60 дБ.

В случае VLBI, когда антенны разнесены очень широко, что делает вероятность возникновения коррелированных помех очень низкой, приведенные выше соображения обычно не годятся. (Исключение может составлять спутник на геостационарной орбите, который одновременно виден с нескольких станций VLBI.) При этом порог помех определяется уровнем, при котором помехи начинают ухудшать измеренную корреляцию сигналов от двух антенн. В качестве такого порога можно использовать уровень помех, равный 1% мощности шума системы в приемнике [Thompson *et al.*, 1986 и 2001]. (Следует отметить, что этот уровень намного выше 10% от флуктуаций шума после детектирования и интеграции, как в критерии для общей мощности системы при использовании одиночной антенны.) Значения порога для VLBI, основанные на критерии 1% от мощности шума и выраженные через спектральную плотность потока мощности, равны $1,930 \cdot 10^{-23} (T_A + T_R) f^2$ и приведены в децибелах в Таблице 4.3, а также в виде графика на Рисунке 4.2. Используемые температурные значения системы совпадают с Таблицами 4.1 и 4.2, а также использован множитель 1,4, чтобы учесть возможности квантования при цифровой выборке, используемой для записи данных. Результаты не зависят от конкретного разнесения антенн. Во всех случаях предполагается, что мешающий сигнал принимается в боковых лепестках с усилением 0 дБи. Нижняя кривая показывает для сравнения значения для наблюдений общей мощности (одиночная антенна) из Таблицы 4.1.

ТАБЛИЦА 4.3

Пороговые уровни помех для наблюдений с помощью VLBI

Центральная частота (МГц)	Уровень вредных помех (дБ(Вт/(м ² · Гц)))
325,3	-217
611	-212
1 413,5	-211
2 695	-205
4 995	-200
8 400	-196
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
89 000	-172
150 000	-167
224 000	-162
270 000	-160

Для получения представления о чувствительности систем VLBI к помехам необходимо отметить, что Рисунок 4.1 дает пороговые уровни вредных помех для VLBI приблизительно на 40 дБ выше, чем для систем наблюдения общей мощности в непрерывном спектре на той же частоте. Область между кривой для VLBI и кривой общей мощности охватывает интервал пороговых уровней для всех типов радиотелескопов. Необходимо подчеркнуть, что применение интерферометров и антенных комплексов обычно пригодно для исследования дискретных источников высокой яркости с угловыми размерами не более нескольких дуговых минут для комплексов типа VLA или нескольких десятков дуговых секунд для VLBI. Поэтому результаты для общей мощности, приведенные в Таблицах 4.1 и 4.2, остаются действительными для решения общих проблем защиты радиоастрономии.

4.5 Пульсары

Характеристики пульсаров описываются в главе 2. Обычно при наблюдениях пульсаров используют систему приема спектральных линий, чтобы можно было совместить по времени сигналы в различных частотных каналах для устранения эффекта дисперсии частоты и затем соединить их. При поисках пульсаров данные записывают и затем проводят поиск, используя набор значений дисперсии и набор значений частоты повторения импульсов. Влияние дисперсионной поправки на возможную помеху приводит к стиранию всех резких изменений по времени, но это существенно не влияет на среднеквадратичный уровень помех. После определения дисперсии и частоты повторения импульсы можно совместить по времени и усреднить, чтобы исследовать форму импульса и повысить точность измерений по времени. При рассмотрении чувствительности к вредным помехам для таких наблюдений ширину полосы принимают равной полной полосе пропускания приемника, но эффективное время интеграции берут равным времени присутствия импульса. Таким образом, порог вредных помех оказывается равным значению для непрерывного спектра, деленному на корень квадратный из отрезка времени, в течение которого присутствует импульс. Этот отрезок времени равен продолжительности импульса, деленной на период повторения, и находится в диапазоне от нескольких процентов до нескольких десятков процентов. Таким образом, пороговые уровни вредных помех для наблюдения пульсаров на 2–10 дБ больше соответствующих значений для непрерывного спектра, приведенных в Таблице 4.1. Наблюдения пульсаров обычно проводят с помощью больших антенн, которые используют и для обычных наблюдений общей мощности, и поэтому не накладываются никаких специальных ограничений на общие требования к защите от помех.

4.6 Достиженные показатели чувствительности

Радиоастрономов больше всего интересует чувствительность в отношении излучения источников в пределах основного лепестка радиоастрономической антенны, а не в боковых лепестках, которые рассматривают в связи с помехами. Это верно для одиночной антенны, используемой при измерениях общей принимаемой мощности, а также для отдельных антенн в комплексе. Например, отдельная антенна диаметром 70 м, работающая на 5 ГГц, имеет эффективную площадь сбора приблизительно 2700 м² и усиление 70 дБ. Таким образом, чувствительность в основном лепестке, выраженная через плотность потока мощности, будет на 70 дБ больше, чем для излучения, попадающего в боковые лепестки изотропной антенны. В столбце (б) Таблицы 4.1 показано, что чувствительность на входе приемника для сигнала с интенсивностью, равной шуму системы, составляет 2×10^{-27} Вт/Гц (–267 дБ(Вт/Гц)), поскольку для площади сбора в 2700 м² соответствующий уровень спектральной плотности мощности равен

$$2 \times 2 \times 10^{-27}/2700 = 1,5 \times 10^{-30} \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц}); \quad (4.11)$$

$$= -298,2 \quad \text{дБВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц}), \quad (4.12)$$

где коэффициент 2 включен в числитель с левой стороны, поскольку каждый выход антенны соответствует половине мощности для случайно поляризованной радиоволны. Это пример очень высокой чувствительности, которая на несколько порядков больше величины, часто считающейся приемлемой для других служб радиосвязи.

В Таблице 4.4 приведены примеры высокочувствительных наблюдений непрерывного спектра и линий, которые опубликованы в работах по радиоастрономии. Для наблюдений с помощью одиночной антенны они сопоставляются с уровнями вредных помех, приведенными в Таблицах 4.1 и 4.2, а для антенных комплексов они сравниваются со значениями, приведенными на Рисунке 4.2, или с расчетными значениями. Астрономические измерения осуществляются на уровнях намного ниже уровней вредных помех, поскольку они проводятся в главном лепестке радиоастрономической антенны, а уровни вредных помех соответствуют приему в боковых лепестках, т. е. различия связаны с усилением антенны. Данные результаты показывают, что в радиоастрономических обсерваториях проводятся измерения с очень высокой чувствительностью, и это подтверждает пригодность параметров, приведенных в Таблицах 4.1 и 4.2, для современных систем.

ТАБЛИЦА 4.4

Сравнение результатов наблюдений с пороговыми уровнями помех

Частота (ГГц)	Тип антенны	Линия или непрерывный спектр	Наблюдаемая спектральная п.п.м. (дБ(Вт/(м ² · Гц)))	Предельный уровень вредных помех (дБ(Вт/(м ² · Гц))) ⁽¹⁾	Ссылки
1,4	Комплекс антенн	Непрерывный спектр	–309	–255	[Owen and Morrison, 2008]
5,0	Комплекс антенн	Непрерывный спектр	–308	–222	[Fomalont <i>et al.</i> , 1991]
1,42	Одиночное зеркало	Линия (HI)	–288	–239	[Lockman <i>et al.</i> , 2012]
37,3	Комплекс антенн	Линия (CO с красным смещение)	–295	–211	[Walter <i>et al.</i> , 2012]
93,2	Комплекс антенн	Линия (CO с красным смещение)	–289	–208	[Walter <i>et al.</i> , 2012]

⁽¹⁾ Из Таблиц 4.1 и 4.2, а также интерполировано на основе Рисунка 4.1.

Можно ожидать, что чувствительность радиоастрономических наблюдений как в отношении космических сигналов, так и помех будет продолжать расти по мере появления более чувствительного приемного оборудования. На частотах приблизительно до 100 МГц температура приемника не вносит большого вклада в температуру всей системы (см. Таблицу 4.1). На высокочастотном конце спектра наибольший эффект могут дать улучшения в технологии приемников. Однако наибольшего улучшения чувствительности, вероятно, можно достичь за счет разработки больших по размеру антенн и антенных комплексов, чем те, которые были доступны в прошлом.

4.7 Обсуждение вопросов, связанных с помехами

4.7.1 Уровни помех

Мешающие сигналы с уровнями мощности между установленными выше пороговыми уровнями вредных помех и значениями приблизительно на 10 дБ выше них часто наносят самый большой ущерб радиоастрономическим наблюдениям. Это связано с тем, что они достаточно сильные, чтобы вызвать ошибки в данных, но и достаточно слабые, чтобы не удалось легко распознать присутствие таких помех. Обычно помехи выше порогового уровня на 20 дБ и более легко распознаются. В этих случаях радиоастрономические наблюдения почти всегда бесполезны, и загрязненные данные приходится отбрасывать.

4.7.2 Помехи от астрономических источников

Лишь небольшое количество астрономических радиоисточников имеют достаточно интенсивное излучение, чтобы создавать помехи наблюдениям с высокой чувствительностью. Спектральная плотность потока мощности от таких источников может превосходить значения, приведенные в Таблице 4.1. Самым ярким примером может служить Солнце, которое является мощным источником излучения. Из-за помех от солнечного излучения определенные наблюдения можно проводить только ночью. Другие эксперименты возможны днем, исключая периоды высокой солнечной активности. Излучение солнечных вспышек особенно сильное на частотах ниже приблизительно 200 МГц. Спокойное Солнце имеет большой угловой диаметр и постоянную плотность потока и обычно не создает особых проблем.

На частотах ниже 1 ГГц ряд других космических радиоисточников превышает спектральную плотность потока мощности, приведенную в Таблице 4.1. Однако положение этих источников точно известно, и они имеют известную постоянную интенсивность, которая лишь медленно меняется с частотой. В принципе и на практике радиоастрономы могут вводить поправки на их влияние при проведении наблюдений с самой высокой возможной чувствительностью. С другой стороны, положение наземных источников помех низкого уровня, их плотность потока и спектр неизвестны и они могут сильно меняться в зависимости от времени, поэтому ослабление их влияния на наблюдения, как правило, невозможно, кроме случаев исключения неиспользуемых данных.

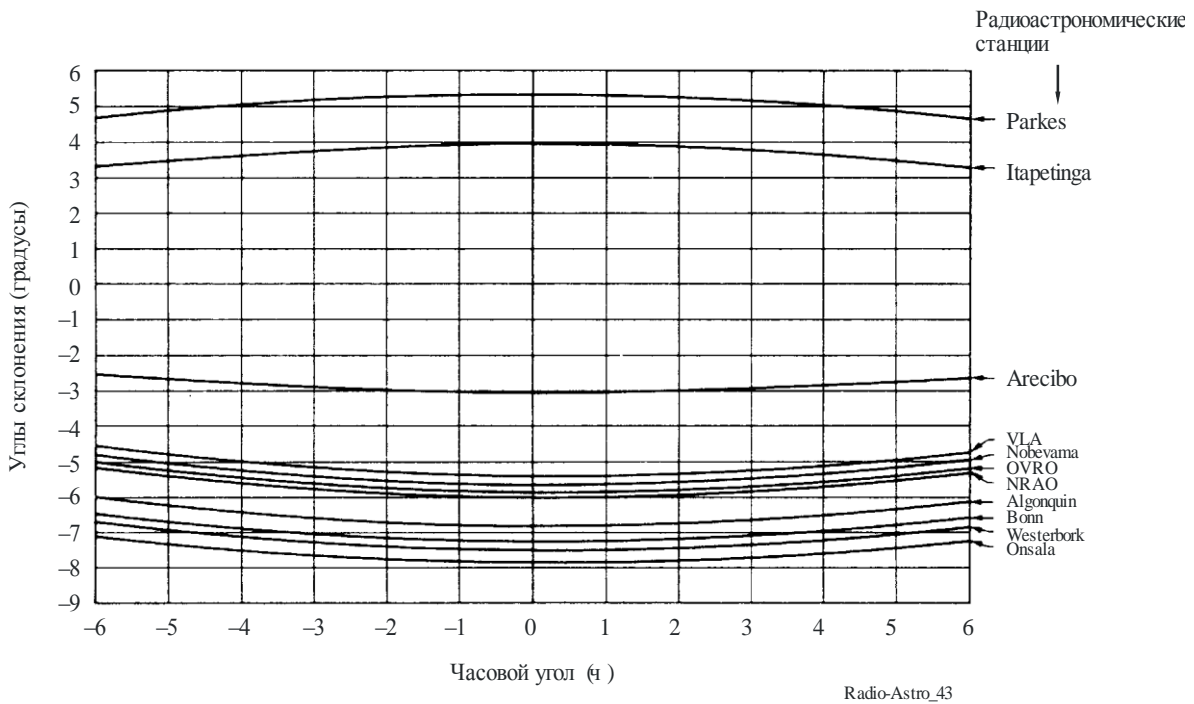
4.7.3 Особые соображения, связанные с передатчиками на геостационарных спутниках

Помехи от передач геостационарных спутников составляют особую проблему. Прежде всего необходимо отметить, что радиоастрономы не могут проводить наблюдения в присутствии сигналов на линии вниз в той же полосе частот. Таким образом, рассмотрение помех от спутников в общем касается нежелательного излучения, которое попадает в радиоастрономические полосы частот.

Поскольку уровни мощности в Таблицах 4.1 и 4.2 рассчитаны в предположении усиления антенны 0 дБи, вредные помехи возникают, когда боковые лепестки антенны с усилением больше 0 дБи направлены на передатчик, излучающий на уровнях, указанных в Таблицах 4.1 и 4.2. Для радиоастрономической антенны с боковыми лепестками, равными соответствующим лепесткам эталонной антенны, определенным в уравнении (4.1), помехи возникают, если антенна направлена под углом 19° или менее к направлению на спутник, излучающий на этих уровнях. Так, серия подобных спутников, расположенных с интервалами на геостационарной орбите, не дает возможности проводить радиоастрономические наблюдения с высокой чувствительностью для полосы небосвода шириной 38° и более с центром на этой орбите. Потеря такой большой области небосвода накладывает жесткие ограничения на радиоастрономические наблюдения.

Полезный критерий для защиты радиоастрономии от излучений геостационарных спутников предложен на Рисунке 4.3. На этом рисунке показана проекция геостационарной орбиты в звездных координатах, если смотреть с широты ряда крупных радиоастрономических обсерваторий. Если будет возможно направить радиотелескоп на область в пределах 5° от орбиты без возникновения вредных помех, то тогда для этого телескопа окажется недоступной для наблюдений с высокой чувствительностью полоса небосвода шириной 10° . Для каждой обсерватории такие потери могут оказаться весьма серьезными. Однако для сочетания радиотелескопов, расположенных на южной и северной широтах и работающих на одинаковых частотах, окажется доступным весь небосвод. Поэтому величину в 5° можно считать требованием для минимального углового разнесения между основным лепестком радиоастрономической антенны и геостационарной орбитой.

РИСУНОК 4.3
Проекция геостационарной орбиты на небесную сферу,
видимую из мест расположения нескольких радиообсерваторий



В отклике модели антенны по уравнению (4.1) уровень для бокового лепестка под углом 5° от основного лепестка составляет 15 дБи. Таким образом, чтобы исключить вредные помехи для радиотелескопа, направленного под углом 5° от передатчика, излучение спутника в радиоастрономических полосах должно быть уменьшено до уровня на 15 дБ ниже плотности потока мощности, приведенной в Таблицах 4.1 и 4.2. Если спутники разнесены по орбите с интервалами всего в несколько градусов, то уровни эквивалентной изотропно излучаемой мощности отдельных передач в направлении обсерватории должны быть еще ниже, чтобы выполнялось требование, что сумма мощностей всех принимаемых мешающих сигналов должна быть на 15 дБ ниже ΔP_H в Таблицах 4.1 и 4.2.

Ясно, что можно добиться некоторой дополнительной защиты от излучения спутников с помощью сведения к минимуму уровня усиления боковых лепестков вблизи основного лепестка. Это важно учитывать при проектировании в будущем радиоастрономических антенн.

4.7.4 Фильтрация

Мощность нежелательных сигналов вне полосы пропускания радиоастрономического приемника устраняют с помощью полосовых фильтров. В разных каскадах приемной системы можно ввести несколько фильтров, чтобы быть уверенным, что ни в одной точке нежелательные сигналы не будут достаточно сильными, чтобы привести к нелинейности. Весьма высокую избирательность можно получить с помощью цифровых фильтров, но в предыдущих каскадах должно быть получено достаточное усиление, чтобы сигнал можно было оцифровать. На краях полосы может потребоваться отклик с низким уровнем, к примеру –100 дБ по сравнению с центром полосы, так что ширина фильтра в точках –3 дБ может быть меньше полной ширины отведенной полосы. Поскольку промежуточные частоты сравнительно низкие и обычно находятся в пределах от 100 МГц до 10 ГГц, возможны относительно крутые края фильтра. Наклон краев отклика фильтра зависит от количества секций фильтра и от его расчетной характеристики. Некоторое дополнительное обсуждение вопросов фильтрации приведено в главе 6.

4.7.5 Уровни помех, способные нанести ущерб радиоастрономическому приемнику или привести к его насыщению

В Отчете МСЭ-R RA.2188 "Уровни плотности потока мощности и э.и.и.м., возможно наносящие ущерб приемникам радиоастрономической службы" отмечается, что входная мощность порядка 25 мВт является достаточной для повреждения или разрушения большинства радиоастрономических приемников. В то же время более слабые входные сигналы способны привести к насыщению этих приемников. В ряде сценариев действующие радиолокаторы способны стать источниками входных сигналов с подобным уровнем мощности.

- *Связь между главными лучами.* Высокое усиление радиоастрономических антенн в сочетании с высокой мощностью и небольшими размерами пятен разнообразных орбитальных радиолокационных зондов исследования Земли, работающих на частотах от 1 до 94 ГГц, способны вызвать такой эффект [SFCG Ref] в случае перекрытия главных лучей обеих систем. Несмотря на то что статистическая вероятность такой связи невелика, подобное происшествие для радиоастрономического оператора может иметь катастрофические последствия.
- *Связь главного луча с боковым лепестком.* Как отмечается в Рекомендации МСЭ-R 1750 "Взаимное планирование спутниковой службы исследования Земли (активной) и радиоастрономической службы в диапазонах 94 ГГц и 130 ГГц", радиоастрономический приемник переходит в режим насыщения каждый раз, когда антенна, на которой он установлен, напрямую облучается орбитальным радиолокационным зондом исследования Земли, обладающим большой мощностью, даже если сигнал принимается в зоне 0 дБи бокового лепестка радиоастрономической антенны. И наоборот, радиоастрономический приемник переходит в режим насыщения, если главный луч радиоастрономической антенны облучается боковым лепестком 0 дБи (и даже более слабым) орбитального радиолокатора при условии, что усиление радиоастрономической антенны выше, чем усиление орбитального радиолокатора.

Даже передатчики довольно умеренной мощности, такие как автомобильные радары в полосах 76–77 ГГц и 77–81 ГГц, описанные в Рекомендации МСЭ-R М.1452 "Автомобильные радары для предотвращения столкновений и системы радиосвязи диапазона миллиметровых волн для применений интеллектуальных транспортных систем", могут создавать уровни мощности, достаточные для насыщения или повреждения приемников, работая вблизи радиоастрономических антенн при высоком усилении и небольших размерах пятен, соответствующих их рабочим частотам.

4.8 Анализ по методу Монте-Карло

Иногда для определения доли времени, в течение которого мешающий сигнал превышает пороговый уровень вредных помех для радиоастрономии, используют анализ по методу Монте-Карло. Эта процедура полезна в тех случаях, когда быстро меняется угол между направлением на источник помех и основным лепестком радиотелескопа. Это изменение может возникать в результате движения источника помех, например спутника НГСО, и/или в результате изменения наведения телескопа, необходимого по программе астрономических исследований. Количество активных источников помех и расстояние до них также может меняться, например, в случае помех от наземных подвижных транспортных средств. В методе Монте-Карло анализируется большое количество пробных

конфигураций, в каждой из которых значение каждого неизвестного параметра выбирается случайным образом из набора величин с соответствующим статистическим представлением рассматриваемого параметра. По сути, анализ по методу Монте-Карло представляет собой статистический эксперимент, состоящий из ряда независимых попыток. В каждой попытке все параметры выбираются случайным образом в соответствии с фиксированным, заранее заданным распределением вероятностей. Часть попыток, для которых порог помех оказывается превышенным, дает указание о вероятности помех в реальной ситуации. Однако если, например, не более 2% попыток указывают на помехи выше предела вредных помех, то нельзя утверждать с определенностью, что вероятность помех составляет не более 2%, но с заданной степенью определенности можно получить соответствующий верхний предел вероятности помех. Эти соотношения кратко рассмотрены ниже, следуя анализу, проведенному в работе [Ponsonby, 2002]. Отмечается, что в тех случаях, когда вероятность того или иного события низкая, метод Монте-Карло не годится для точного определения этой вероятности, поскольку требуется очень много попыток моделирования для накопления значимой статистики.

Рассмотрим анализ с N попытками, при котором в n случаях результаты являются неприемлемыми, т. е. помехи превосходят пороговый уровень вредных помех. Пусть вероятность того, что одна попытка дает неприемлемый результат, равна p . Значение p , полученное из проведенных попыток, стремится к n/N , по мере того как N стремится к бесконечности. Для конечного значения N вероятность получения n неприемлемых результатов для заданного значения p дается распределением Бернулли и равна

$$P_p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)}. \quad (4.12)$$

Для интерпретации результатов анализа по методу Монте-Карло необходимо знать $P_n(p)$ – распределение вероятностей p для n неприемлемых результатов при конечном числе попыток. Это обратная задача, для решения которой требуется рассчитать приведенный ниже интеграл для нормирования распределения:

$$\frac{N!}{n!(N-n)!} \int_0^1 x^n (1-x)^{(N-n)} dx = \frac{1}{N+1}. \quad (4.13)$$

Тогда обратная вероятность оказывается равной

$$P_n(p) = \frac{(N+1)!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)}. \quad (4.14)$$

Пусть требуется с достоверностью в 90% выяснить, что истинное значение p не больше заданного значения p_{90} . Тогда значение $P_n(p)$ должно удовлетворять следующему интегральному уравнению:

$$\int_0^{p_{90}} P_n(p) dp = 0,9. \quad (4.15)$$

Для 2%-ной вероятности неприемлемого результата $p_{90} = 0,02$, и уравнение (4.15) дает решение для значений N и n , по которому можно заключить для N попыток, что с достоверностью 90% вероятность неприемлемого результата в каждой отдельной попытке не превышает 2%. В Таблице 4.5 приведены для разных значений N величины n , которые не должны быть превышены, для того чтобы с достоверностью в 90% можно было заключить, что вероятность неприемлемого результата в любой попытке не превышает 2%. Следует отметить, что при очень большом N значение n/N приближается к 2%. Однако для $N = 390$ требуется значение n/N не более 1% для достоверности в 90% того, что вероятность неприемлемых результатов не больше 2%.

ТАБЛИЦА 4.5

Значения N и n для того, чтобы вероятность неприемлемых результатов была не более 2% с достоверностью в 90%

N	n	n/N (%)	P_{90} (%)
292	1	0,52	2,0
397	4	1,01	2,0
776	10	1,29	2,0
1 900	30	1,58	2,0
10 000	181	1,81	2,0
50 000	960	1,92	2,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

К ГЛАВЕ 4

Модель бокового лепестка из Рекомендации МСЭ-R S.1428

Ниже приведена модель для усиления по боковому лепестку из Рекомендации МСЭ-R S.1428 для антенн с диаметром D , превышающим 100 длин волн λ :

$G(\varphi) = G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} \{D\varphi/\lambda\}^2$ дБи	для $0^\circ < \varphi < \varphi_m$;
$G(\varphi) = G_1$	для $\varphi_m < \varphi < \varphi_r$;
$G(\varphi) = 29 - 25 \log(\varphi)$ дБи	для $\varphi_r < \varphi < 10^\circ$;
$G(\varphi) = 34 - 30 \log(\varphi)$ дБи	для $10^\circ < \varphi < 34,1^\circ$;
$G(\varphi) = -12$ дБи	для $34,1^\circ < \varphi < 80^\circ$;
$G(\varphi) = -7$ дБи	для $80^\circ < \varphi < 120^\circ$;
$G(\varphi) = -12$ дБи	для $120^\circ < \varphi < 180^\circ$,

где:

$G_{\max} = 10 \log\{\eta(\pi D/\lambda)^2\}$ дБи;	
η – коэффициент использования апертуры для $\eta = 0,7$;	$G_{\max} = 20 \log\{D/\lambda\} + 8,4$ дБи;
$G_1 = -1 + 15 \log\{D/\lambda\}$ дБи;	
$\varphi_m = \{20\lambda/D\}(G_{\max} - G_1)^{1/2}$ градусов;	
$\varphi_r = 15,85 \{D/\lambda\}^{-0,6}$ градусов.	

ССЫЛКИ

- BARNBAUM, C. and BRADLEY, R. F. [1998] A new approach to interference excision in Radio Astronomy: real-time adaptive cancellation. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 2598-2614.
- CCIR [1966] Report 224-1. Documents of the XIth Plenary Assembly, ITU, Geneva, Vol. IV, p. 537-548.
- ELLINGSON, S. W. and CAZEMIER, W. [February 2003] Efficient multibeam synthesis with interference nulling for large arrays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*
- FOMALONT, E. B. *et al.* [1991] The micro-jansky radio source population at 5 GHz. *Astron. J.*, Vol. 102, p. 1258-1277.
- KRAUS, J. D. [1966] *Radio Astronomy*. McGraw Hill, New York, NY, Second ed. 1986, Cygnus-Quasar Books, Powell, OH.
- LOCKMAN, F. J., FREE, N. L. and SHIELDS, J. C. [2012] The Neutral Hydrogen Bridge Between M31 and M33, *Astron. J.*, Vol. 144, p. 52 – 67.
- OWEN, F. and MORRISON, G. E. [2008] The Deep Swire Field I. 20 cm Continuum Radio Observations: A Crowded Sky, *Astron. J.*, Vol. 136, p. 1889-1900.
- PONSONBY, J. E. B. [10-14 June 2002] On 2% by Monte Carlo, Proc. of IUCAF Summer School In Spectrum Management And Frequency Coordination, NRAO, Green Bank, West Virginia.
- Planck Collaboration *et. al.*, [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys.*, Vol. 536, 1.
- SFCG: information available at <https://www.sfcgonline.org>.
- SMOOT, G. *et al.* [1992] Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 396, L1-L5.
- THOMPSON, A. R. [1982] The response of a radio-astronomy synthesis array to interfering signals, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, p. 450-456.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. Jr. [1986 and 2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. John Wiley, New York, NY, reprinted by Krieger Press, Melbourne, FL., see Chapter 14. Second ed., John Wiley, 2001, see Chapter 15.
- WALTER, F. *et al.* [2012] *Nature*, The intense starburst HDF 850.1 in a galaxy overdensity at $z \approx 5.2$ in the Hubble Deep Field, Vol. 486, p 233-238.

ГЛАВА 5

Совместное использование полос частот радиоастрономической службы другими службами

5.1 Общие замечания

Большинство полос радиоастрономия делит с активными службами, которые осуществляют передачу. Такое совместное использование создает особые трудности для радиоастрономии, которая относится к пассивной службе и очень чувствительна к помехам. В связи с большими расстояниями до астрономических источников уровни плотности потока мощности исследуемого излучения часто оказываются ниже на 100 дБ и более осуществляемых человеком передач вблизи радиообсерватории. Интенсивность и характеристики астрономических сигналов определяются законами природы и не могут регулироваться радиоастрономами. Более того, экспериментальный характер этой науки часто не позволяет радиоастрономам заранее знать характеристики излучений. Эти факторы делают радиоастрономию особенно уязвимой для помех. Помехи могут наносить ущерб не только тогда, когда они сильные и подавляют астрономические сигналы, но даже когда они слабые. Скрытую опасность для радиоастрономии представляют помехи, которые лишь ненамного ниже уровня мощности, распознаваемого в отдельных измерениях, и которые присутствуют в большей части общего интервала времени. В этом случае может не быть средств обнаружения возникших во время эксперимента помех, и получаемые результаты могут содержать серьезные ошибки.

Радиоастрономические обсерватории обычно находятся в местах, специально выбранных для сведения к минимуму помех от других служб. Эти места, как правило, находятся на значительном удалении от сильных наземных источников помех и (если только наблюдения не проводятся на миллиметровых волнах, когда необходимо как можно выше подняться над атмосферой) они часто экранируются близлежащим высоким рельефом земной поверхности. При такой защите обсерватории и защите, обеспечиваемой кривизной поверхности Земли, совместное использование полос частот с наземными передатчиками оказывается возможным, когда мощность передатчика низкая и он достаточно удален географически. Однако в связи с использованием в радиоастрономии высокочувствительных систем обычно необходим большой разнос между рассматриваемыми объектами. В п. 5.3 показано, что совместное использование полос частот, как правило, невозможно, когда передатчик находится в пределах прямой видимости (LoS) радиоастрономической антенны или облучателя антенны. Обычно необходимо, чтобы передатчик находился далеко за горизонтом – на расстоянии 100 км и более. Передатчики, установленные на воздушных судах, космических аппаратах, станциях на высотных платформах или на воздушных шарах, могут оставаться в пределах прямой видимости обсерватории, находясь на очень больших расстояниях, при этом теряются все преимущества, обусловленные тщательным выбором места для обсерватории и затуханием за счет кривизны поверхности Земли. На высоких частотах (ВЧ) (3–30 МГц) любая принимаемая помеха почти всегда распространяется через ионосферу. В этом случае выбор места для обсерватории и кривизна поверхности Земли не обеспечивают защиты, и при некоторых условиях можно ожидать помех в совмещенном канале от передатчика, находящегося в любой точке Земли.

Можно провести полезное разделение локальных, региональных и глобальных проблем совместного использования частот. Локальная проблема, связанная с помехами от передатчика вблизи радиообсерватории, должна решаться на местном уровне, принимая во внимание такие факторы, как экранирование местностью. Региональные проблемы, связанные с помехами, вызванными телевизионными передатчиками, должны рассматриваться на региональном уровне, принимая во внимание национальные планы использования частот и другие региональные факторы, например разные условия и присвоения частот в странах, близко расположенных одна к другой в географическом плане. Глобальные проблемы, связанные с помехами, вызванными бортовыми спутниковыми передатчиками, можно решать только на уровне МСЭ. Для каждого класса проблем совместного использования частот требуется свой тип решения.

5.1.1 Критерии защиты для службы РАС

Важным критерием защиты для радиоастрономии служит уровень мощности помех, которые считаются вредными. Пороговый уровень вредных помех зависит от частоты наблюдения и типа проводимых измерений, как обсуждалось в главе 4. Может также потребоваться учет подробных характеристик помех.

Второй критерий касается части небосвода, для которой требуется защита радиоастрономических наблюдений. Для наземных источников помех принята величина 0 дБи для усиления радиоастрономической антенны в направлении источника помех или в направлении горизонта для удаленного передатчика. Выбор этого значения означает, что возможные источники помех с пороговыми уровнями вредных помех, приведенными в Рекомендации МСЭ-R RA.769, не приведут к появлению вредных помех при наблюдениях, проводимых с углом места более 19° (на основе модели диаграммы излучения, приведенной в Рекомендации МСЭ-R SA.509). Наблюдения, проводимые при углах места менее 19° , будут подвергаться действию помех, если передачи от (наземного) источника помех будут приниматься через боковые лепестки с усилением более 0 дБи. В этом случае часть небосвода оказывается фактически закрытой для радиоастрономических наблюдений, как поясняется в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R RA.1513. На самом деле радиоастрономы, возможно, готовы признать такие ограничения по охвату небосвода, поскольку вращение Земли открывает доступ к большинству звездных объектов при более удобных углах места. Однако такое перекрытие небосвода может накладывать очень существенные ограничения для наблюдения звездных источников, которые появляются над горизонтом только на короткое время (например, наблюдения центра галактики из высоких северных широт), и для наблюдений, критичных по времени. Для помех от геостационарных космических аппаратов желательно иметь значение усиления радиоастрономической антенны 12–15 дБи, чтобы можно было проводить наблюдения в пределах 5° от спутника на геостационарной орбите, как обсуждалось в главе 4. Применение концепции затенения небосвода к случаям помех от передатчиков на воздушных судах или космических аппаратах на негеостационарной орбите описывается в Рекомендациях МСЭ-R S.1586 и МСЭ-R M.1583.

Третий критерий, который необходимо учитывать, связан с процентом времени, в течение которого пороговый уровень помех может превышать без серьезного ухудшения работы службы. Критерий процента времени и связанные с ним вопросы затенения небосвода обсуждаются в Рекомендации МСЭ-R RA.1513, в которой указана суммарная потеря данных в 5% от передатчиков всех служб в любой полосе частот, отведенной для службы РАС на первичной основе, и не более 2% потери данных от передатчиков в каждой отдельной службе. Отмечено, что концепция суммарной потери данных еще не полностью разработана, и требуется провести дальнейшие исследования по разделению помех между различными сетями и службами. В Рекомендации МСЭ-R RA.1513 также указывается, что процент потерянных данных должен определяться как процент периодов интеграции в 2000 с, для которого средняя спектральная плотность потока мощности в радиотелескопе превышает уровень, определенный в Рекомендации МСЭ-R RA.769 (в предположении усиления антенны 0 дБи). Влияние помех, которые имеют периодический по времени характер порядка секунд и менее, требует дальнейшего изучения.

Необходимо подчеркнуть, что для некоторых типов наблюдений частота отказов в 5% за счет помех накладывает жесткие ограничения для радиоастрономов. Для некоторых наблюдений, таких как наблюдения комет, покрытия звезд Луной или взрыв сверхновой звезды, требуется высокая вероятность успешных измерений, поскольку их трудно или невозможно повторить. Другие типы наблюдений требуют одновременного измерения на разных длинах волн и в нескольких местах, в каждом из которых необходимо успешно провести наблюдения, чтобы весь эксперимент оказался успешным. Примером скоординированного исследования на нескольких длинах волн может служить вспышка новой звезды. Таким экспериментам может быть нанесен большой ущерб, если наблюдение в любой из обсерваторий окажется непригодным для использования из-за помех. Для обсерваторий, которые сталкиваются с такими трудностями, требуются специальные соглашения на национальном уровне о работе на определенных частотах и в определенное время.

Другой эффект распространения радиоволн, требующий рассмотрения, состоит в отражении мешающего сигнала. Отражения от воздушных судов являются вероятной причиной помех в полосе частот совместного использования даже при удаленных наземных передатчиках. Существует также

вероятность помех за счет отражения от спутников на низкой орбите. Отдельное отражающее тело будет действовать только в течение короткого времени, и проблемы помех будут зависеть от плотности трафика в воздушном или космическом пространстве. Проблема связана с тем, что в результате космической деятельности на орбите вокруг Земли находится большое число металлических объектов. Для определенных типов радиоастрономических измерений в совместно используемых полосах частот серьезные помехи могут создавать отражения наземных передач от Луны.

Рассмотренные выше критерии защиты включают порог мощности помех, процент небосвода, требующий защиты, и долю времени наблюдения, требующую защиты. Все они непосредственно связаны с совместным использованием частот на географической основе, т. е. географическим разнесением двух служб, которое позволяет им одновременно работать на одной частоте в одно и то же время. При совместном использовании частот несколькими службами дополнительную защиту можно обеспечить с помощью применения ортогональной поляризации. Это не очень пригодный способ для защиты радиоастрономии, поскольку во многих наблюдениях используют обе поляризации, а также потому, что помехи обычно попадают в радиоастрономическую систему через боковые лепестки антенны с высоким усилением, характеристики поляризации которых сильно отличаются от главного лепестка.

Необходимо отметить, что, за исключением редких случаев, совместное использование частот с РАС возможно только при эффективном географическом разнесении. Возможно введение ограниченного разделения по времени, чтобы позволить провести конкретные наблюдения на радиоастрономической станции, и оно может быть действительно необходимым в случаях, рассмотренных в п. 5.9. В частности, это может быть полезно для полос частот, не распределенных для радиоастрономии.

5.2 Расстояния разнесения, требуемые для совместного использования полос частот с одиночным передатчиком (см. Рекомендацию МСЭ-R RA.1031)

Для успешного территориального разнесения необходимо, чтобы создающий помехи передатчик и испытывающий помехи приемник находились на удалении, при котором помехи уже не считаются вредными. Для критериев, изложенных в главе 4, ослабление на этом расстоянии должно быть достаточным, чтобы снизить мешающий сигнал ниже соответствующего уровня в Рекомендации МСЭ-R RA.769 в течение всего времени, кроме процентной доли, $p\%$. Потери при передаче $L_b(p)$ определяются в Приложении 7 РР. Соответствующее уравнение приведено ниже, причем к нему добавлено слагаемое атмосферного затухания A :

$$L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p) - A, \quad (5.1)$$

где:

- $L_b(p)$ – минимальные допустимые основные потери передачи (дБ) для $p\%$ времени, это значение должно превышать фактическими потерями передачи в течение всего времени, кроме $p\%$;
- P_t – уровень мощности передачи (дБВт) в эталонной полосе на входе антенны;
- G_t – усиление (дБи) передающей антенны в направлении радиоастрономической антенны;
- G_r – усиление (дБи) радиоастрономической антенны в направлении передатчика;
- $P_r(p)$ – максимальная допустимая мощность помех (дБВт) в эталонной полосе, которая может превышать на входе приемника в течение не более $p\%$ времени;
- A – дополнительный коэффициент потерь, связанных с атмосферным поглощением.

При использовании критериев защиты, описанных в главе 4, и $G_r = 0$ дБи уравнение (5.1) принимает следующий вид:

$$L_b(p) = P_t + G_t - P_r(p) - A, \quad (5.2)$$

где P_r следует взять из столбца 7 Таблицы 4.1 или Таблицы 4.2 в главе 4. Уровень $L_b(p)$ должен рассчитываться с использованием подходящей модели, такой как комплексный набор, приведенный в Рекомендациях МСЭ-R P.452, МСЭ-R P.526 и МСЭ-R P.617.

Атмосферное затухание быстро увеличивается с ростом влажности и частоты наблюдения. На частотах ниже 15 ГГц атмосферное затухание в зените зачастую невелико ($< 0,1$ дБ), поэтому в уравнении (5.2) им можно пренебречь. В высоких и сухих местах на частотах от 15 до 115 ГГц непрозрачность в зените умеренная (< 1 дБ) и обеспечивает лишь небольшую защиту от помех. На частотах свыше 115 ГГц непрозрачность атмосферы быстро изменяется вблизи резонансных частот молекул атмосферы и обеспечивает существенную защиту от помех (см. п. 5.7).

Что касается передач в пределах расстояния прямой видимости, то потери передачи в свободном пространстве обычно не меняются и критерий процента времени оказывается непригодным. В этом случае L_b имеет простую аналитическую форму, и уравнение (5.2) можно записать в следующем виде:

$$20 \log(4\pi d) - 20 \log(\lambda) = P_t + G_t - P_r - A, \quad (5.3)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м), а λ – длина волны (м).

В проведенном выше анализе P_t представляет собой мощность, передаваемую в полосе B_r радиоастрономического приемника. Если мощность передатчика P_T распределена по ширине полосы $B_t > B_r$, то

$$P_t = P_T - 10 \log(B_t/B_r) + A \quad (5.4)$$

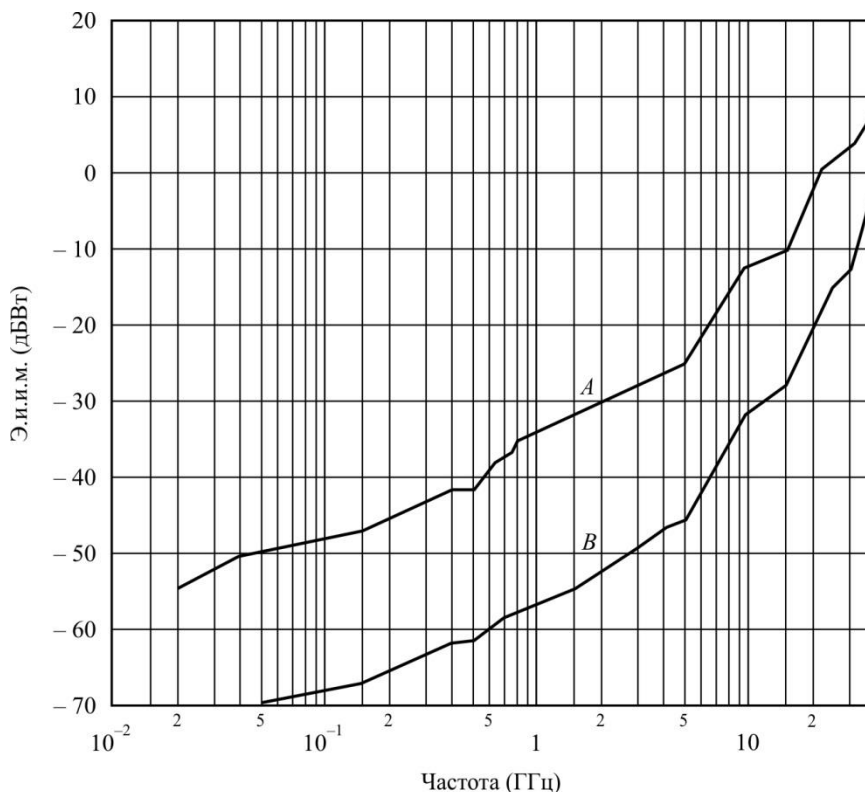
в предположении, что мощность передатчика имеет однородную спектральную плотность.

5.3 Совместное использование полос частот в пределах расстояния прямой видимости

Радиоастрономии редко удается совместно использовать распределенный спектр с любой другой службой, чьи передатчики находятся в пределах прямой видимости обсерватории. Это показано на Рисунке 5.1. Максимальная эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.), которая не создает вредных для РАС помех, рассчитана с помощью уравнений (5.3) и (5.4) для двух расстояний. Расстояние в 600 км характерно для наземного передатчика, удаленного на большое расстояние в пределах прямой видимости, а именно для передатчика на борту воздушного судна, находящегося на горизонте при высоте 20 км. Другое расстояние взято для геостационарной орбиты, и оно характерно для максимального расстояния до большинства бортовых космических передатчиков, которые не находятся в дальнем космосе. Для наземного передатчика были использованы пороговые уровни помех из Таблицы 1 Рекомендации МСЭ-R RA.769. Как указано в п. 4.7.3, желательна дополнительная защита в 12–15 дБ в отношении передатчика на геостационарной орбите, чтобы позволить проводить наблюдения в пределах 5° от орбиты спутника. Эти кривые применимы при ясной и сухой атмосфере. На частотах выше примерно 50 ГГц поглощение в атмосфере может составлять несколько десятых децибела на километр в зависимости от плотности паров воды, и совместное использование частот с маломощными передатчиками вдоль протяженных линий прямой видимости оказывается возможным в некоторых ситуациях.

РИСУНОК 5.1

Э.и.и.м. как функция частоты



Примечание 1. Уровень э.и.и.м., выше которого совместное использование частот РАС и активными службами становится невозможным для передатчиков в пределах прямой видимости радиоастрономической обсерватории. Здесь предполагается, что полоса пропускания радиоастрономического приемника равна ширине полосы частот, распределенной РАС, и что э.и.и.м. является эквивалентной изотропно излучаемой мощностью в этой полосе. Кривая *A* показывает результаты для передатчика на геостационарной орбите, а кривая *B* — для наземного передатчика в пределах прямой видимости на расстоянии 600 км.

Radio-Astro_51

Из Рисунка 5.1 ясно, что совместное использование частот с наземным передатчиком в пределах прямой видимости вряд ли возможно на частотах ниже 10 ГГц, поскольку такое совместное использование частот накладывает жесткие ограничения на величину э.и.и.м. передатчика. Даже для частот до 40 ГГц мощность передатчика не должна превышать нескольких милливатт или же передающая антенна должна обеспечивать высокую избирательность в направлении обсерватории, чтобы такое совместное использование частот стало возможным. Для бортовых космических передатчиков, не находящихся в дальнем космосе, с типовой мощностью свыше 1 Вт совместное использование частот оказывается невозможным даже вне зоны покрытия бортовой космической антенны для частот приблизительно до 20 ГГц. Между 20 и 50 ГГц совместное использование частот вряд ли возможно в пределах зоны покрытия бортовой космической антенны. Чтобы такое совместное использование стало возможным, для передатчиков на космических аппаратах, находящихся на высоте менее 6400 км, требуется ограничение уровня э.и.и.м. до значений, лежащих между кривыми *A* и *B*.

Особый случай совместного использования частот с космическим аппаратом, осуществляющим полет в дальнем космосе, описывается в п. 5.8.

5.4 Совместное использование полос частот со службами, использующими наземные передатчики

Установление зон координации вокруг радиоастрономических станций дает способ избежания вредных помех от наземных передатчиков других служб, которые используют полосы частот совместно с радиоастрономией. Из предыдущего обсуждения ясно, что совместное использование полос частот возможно только со службами, чьи передатчики находятся за линией горизонта. Основным критерием, используемым для определения зоны координации, служит требование, чтобы суммарные помехи от всех пользователей за пределами этой зоны не превышали порогового уровня вредных помех, измеренного в месте расположения радиоастрономической станции. Таким образом, размер зоны координации зависит от ряда факторов. Тип измерений, проводимых на радиоастрономической станции, определяет соответствующие пороги помех, установленные в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Плотность потока мощности помех в месте расположения радиоастрономической станции определяется числом и распределением пользователей за пределами зоны, уровнем э.и.и.м. передач пользователей в направлении радиоастрономической станции, долей времени, в течение которого они действуют, и характеристиками распространения радиоволн. Характеристики распространения зависят от таких факторов, как рельеф местности, наличие деревьев и атмосферные условия. Соответствующие модели распространения описываются в п. 5.2.

Ввиду действия многих факторов границы зон координации надо устанавливать для каждой радиоастрономической станции отдельно, если такая зона требуется, исходя из характерных особенностей радиоастрономических измерений и принимая во внимание активную службу, использующую данную полосу на совместной основе. Следует иметь в виду, что зона координации может иметь размер в 100 км и более. Для многих небольших стран требуемая зона координации может простирается за государственные границы в другие страны с иным распределением частот. Поэтому может оказаться необходимым применение специальных условий при определении зон координации для защиты радиоастрономии в небольших странах.

Зона координации определяет район вокруг радиоастрономической обсерватории, за пределами которого пользователи активной службы могут свободно осуществлять передачу, не создавая помех для радиоастрономических наблюдений. Для пользователей в пределах зоны координации необходимо найти технические средства, чтобы избежать вредных помех для службы РАС. Например, такие меры могут включать тщательный выбор мест размещения стационарных передатчиков с использованием преимуществ естественного экранирования или проектирование передающих антенн с нулевым излучением в направлении обсерватории. В других случаях единственным техническим решением может оказаться исключение любых передач в радиоастрономической полосе в пределах зоны координации.

5.5 Совместное использование полос частот со службами подвижной связи

В принципе зоны координации можно устанавливать для защиты радиоастрономических станций от подвижных передатчиков. В этом случае у подвижного пользователя должны быть какие-то способы определения факта попадания в зону координации и какие-то способы снижения помех, принимаемых радиообсерваторией до уровня ниже порога вредных помех. В Рекомендации МСЭ-R M.1316 установлены принципы и методы совместного использования частот службами ПСС (Земля-космос) и РАС в полосах 1610,6–1613,8 МГц и 1660–1660,5 МГц, основанные на подходе с моделированием по методу Монте-Карло. В этом методе в дополнение к зоне координации вводится внутренняя зона исключения, где запрещается передача передвижными станциями, наряду с промежуточной зоной ограничений, внутри которой могут вводиться некоторые ограничения для работы подвижных станций. Однако обоснованность применения подхода по методу Монте-Карло в качестве основы для эффективной защиты радиоастрономии еще предстоит продемонстрировать на практике.

В случае подвижных передатчиков на борту воздушных судов размер зоны координации получается намного больше, чем для наземных передатчиков. Воздушные суда могут оставаться в пределах прямой видимости радиообсерватории на больших расстояниях, как указывалось в п. 5.3, и совместное использование частот скорее всего будет весьма затруднено. Обычно требуются зоны координации размером на многие сотни километров, если только радиоастрономическая станция не будет надежно экранирована приподнятым горизонтом.

5.6 Совместное использование полос частот радиоастрономической службы ниже 40 ГГц

В Таблице 5.1 приведены результаты расчетов, проведенных для используемых на совместной основе радиоастрономических полос ниже 40 ГГц (взяты из Отчета 696-2 бывшего МККР). В таблице приведен широкий набор сценариев совместного использования частот для службы РАС и требуемые большие расстояния разнесения. Для большинства полос расстояние разнесения, требуемое для совместного использования частот гипотетическим передатчиком и радиоастрономическим приемником, было рассчитано по методике, описанной в предыдущих разделах. Расстояние разнесения, обеспечивающее необходимые основные потери передачи, зависит от механизма распространения радиоволн. Для частот до 38 МГц доминируют ионосферные эффекты. Для более высоких частот помехи на уровне 10% времени определяются в первую очередь тропосферным рассеянием. Расстояния разнесения для частот от 74 до 408 МГц рассчитывались без использования самых последних моделей (Рекомендации МСЭ-R P.452, МСЭ-R P.526 и МСЭ-R P.617). По оценкам, данные о потерях на распространение могут иметь ошибку приблизительно в 10 дБ по отношению к общим основным потерям при передаче, составляющим обычно 220 дБ. Это в свою очередь означает, что типичная ошибка определения расстояний разнесения может составлять 50–100 км по сравнению с результатами с использованием последних моделей распространения. Расстояния для частот выше 408 МГц рассчитывались по Рекомендации МСЭ-R P.452-5. Во всех случаях предполагалось, что высота радиоастрономической антенны равна 25 м. Полученные результаты не сильно зависят от этого допущения. Эти результаты приведены для двух случаев – для местоположения с углом горизонта в 1° и для хорошо защищенного местоположения с углом горизонта в 4° . Некоторые конкретные полосы частот подробнее обсуждаются ниже.

ТАБЛИЦА 5.1

**Параметры и расстояния разнесения для совместного использования
полос частот из Отчета 696-2 бывшего МККР (1990 год)**

Частота (МГц)	Предполагаемый мешающий передатчик						Предполагаемый радиоастрономический приемник			Требуемые потери передачи	Расстояние разнесения	
	Служба	P_t (дБВт)	G_t (дБи)	Э.и.и.м. (дБВт)	B_t (МГц)	Кол- во	C/SL	P_r (дБВт)	B_r (МГц)	L (дБ)	$d(1^\circ)$ (км)	$d(4^\circ)$ (км)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
13	F			10	0,01	1	C	-185	0,05	195	> 4000	> 4000
25	F			10	0,01	1	C	-188	0,12	198	> 4000	> 4000
38	F	13	3	16	0,02	5	C	-190	0,50	213	930	700
74	F	15	10	25	0,03	7	C	-195	1,6	228	990	780
150	M	14	0	14	0,03	10	C	-199	2,95	223	820	600
327	M	14	0	14	0,03	15	C	-201	6,60	227	730	550
408	M	14	4	18	0,025	12	C	-203	3,9	232	760	560
610	B			40	6,0	1	C	-202	6,0	242	685	345
1 365	R	27	0	27	0,50	1	C	-205	27,0	232	440	155
	R	27	0	27	0,50	1	SL	-220	0,02	233	450	160
1 665	F	7	38	45	3,5	1	SL	-220	0,02	243	525	220
	F	7	0	7	3,5	1	SL	-220	0,02	205	155	< 100
	LMS(E-S)	-	-	0	0,004	1	SL	-220	0,02	220	290	< 100
	F	7	38	45	3,5	2	C	-207	10,0	252	630	305
	F	7	0	7	3,5	2	C	-207	10,0	214	230	< 100
2 700	F	10	0	10	10	1	C	-207	10,0	217	215	< 100
4 830	F	10	44	54	40	1	C	-218	0,05	243	410	135
	F	10	0	10	40	1	C	-218	0,05	199	< 100	< 100
5 000	F	10	44	54	40	1	C	-207	10,0	255	540	230
	F	10	0	10	40	1	C	-207	10,0	211	125	< 100
10 600	F	7	44	51	100	1	C	-202	100	253	430	155
	F	7	0	7	100	1	C	-202	100	209	< 100	< 100
14 500	FS(E-S)	27	0	27	50	1	SL	-214	0,15	216	< 100	< 100
22 200	F	-7	45	38	50	1	SL	-210	0,25	224	< 100	< 100
31 000	F	-10	45	35	100	2	C	-192	500	227	< 100	< 100

- (1) Частота радиоастрономической полосы.
- (2) Служба, в которой работает передатчик (F – фиксированная, M – подвижная, B – радиовещательная, R – радиолокационная, FS (E-S) – работа фиксированной спутниковой службы в направлении Земля-космос и LMS (E-S) – сухопутная подвижная спутниковая служба (Земля-космос)).
- (3) Мощность передатчика (дБ относительно 1 Вт).
- (4) Усиление передатчика в направлении радиоастрономической обсерватории.
- (5) Э.и.и.м. передатчика в направлении радиоастрономической обсерватории.
- (6) Ширина полосы излучения отдельного передатчика.
- (7) Предполагаемое количество передатчиков, которые могут работать одновременно в радиоастрономической полосе.
- (8) Тип радиоастрономических наблюдений (C – наблюдения непрерывного спектра, а SL – наблюдения спектральных линий).
- (9) Порог вредных помех, взятый из столбца 7 Таблиц 4,1 и 4,2 в главе 4 соответственно для наблюдений непрерывного спектра и спектральных линий.
- (10) Используемая в расчетах ширина радиоастрономической полосы частот.
- (11) Требуемые потери передачи, рассчитанные по уравнениям (5,2) и (5,4).
- (12) Расстояние разнесения, требуемое для того, чтобы избежать вредных помех для радиоастрономических наблюдений в случае, когда горизонт для обсерватории соответствует углу места 1° .
- (13) Расстояние разнесения, требуемое для того, чтобы избежать вредных помех для радиоастрономических наблюдений в случае, когда горизонт для обсерватории соответствует углу места 4° .

5.6.1 Полоса частот 1330–1427 МГц

Участок частотного спектра вблизи спектральной линии водорода с длиной волны 21 см очень важен для радиоастрономии. Этот аспект был отмечен распределением радиоастрономии на всемирной основе исключительно для пассивного использования полосы от 1400 до 1427 МГц для наблюдений непрерывного спектра и линий. В течение многих лет наблюдения спектральной линии водорода с доплеровским сдвигом в сторону низких частот становятся все важнее. Этот сдвиг к низким частотам возникает за счет больших скоростей, с которыми удаленные галактики разбегаются от нашей Галактики. Важность этих наблюдений признана в примечании п. 5.149 РР, в котором устанавливается некоторая защита для радиоастрономии в полосе ниже 1400 МГц. В этой полосе радиолокационная служба имеет первичный статус в Районах 2 и 3, а в Районе 1 она делит этот первичный статус с фиксированной и подвижной службами.

Типичная радиолокационная система, используемая для целей воздушной службы в этой полосе, представляет собой наземную радиолокационную станцию с пиковой мощностью импульса 500 кВт и с усилением антенны 34 дБи. Если динамический диапазон радиоастрономического приемника достаточен для согласования с пиковой мощностью радиолокатора, то важным параметром с точки зрения помех является средняя мощность в радиоастрономическом приемнике за время интеграции. Для радиолокатора с разверткой на 360° средняя э.и.и.м. в направлении радиоастрономической обсерватории имеет порядок средней мощности передатчика. Фактически передаваемая таким образом мощность зависит от диаграммы направленности антенны радиолокатора и характера развертки. В предположении, что радиолокатор имеет коэффициент заполнения 0,001, средняя мощность составляет 500 Вт. Для наблюдения спектральной линии используется Таблица 2 из Рекомендации МСЭ-R RA.769, и уровень вредных помех составляет –220 дБВт в полосе 20 кГц. Считается, что выходная мощность радиолокатора в 500 Вт равномерно распределена в полосе шириной 0,5 МГц (импульс 2 мкс). Это уменьшает мощность в отдельном канале радиоастрономического приемника на $10 \log(500/20) = 14$ дБ. Требуемые основные потери передачи получают равными 233 дБ, что дает расстояние разнесения в 450 и 160 км соответственно для углов места горизонта 1° и 4°, см. Таблицу 5.1. Необходимо отметить, что пиковая мощность на входе приемника равна –142 дБВт, когда средние помехи как раз находятся на уровне пороговых вредных помех. Это приблизительно на 15 дБ выше мощности шума приемника в полосе 0,5 МГц и, в частности если на входной каскад в полосе пропускания приемника попадает более одного сигнала радиолокатора, нелинейные эффекты могут не позволить проводить анализ по средней мощности.

5.6.2 Полоса частот 4800–5 000 МГц

Полоса частот 4800–4990 МГц распределена радиоастрономии на вторичной основе, а фиксированной и подвижной службам – на первичной основе. Однако в примечании п. 5.149 РР полосы частот 4825–4835 МГц и 4950–4990 МГц выделены для работы в специальном режиме. Первая из этих полос предназначена для наблюдения спектральной линии формальдегида.

В полосе частот 4990–5000 МГц радиоастрономия имеет распределение на равной первичной основе с фиксированной и подвижной (за исключением воздушной подвижной) службами. Фиксированная служба может использовать эту полосу для маломощных радиорелейных систем или систем тропосферного рассеяния. В связи с очень большой мощностью, используемой последними системами, совместное использование частот с радиоастрономией оказывается весьма затруднительным. Радиорелейные системы с мощностью передачи, к примеру, 10 Вт, шириной радиочастотной полосы 40 МГц и усилением антенны 44 дБи не создают таких сложных проблем для совместного использования частот. В Таблице 5.1 приведены результаты для двух вариантов радиорелейных систем с антенной, направленной прямо на радиообсерваторию, и с антенной, направленной в сторону от обсерватории (усиление 0 дБи в направлении обсерватории).

5.6.3 Полосы частот 22,01–22,21 ГГц и 22,21–22,5 ГГц

В первой из этих двух полос распределение для радиоастрономической службы не проведено, но администрациям настоятельно рекомендовано обеспечивать защиту радиоастрономических наблюдений. Во второй полосе радиоастрономия имеет распределение на первичной основе. В обеих полосах предусмотрено совместное использование частот с фиксированной и подвижной (за исключением воздушной подвижной) службами. Эта полоса содержит важную спектральную

линию паров воды на 22,235 ГГц, и она используется на совместной основе для указанных здесь наблюдений спектральных линий. Эта спектральная линия воды может генерировать мощное мазерное излучение (мегамазер) из окрестности черной дыры в центре активной галактики, и ее можно обнаружить с большим доплеровским сдвигом от собственной частоты [Greenhill *et al.*, 2003]. В Таблице 5.1 приведены результаты для антенны фиксированных служб, направленной на радиообсерваторию.

5.7 Совместное использование радиоастрономических полос частот выше 40 ГГц

Выше 40 ГГц предусмотрены распределения службе РАС для наблюдений непрерывного спектра и спектральных линий. Некоторые из этих распределенных полос частот совместно используются с различными активными службами. До последнего времени существовало сравнительно мало активных систем, работающих выше 40 ГГц, и поэтому было мало сообщений о помехах для радиоастрономии. Теперь ситуация изменилась, и были предприняты исследования совместного использования для нескольких полос частот, включая полосу в 42,5–43,5 ГГц, которая совместно используется РАС, фиксированной службой, ФСС (Земля-космос) и подвижной службой (за исключением воздушной). Применения для фиксированной службы включают использование в сетях высокой плотности (см. примечание п. 5.547 РР). Совмещение с активными службами на частотах выше 40 ГГц может по ряду причин оказаться проще, чем на более низких частотах. Во-первых, на этих частотах легко достигается высокая направленность передачи для антенн среднего размера, во-вторых, на этих частотах имеет место более значительное ослабление в атмосфере и, в-третьих, рассеяние сигналов тропосферой уменьшается с повышением частоты.

5.7.1 Совместное использование полос частот от 60 до 275 ГГц

В Рекомендации МСЭ-R RA.1272 рассматривается защита радиоастрономических измерений на частотах выше 60 ГГц от наземных помех. Имеются особые трудности совмещения служб, характерные для таких высоких частот. Приемники миллиметровых волн для радиоастрономии обычно охватывают всю ширину атмосферных окон (68–116 ГГц, 130–170 ГГц, 200–323 ГГц и т. д.), чтобы получить всю информацию, содержащуюся во множестве спектральных линий, или для получения большой ширины полосы для чувствительных измерений непрерывного спектра. Более того, используемые в первых каскадах высокочувствительных гетеродинных приемников смесители сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник весьма восприимчивы к насыщению и даже к разрушению мешающими сигналами в любой части рассматриваемой полосы, а технологии фильтрации с малыми потерями для их защиты пока еще не существует. Однако положительной стороной является то, что в мире существует относительно небольшое число обсерваторий на миллиметровых волнах, которые требуют защиты на всемирной основе, и они расположены, насколько это возможно, в изолированных и удаленных местах, чтобы обеспечить максимальные преимущества, которые можно получить в условиях очень сухой атмосферы и низкого уровня наземных помех. Поэтому обсерватории на миллиметровых волнах можно эффективно защитить от наземных передач на *всех* частотах выше 60 ГГц с помощью зон координации средних размеров с минимальным нарушением работы наземных служб. В Рекомендации МСЭ-R RA.1272 предложено установить зоны координации вокруг обсерваторий миллиметровых волн, где это возможно, для *всех* частот выше 60 ГГц. Зоны координации надо определить с помощью пороговых уровней помех, приведенных в Рекомендации МСЭ-R RA.769, и процедуры, описанной в Рекомендации МСЭ-R RA.1031.

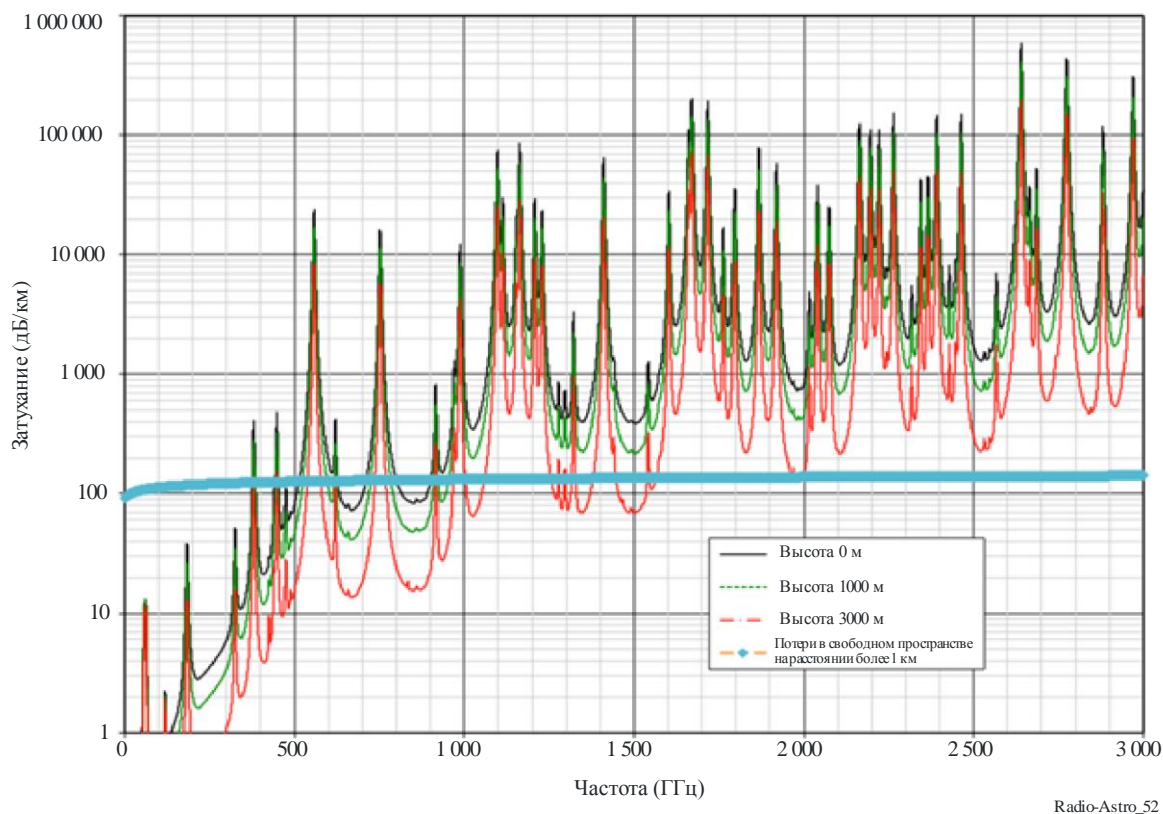
5.7.2 Совместное использование полос частот выше 275 ГГц

Некоторые характеристики диапазона частот 275–3000 ГГц объединяются для снижения вероятности помех между радиоастрономической службой и активными службами, работающими в данном диапазоне. В диапазоне 275–3000 ГГц поглощение оказывает сильное воздействие на распространение волн в атмосфере Земли вследствие наличия атмосферных молекул. Основные молекулярные структуры, осуществляющие поглощение, – это кислород (O_2) и водяной пар (H_2O). Нерезонансное поглощение создает общий непрерывный спектр поглощения, устойчиво возрастающего с увеличением частоты. Чрезмерно большое затухание можно обнаружить на определенных частотах, соответствующих собственному резонансу молекул. Общий непрерывный спектр поглощения на уровне моря составляет приблизительно 5 дБ/км на частоте 275 ГГц, 300 дБ/км – на частоте 1000 ГГц и 4000 дБ/км – на частоте 3000 ГГц. Затухание при специфических молекулярных резонансах данного

диапазона может достигать порядка 550 000 дБ/км. Затухание уменьшается с увеличением высоты, так как происходит снижение концентрации кислорода и водяного пара. На Рисунке 5.2 показано затухание (в дБ/км) на различной высоте: уровень моря, 1000 м и 3000 м. Параметры, которые были использованы при расчете данных кривых, приведены в Отчете МСЭ-R RA.2189.

РИСУНОК 5.2

Атмосферное затухание, рассчитанное на горизонтальных трассах длиной 1 км на различных высотах с учетом параметров атмосферы, приведенных в Таблице 1. Для справки на графике также отображены потери в свободном пространстве свыше 1 км



В Отчете МСЭ-R RA.2189 содержатся значения расстояний, за пределами которых сигнал, передаваемый на частотах 275–1000 ГГц, не превышает пороговые уровни помех для радиоастрономической службы, экстраполированные из Рекомендации МСЭ-R RA.769 и основанные на предполагаемых условиях, близких к наилучшим.

Атмосферное поглощение оказывает существенное влияние на наземные системы в ТГц-диапазоне частот, поэтому его следует учитывать при расчете потерь на трассе между передатчиком и приемником. По этой же причине астрономические обсерватории, в которых осуществляется наблюдение в данном диапазоне частот, как правило, расположены на высоких горных вершинах. Коэффициент поглощения базовой линии на частоте 275 ГГц и высоте 3000 м составляет около 1 дБ/км. На расстояниях свыше примерно 186 км атмосферное затухание превышает потери в свободном пространстве. На частоте 1000 ГГц коэффициент поглощения приблизительно равен 100 дБ/км, а атмосферное затухание на расстояниях более 1,6 км превышает потери в свободном пространстве; соответствующие величины на частоте 3000 ГГц составляют около 1000 дБ/км, а расстояние, на котором затухание превышает потери в свободном пространстве, равно примерно 150 м. Таким образом, на частотах свыше 1000 ГГц атмосферное поглощение, как правило, является более значимым фактором, чем геометрическое распространение (потери в свободном пространстве).

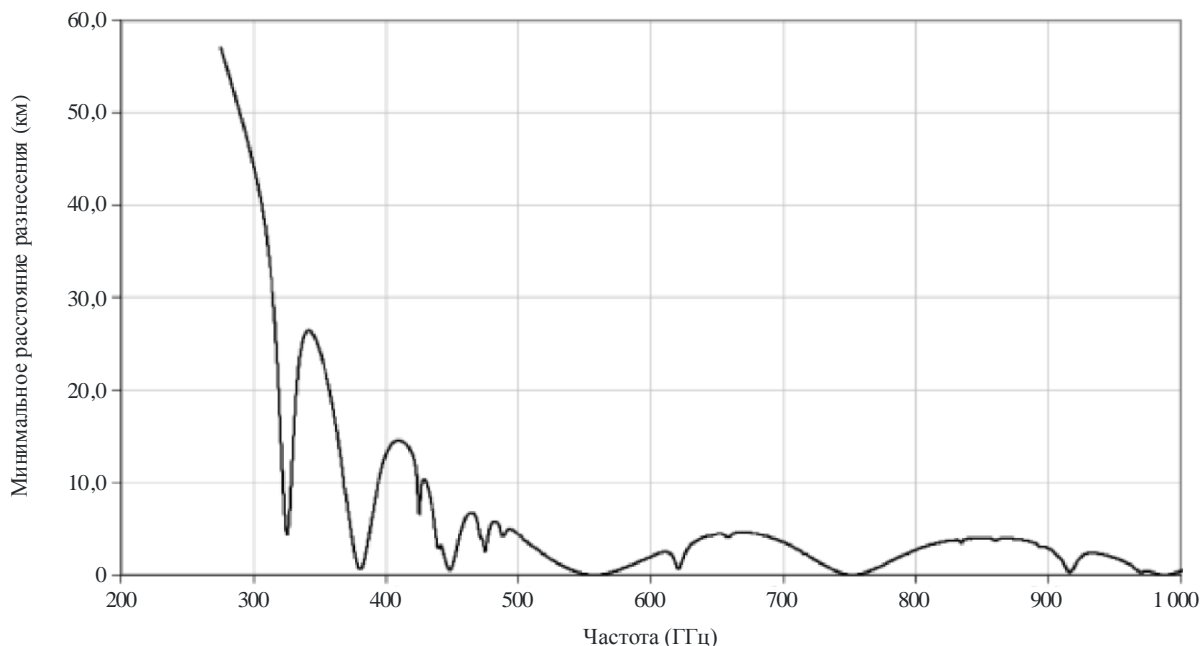
Малые размеры антенных лучей также способствуют снижению вероятности возникновения случайных помех. На частотах свыше 275 ГГц ширина луча антенны очень мала, даже в антеннах с

небольшими зеркалами. Например, антенны диаметром 30 см (т. е. размером с большую обеденную тарелку) могут создавать луч размером лишь $0,28^\circ$ на частоте 275 ГГц, если предположить, что 75% диаметра зеркала облучается системой возбуждения. Поскольку размер луча уменьшается при увеличении частоты, ширина лучей антенны на частотах более 275 ГГц станет еще меньше. Таким образом, для большинства действующих систем РЧ-мощность, генерируемая на данных частотах, невелика.

С точки зрения помех радиоастрономической службе, создаваемых активной системой в диапазоне частот 275–3000 ГГц, наземному сценарию, близкому к наихудшим условиям, будет соответствовать передатчик, развивающий максимально возможную РЧ-мощность при помощи относительно большой передающей антенны, направленной непосредственно на радиотелескоп. При этом как передатчик, так и телескоп работают на больших углах места. Для имитации данного сценария и определения расстояния, на котором наличие передатчика может препятствовать работе радиотелескопа, предполагается, что радиотелескоп и передатчик находятся на высоте 3000 м и что передатчик развивает мощность, которая уменьшается с 2,75 дБм на частоте 275 ГГц до 20 дБм на частоте 3000 ГГц, и что передающая антенна имеет диаметр 30 см и эффективную площадь облучения 75%. С учетом данных допущений после добавления атмосферного поглощения (см. Рисунок 5.2) можно рассчитать расстояние, на котором возникают помехи (как определено в Рекомендации МСЭ-R RA.769). Результаты отображены на Рисунке 5.3 для диапазона частот 275–1000 ГГц и на Рисунке 5.4 для диапазона частот 1000–3000 ГГц.

РИСУНОК 5.3

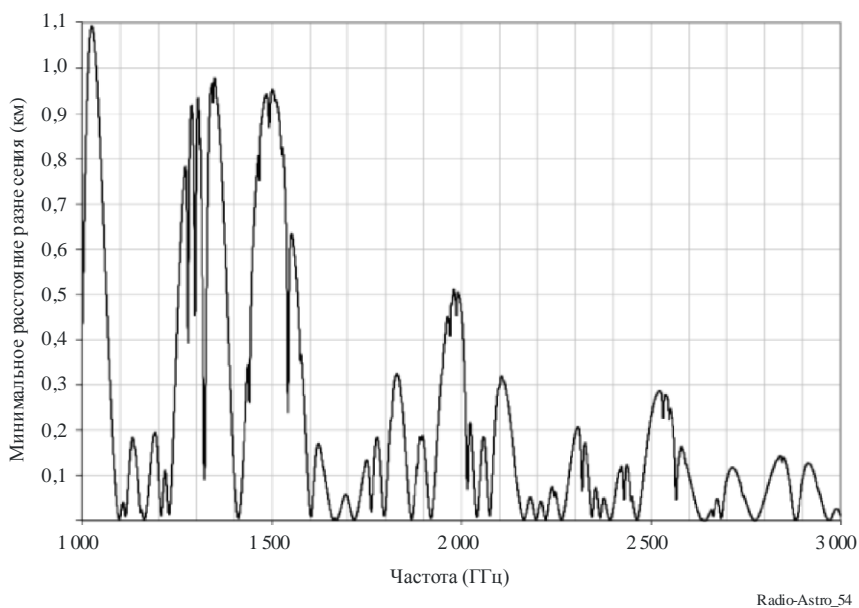
Расстояние, за пределами которого сигнал, передаваемый на частотах в диапазоне 275–1000 ГГц, не превышает пороговый уровень помех для радиоастрономической службы, экстраполированный из данных Рекомендации МСЭ-R RA.769 и основанный на предполагаемых условиях, близких к наихудшим



Radio-Astro_53

РИСУНОК 5.4

Расстояние, за пределами которого сигнал, передаваемый на частотах в диапазоне 1000–3000 ГГц, не превышает пороговый уровень помех для радиоастрономической службы, экстраполированный из данных Рекомендации МСЭ-R RA.769 и основанный на предполагаемых условиях, близких к наихудшим



Вывод заключается в том, что для создания помех в диапазоне частот 1000–3000 ГГц наземный передатчик должен находиться в непосредственной близости к телескопу, если предположить наихудший сценарий работы как передатчика, так и телескопа, расположенных на высокой вершине горы в условиях сухой погоды. При малых углах места затухание намного больше, а расстояние, на котором возникают помехи, становится еще меньше. Однако радиотелескопы, работающие в этом диапазоне частот, не размещаются в подобных зонах.

Размещенные на борту воздушного судна источники создают временные помехи радиотелескопам, так как самолеты перемещаются относительно радиотелескопов. Это справедливо главным образом для частот в диапазоне 1000–3000 ГГц, потому что очень высокое поглощение в атмосфере на наклонных трассах ограничивает вероятность помех. Они могут возникать только в тех случаях, когда самолет находится непосредственно над радиотелескопом, а антенна направлена прямо на земную поверхность. Поскольку самолет движется очень быстро относительно поверхности Земли, луч ТГц-диапазона весьма узок, и длительность помехи будет невелика. Помехи от ТГц-передатчика, работающего на борту высотного вертолета, зависшего непосредственно над радиотелескопом, могут, предположительно, превысить пороговый уровень вредных помех, экстраполированный на основе данных Рекомендации МСЭ-R RA.769. Такая ситуация может сложиться при отсутствии предварительной координации и, в лучшем случае, маловероятна. Таким образом, помехи на борту воздушного судна, препятствующие работе радиоастрономической обсерватории, также маловероятны. Вероятность помех радиотелескопу в результате работы негеостационарных спутников крайне мала в связи с небольшим размером лучей, быстрым перемещением и потерями в свободном пространстве.

Следовательно, можно заключить, что до тех пор, пока практические ограничения на генерацию РЧ-мощности резко не изменятся, совместное использование частот радиоастрономической службой и активными службами в диапазоне 275–3000 ГГц не будет представлять проблем.

5.8 Совместное использование полос частот с исследованиями дальнего космоса

Полосы, распределенные для передач в целях исследований дальнего космоса (космос-Земля) в диапазонах 2,3 и 8,4 ГГц, обычно используются для наблюдений с помощью VLBI в радиоастрономии и для геодезии (исследования тектоники планеты). Дальний космос определяется в РР как космическое пространство на расстояниях от Земли, превышающих 2×10^6 км. Полеты в дальний космос предпринимают для изучения планет, комет, астероидов и солнечного ветра. Типичными параметрами для передач в направлении космос-Земля аппаратами из дальнего космоса являются 20 Вт для мощности передатчика и 4 м для диаметра антенны, которая обеспечивает усиление 36 дБи на 2,3 ГГц или 47 дБи на 8,4 ГГц. Для расстояния 2×10^6 км от Земли соответствующие наземные уровни плотности потока мощности составляют -148 дБ(Вт/м²) на 2,3 ГГц и -137 дБ(Вт/м²) на 8,4 ГГц. Если обратиться к главе 4, то становится ясно, что эти уровни превосходят пороговые уровни вредных помех для радиоастрономических измерений полного потока радиоизлучения. Однако уровни плотности потока мощности лежат ниже пороговых уровней вредных помех для измерений с помощью VLBI. Накопленный на настоящее время опыт подтверждает, что для конкретного случая измерений с помощью VLBI совместное использование частот для радиоастрономии и для связи с дальним космосом возможно.

Для космического аппарата с такими параметрами передатчика необходимо расстояние разнесения в 6×10^7 км, чтобы избежать вредных помех для радиоастрономических измерений полного потока радиоизлучения. Для сравнения, ближайшая из планет Венера находится на расстоянии 4×10^7 км при ее максимальном приближении. Таким образом, с учетом пороговых уровней, приведенных в главе 4, сигналы от космического аппарата из ближних районов дальнего космоса могут создавать вредные помехи для радиотелескопов, использующих эту же полосу частот на совместной основе, однако космические аппараты и полеты на дальние планеты создают весьма небольшие помехи (и направления на создающий помехи космический аппарат хорошо известны). Следует отметить, что здесь предполагается прием сигналов космического аппарата через боковые лепестки радиотелескопа с усилением не более 0 дБи.

5.9 Разделение во времени

В связи с природой явлений, наблюдаемых в радиоастрономии, только в особых условиях осуществимо проведение программ разделения по времени между радиоастрономией и активными службами, работающими в той же полосе частот. Более того, пользователи, которые предоставляют ту или иную услугу заказчикам, могут не захотеть или не смогут воспользоваться разделением по времени. В принципе разделение по времени может оказаться иногда возможным, но на практике связанные с ним проблемы скорее управленческие, чем технические.

Тем не менее ограниченное разделение по времени, которое позволило бы проводить наблюдения на радиоастрономической станции, вполне возможно и может оказаться необходимым в каких-то случаях. Особый случай замирания приемника, позволяющий проводить наблюдения в присутствии передатчиков радиолокатора, уже обсуждался в предыдущей главе. Говоря в общем, в научных целях часто бывает необходимо, чтобы радиоастрономы вели наблюдения вне полос частот, распределенных их службе, и в подобных случаях совместное использование частот в режиме распределения времени является единственным возможным вариантом. В Рекомендации МСЭ-R RA.314 признается этот факт, и администрации предлагается оказывать содействие в координации экспериментальных наблюдений спектральных линий в полосах, не распределенных для радиоастрономии.

5.9.1 Координация совместного использования полос частот и разделения во времени

Современные радиотелескопы способны вести наблюдение в очень широком диапазоне частот. Зачастую затраты на эксплуатацию телескопов превышают выделенные средства. Время работы телескопа стоит дорого, а время наблюдения является предметом жесткой конкуренции. Следовательно, радиоастрономы вынуждены добиваться максимально эффективной эксплуатации своих телескопов. Это требует, по мере возможности, адаптации частоты наблюдений к максимально благоприятным атмосферным условиям. Некоторые радиоастрономические обсерватории используют динамическое планирование. В качестве примера: радиотелескоп Грин Бэнк (GBT) Национальной радиоастрономической обсерватории США способен вести наблюдения в диапазоне 1–100 ГГц. Наблюдения на самых высоких частотах могут проводиться только в определенные моменты времени

в зимний период в условиях очень сухой атмосферы. Это время желательно использовать как можно эффективнее. Радиотелескоп Института Макса Планка в Бонне (Германия) позволяет вести наблюдения в аналогичном диапазоне частот.

Координация времени в некоторых случаях возможна даже на короткие периоды времени в связи с наличием множества каналов, используемых активными службами. Обсерватории могут предоставлять свое расписание активным службам, работающим на соответствующих полосах частот. Активные службы в некоторых случаях могут переключаться на каналы, которые не создают помех работе радиоастрономических обсерваторий. В частности, достигнута официальная договоренность о том, что если радиоастрономы намереваются вести наблюдение вне распределенных им полос частот, то подобные мероприятия должны быть одинаково доступны для всех сторон и проводиться отдельно для каждого конкретного случая. Следует отметить, что эффекты распространения волн существенно изменяются в зависимости от частоты, поэтому периоды потери данных могут в ряде случаев сокращаться путем динамического изменения расписания.

ССЫЛКИ

CCIR [1990] Report 696-2 – Feasibility of Frequency Sharing between Radio Astronomy and other Services. Doc. of the XVIIth Plenary Assembly, Düsseldorf, 1990, Annex to Vol. II, p. 568-584.

GREENHILL, L. J., KNODRATKO, P. T., LOVELL, J. E. J., KUIPER, T. B. H., MORAN, J. M., JAUNCEY, D. L. and BAINES, G. P. [2003] *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 582, L11-L14.

ГЛАВА 6

Помехи, создаваемые радиоастрономической службе передатчиками в других полосах частот

6.1 Введение

Космическое радиоизлучение, обнаруживаемое и измеряемое радиотелескопами, намного слабее сигналов, используемых активными (работающими на передачу) службами. Для измерения таких слабых сигналов приемники, используемые для проведения радиоастрономических измерений, обычно обладают максимальной чувствительностью, которой можно добиться с помощью современных радиотехнологий и доступной ширины полосы. Учитывая слабость сигналов и высокую чувствительность приемников, радиоастрономические наблюдения чрезвычайно подвержены помехам, которые могут возникать даже от передатчиков, не использующих ту же полосу на совместной основе. Такие помехи возникают от явлений, возникающих на краю полосы, от гармоник передатчиков, перекрестных искажений и т. д. Пороговые уровни помех при радиоастрономических наблюдениях, критерии защиты и ограничения, при которых возможно совместное использование частот с другими службами, обсуждались в главах 4 и 5.

Уровни сигналов, с которыми приходится иметь дело в полосах, соседних с используемыми активными службами, в широких пределах меняются в зависимости от характера службы. Кроме того, обозначения служб имеют очень общий характер и каждая из них может иметь ряд различных типов передающего оборудования. Скорее всего максимальные пиковые уровни сигнала возникают в полосах, отведенных для радиолокации и воздушной радионавигации, поскольку при этом могут использоваться радиолокаторы большой мощности на воздушных судах. Средняя плотность потока мощности таких сигналов в относительно изолированных местах расположения обсерваторий обычно превышает -100 дБ(Вт/м²). Сигналы очень высокого уровня создает также телевидение в диапазоне УВЧ.

6.1.1 Определения из Регламента радиосвязи

Приведенные ниже определения из раздела VI Статьи 1 РР полезны для обсуждения помех от передатчиков в других полосах частот.

Необходимая ширина полосы (п. 1.152 РР) – ширина полосы частот при данном классе излучения, которая достаточна для обеспечения передачи сообщений с необходимой скоростью и качеством при определенных условиях.

Внеполосное излучение (п. 1.144 РР) – излучение на частоте или на частотах, непосредственно примыкающих к *необходимой ширине полосы частот*, которое является результатом процесса модуляции, но не включает *побочные излучения*.

Побочное излучение (п. 1.145 РР) – излучение на частоте или на частотах, расположенных за пределами *необходимой ширины полосы частот*, уровень которого может быть снижен без ущерба для соответствующей передачи сообщений. К побочным излучениям относятся гармонические *излучения*, паразитные *излучения*, продукты взаимной модуляции и частотного преобразования, но не относятся *внеполосные излучения*.

Нежелательные излучения (п. 1.146 РР) – состоят из *побочных* и *внеполосных излучений*.

6.1.2 Дополнительные определения

В некоторых случаях возникает ряд исключений и изменений определений, приведенных в п. 6.1.1. Например, в Рекомендацию МСЭ-R SM.1541 включены следующие определения.

*Область побочных излучений*¹¹ (излучения) – интервал частот за пределами области внеполосных излучений (ОоВ), в котором обычно преобладают побочные излучения.

*Область ОоВ излучений*¹ (излучения) – интервал частот, расположенный непосредственно за пределами необходимой ширины полосы частот, за исключением области побочных излучений, в котором обычно преобладают излучения ОоВ.

Излучения области ОоВ – любое излучение за пределами необходимой ширины полосы, которое возникает в интервале частот, отстоящих от присвоенной частоты излучения менее чем на 250% от необходимой ширины полосы излучения, обычно считают излучением в области ОоВ. Однако такое разнесение частот может зависеть от типа модуляции, максимальной скорости передачи символов в случае цифровой модуляции, типа передатчика и факторов координации частот. Например, для некоторых систем с цифровой, широкополосной и импульсной модуляцией может возникнуть необходимость разнесения частот, отличного от коэффициента 250%.

Излучения в области побочных излучений – в рамках данной Рекомендации все излучения, включая продукты взаимной модуляции, продукты преобразования и паразитные излучения, которые имеют место на частотах, отстоящих от центральной частоты излучения на 250% и более от необходимой ширины полосы излучения, обычно рассматриваются как излучения в области побочных излучений. Однако такое разнесение частот может зависеть от типа модуляции, максимальной скорости передачи символов в случае цифровой модуляции, типа передатчика и факторов координации частот. Например, для некоторых систем с цифровой, широкополосной и импульсной модуляцией может возникнуть необходимость разнесения частот, отличного от коэффициента 250%.

Для передатчиков/ретрансляторов (многоканальных или со многими несущими), когда несколько несущих могут передаваться одновременно с выхода оконечного усилителя или активной антенны, центральная частота излучения принимается как центр выделенной для станции ширины полосы или полосы пропускания передатчика/ретранслятора по уровню –3 дБ при использовании меньшего из двух значений ширины полос.

Побочное излучение и ОоВ – побочное излучение и ОоВ обычно различаются по частоте следующим образом (см. Рекомендацию МСЭ-R SM.329-9). В соответствии с принципами, установленными в Приложении 3 РР, область побочных излучений обычно состоит из частот, отстоящих от центральной частоты излучения на 250% и более от необходимой ширины полосы излучения. Однако такое разнесение частот может зависеть от типа модуляции, максимальной скорости передачи битов в случае цифровой модуляции, типа передатчика и факторов координации частот. Например, для некоторых систем с цифровой, широкополосной и импульсной модуляцией может возникнуть необходимость разнесения частот, отличного от коэффициента $\pm 250\%$. Поскольку РР запрещает любым радиослужбам создавать вредные помехи за пределами распределенной им полосы, частоты передатчиков надо задавать так, чтобы излучения ОоВ не создавали вредных помех за пределами распределенной полосы в соответствии с п. 4.5 РР.

Или же эти $\pm 250\%$ могут относиться к разносу каналов вместо необходимой ширины полосы. В качестве примера можно привести координацию частот цифровой фиксированной службы, для которой в Рекомендации МСЭ-R F.1191 предлагается использовать интервал частот в $\pm 250\%$ разноса каналов для соответствующего расположения радиочастотных каналов в качестве границ частот между ОоВ и областью побочных излучений.

В случае очень узкой или широкой полосы частот этот метод определения области побочных излучений может не пригодиться, и дальнейшие указания приведены в Рекомендации МСЭ-R SM.1539.

¹¹ Термины "область ОоВ излучений" и "область побочных излучений" введены, чтобы исключить некоторое несоответствие, существующее в настоящее время между определениями терминов "внеполосное излучение" и "побочное излучение" в Статье 1 РР, с одной стороны, и фактическим использованием, с другой стороны, этих терминов в Приложении 3 РР (Пересм. ВКР-2012). Ограничения для ОоВ и побочных излучений относятся соответственно ко всем нежелательным излучениям в областях ОоВ и побочных излучений.

6.1.3 Механизмы создания помех передатчиками, работающими в других полосах частот

Помехи на границе полосы, т. е. помехи, создаваемые передатчиком в соседней полосе, могут возникать по трем механизмам.

- Боковые полосы модуляции могут попадать в радиоастрономическую полосу, когда спектр, излучаемый от передатчика в соседней полосе, не обрезается достаточно резко на краю полосы.
- Два или несколько сильных сигналов, воздействующих на нелинейный элемент, могут генерировать частоту биений в виде $(mf_1 \pm nf_2)$, где f_1 и f_2 – передаваемые частоты, а m и n – целые числа. Целое число $(m + n)$ называют порядком взаимной модуляции. Нелинейный элемент может находиться на выходе передатчика, во входных каскадах радиоастрономического приемника или вблизи объекта типа проржавевшего соединения на мачте или заборе в зоне с сильными электрическими полями.
- Радиоастрономический приемник может откликаться на сигналы в соседней полосе, если чувствительность приемника к частотам за пределами радиоастрономической полосы недостаточно низка.

Помехи от передатчиков в полосах, отстоящих на большее расстояние по частоте от радиоастрономической полосы, могут возникать по следующим механизмам.

- Гармоники выделенной передатчику частоты должны, вероятно, возникать в передатчике и могут излучаться с уровнем, который способен создавать помехи для радиоастрономических наблюдений.
- Взаимная модуляция между двумя сигналами, которые достаточно далеко разнесены по частоте, может генерировать третью частоту, которая также достаточно разнесена от первых двух частот.
- Использование широкополосной модуляции и методов расширения спектра может приводить к очень широким боковым полосам частот, которые, если не фильтровать выход передатчика, могут создавать сильные помехи.

И взаимная модуляция во входных каскадах приемника, и недостаточная отсечка сигнала за пределами краев радиоастрономической полосы обусловлены неадекватной конструкцией приемника. Радиоастрономические приемники должны включать достаточную фильтрацию во входных каскадах для отсечки сигналов, которые могут привести к взаимной модуляции. Они к тому же должны проектироваться с фильтрами ПЧ, способными обеспечить необходимую отсечку на краях радиоастрономической полосы, которая может достигать –100 дБ относительно центра полосы.

Вообще говоря, распределение полос, соседних с радиоастрономическими полосами, для служб, использующих передатчики большой мощности, может приводить к трудным и дорогостоящим техническим проблемам. Некоторые механизмы взаимодействия, включая механизмы с участием гармоник или боковых полос модуляции, во многом зависят от характеристик передатчика и их надо изучать отдельно для различных служб. Особую проблему для радиоастрономии составляют передачи со спутников и воздушных судов, поскольку для них обычно выполняются условия распространения в пределах прямой видимости. Службы, такие как спутниковая служба радиоопределения и служба цифровой связи, используют широкополосную модуляцию и методы расширения спектра и могут служить примерами особо вредных для радиоастрономии служб.

6.2 Предельные уровни нежелательных излучений от активных служб

6.2.1 Предельные уровни в границах области побочного излучения

Предельные уровни побочных излучений приведены в Приложении 3 РР, а также в Рекомендации МСЭ-R SM.329 (серия "Управление использованием спектра"), в которой установлены различные категории. Они включают следующее:

- предельными уровнями категории А служат величины ослабления, используемые для расчета максимально допустимых уровней мощности в области побочных излучений. Приложение 3 РР получено исходя из предельных уровней категории А;

- предельные уровни категории В служат примером более жестких ограничений для побочных излучений, чем предельные уровни категории А. Они основаны на предельных уровнях, установленных и принятых в Европе и используемых в некоторых других странах;
- предельные уровни категории С служат примером более жестких ограничений для побочных излучений, чем предельные уровни категории А. Они основаны на предельных уровнях, установленных и принятых в Соединенных Штатах Америки и Канаде и используемых в некоторых других странах;
- предельные уровни категории D служат примером более жестких ограничений для побочных излучений, чем предельные уровни категории А. Они основаны на предельных уровнях, установленных и принятых в Японии и используемых в некоторых других странах;
- категория Z – предельные уровни излучения для ПТЕ, установленные Международным специальным комитетом по радиопомехам (CISPR).

Предельные уровни приведены как максимальные уровни мощности побочных излучений, выраженные в децибелах ниже мощности, подаваемой в фидер антенны.

Для наземных служб предельные уровни категории А, которые особенно касаются радиоастрономов, определяют минимальное ослабление в $43 + 10 \log P$ дБн или 70 дБн в зависимости от того, какой уровень менее жесткий, где P – средняя мощность, подаваемая в фидер антенны. Побочное излучение для этого случая измеряют в эталонной ширине полосы 100 кГц для частот от 30 МГц до 1 ГГц и 1 МГц для частот выше 1 ГГц.

Для космических служб предельные уровни категории А определяют минимальное ослабление в $43 + 10 \log P$ дБн или 60 дБн в зависимости от того, какой уровень менее жесткий. Однако для космических служб эталонная ширина полосы, в которой измеряется побочное излучение, устанавливается равной 4 кГц, что приводит к менее жестким уровням спектральной плотности мощности, чем для наземных служб, а именно – на 14 дБ ($10 \log(4/100)$ дБ) для диапазона от 30 МГц до 1 ГГц и на 24 дБ ($10 \log(4/1000)$ дБ) для частот выше 1 ГГц.

Примером влияния побочных излучений от космических служб может служить спутник на расстоянии h м над радиоастрономической станцией, который может создать спектральную плотность потока мощности $-79 - 10 \log(4\pi h^2) + G_{SAT}$ дБ(Вт(м⁻² Гц⁻¹)), где G_{SAT} – усиление антенны спутника в направлении радиообсерватории на частоте побочного излучения. Для оценки значений побочной спектральной плотности потока мощности для частот в радиоастрономических полосах для геостационарного спутника используют высоту $h = 6,39 \times 10^6$ м и берут произвольные значения G_{SAT} , соответствующие 1 м² апертуры спутниковой антенны. Примем максимальное усиление в 40 дБ для зоны обслуживания диаметром 1400 км. Получаемые в результате значения спектральной плотности потока мощности показаны пунктирной кривой на Рисунке 6.1. Затем в качестве примера спутника на низкой околоземной орбите (LEO) возьмем высоту $h = 800$ км и снова значение G_{SAT} , соответствующее 1 м² апертуры антенны с максимальным значением 20 дБ, для которого диаметр зоны обслуживания составляет около 300 км, что составляет наименьшую из обычно используемых зон обслуживания. Полученные результаты нанесены на графике Рисунка 6.1 сплошной кривой, на которой пороговые значения помех для радиоастрономических наблюдений непрерывного спектра, установленные в Рекомендации МСЭ-R RA.769, показаны крестиками. Кривые спектральной плотности потока мощности для побочного излучения на Рисунке 6.2 соответствуют значениям для наихудшего случая, поскольку предполагалось, что полное усиление спутниковой антенны имеет место в направлении на радиоастрономическую станцию. Для упрощения также использовались расстояния до спутника в зените и не учитывалось ослабление в атмосфере и другие несущественные явления. Однако степень, в которой допустимый уровень спектральной плотности потока мощности превышает пороговые уровни вредных помех, а именно величины 20–50 дБ, четко показывает, что обычно предельные уровни побочного излучения недостаточно хорошо защищают интересы радиоастрономии. Для наземных служб предельные уровни спектральной плотности потока мощности для побочного излучения на частоте выше 1 ГГц на 24 дБ жестче, чем для космических служб, из-за различных значений эталонной ширины полосы. Расстояния до наземных передатчиков обычно меньше, чем расстояния до передатчиков космических служб, но экранирование рельефом местности может обеспечить существенную защиту. При передачах в зоне прямой видимости предельные уровни побочного излучения, опять же в большинстве случаев, недостаточны для защиты радиоастрономии.

В Рекомендации МСЭ-R SM.329, которая устанавливает предельные уровни для побочных излучений, указываются также пороговые уровни для помех радиоастрономической службе (в Приложении 3 к Рекомендации), но защита в этих пределах не обязательна, и их просто надо учитывать в конкретных случаях при создании новых систем.

6.2.2 Предельные уровни в границах области внеполосных излучений

Предельные уровни для излучений ОоВ приведены в Рекомендации МСЭ-R SM.1541. Коротко, в этой Рекомендации представлены маски излучения для многих служб, которые показывают предельные уровни в диапазоне от краев необходимой полосы до внутренних краев области побочных излучений. Эти предельные уровни менее жесткие, чем пределы для побочных излучений, но резко снижаются в сторону пределов побочных излучений на границах области ОоВ/побочных излучений. И так, эти предельные уровни снова не обеспечивают защиту радиоастрономии, и их координация должна проводиться для каждого конкретного случая отдельно.

6.2.3 Предельные уровни нежелательных излучений активных служб для защиты радиоастрономических частот

Ряд примечаний в РР направлены на защиту радиоастрономической службы от нежелательных излучений активных служб (см., например, п. **5.208А** РР). На многих ВКР были разработаны дополнительные примечания в целях усиления защиты радиоастрономической службы от существующих и вновь создаваемых активных служб.

Примечание в п. **5.443В** РР касается защиты от нежелательных излучений радионавигационной спутниковой службы (космос-Земля), работающей в полосе 5010–5030 МГц:

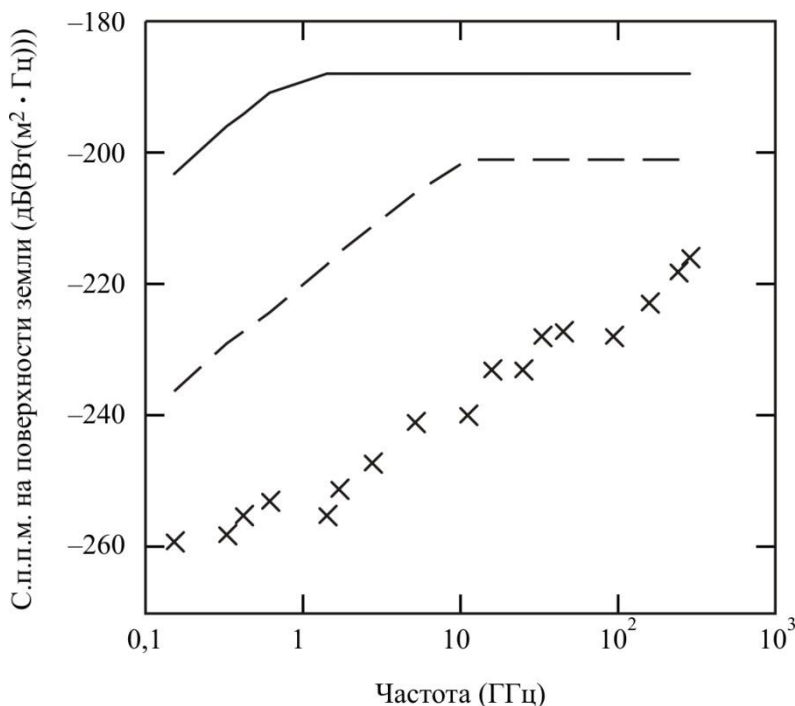
"**5.443В** ...Для того чтобы не создавать вредных помех микроволновой системе посадки, работающей на частотах выше 5030 МГц, суммарная плотность потока мощности, создаваемого у поверхности Земли в полосе 5030–5150 МГц всеми космическими станциями любой системы радионавигационной спутниковой службы (космос-Земля), работающими в полосе 5010–5030 МГц, не должна превышать – 124,5 дБ(Вт/м²) в полосе шириной 150 кГц. Для того чтобы не создавать вредных помех радиоастрономической службе в полосе 4990–5000 МГц, системы радионавигационной спутниковой службы, работающие в полосе 5010–5030 МГц, должны соблюдать ограничения в полосе 4990–5000 МГц, определенные в Резолюции **741 (Пересм. ВКР-2012)**". (ВКР-2012)

Примечания в пп. **5.511А** и **5.511F** РР касаются защиты от нежелательного излучения подвижной спутниковой службы (ПСС) (космос-Земля), работающей в полосе частот 15,43–15,63 ГГц:

"**5.511А** ...Для защиты радиоастрономической службы в полосе 15,35–15,4 ГГц суммарная плотность потока мощности, излучаемой в полосе 15,35–15,4 ГГц всеми космическими станциями в пределах фидерных линий негеостационарной системы подвижной спутниковой службы (космос-Земля), работающей в полосе 15,43–15,63 ГГц, не должна превышать уровень –156 дБ(Вт/м²) в полосе шириной 50 МГц для любого местоположения радиоастрономической обсерватории в течение более 2% времени". (ВКР-2000).

РИСУНОК 6.1

**Спектральная п.п.м. на поверхности земли
для предельных уровней побочных излучений от спутников**



Сплошная и пунктирная кривые отображают вероятные значения с.п.п.м. (на уровне земли), излучаемой спутниками на низкой околоземной и геостационарной орбитах соответственно на уровне, предельном для побочных излучений космических аппаратов. Подробности см. в тексте. Крестиками обозначены пороговые значения для вредных помех радионавигационной службе, приведенные в таблице 4.1.

Radio-Astro_61

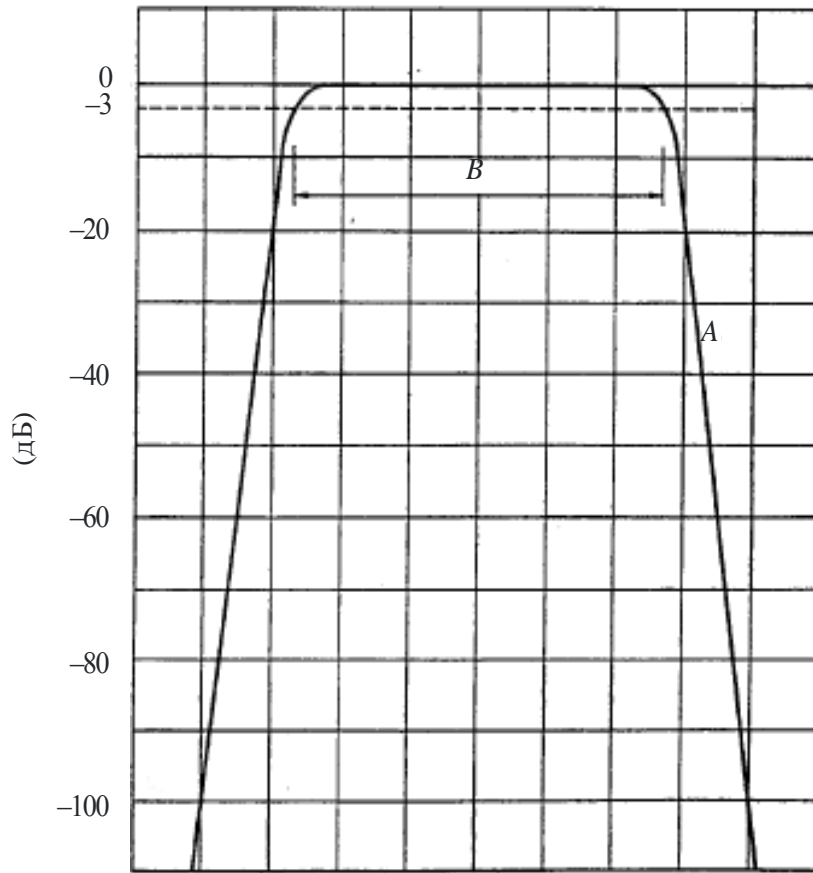
6.3 Эксплуатационные характеристики радионавигационных приемников

6.3.1 Фильтрация помех на краю полосы частот

Для расчета эффективной входной мощности P , полученной радионавигационным приемником от сигналов из соседней полосы, следует знать с достаточной точностью характеристики приемника на краю полосы. Например, рассмотрим верхний край полосы частот на Рисунке 6.2, где $-a_0$ дБ представляет собой уровень, на который снижается относительное усиление радиометра на краю полосы, а $-k$ дБ/МГц – наклон характеристики приемника в этой точке.

РИСУНОК 6.2

**Характеристики полосы пропускания приемника
для согласования с радиоастрономической полосой частот**
Полоса частот радиоастрономической службы



A – наклон $-k$ дБ/МГц

B – полоса частот половинной мощности

Radio-Astro_62

Предположим, что в пределах радиоастрономической полосы все мешающие сигналы совпадают с пороговым уровнем вредных помех в Таблице 4.1, но за пределами края полосы возникают помехи в виде равномерной спектральной плотности потока мощности S Вт/(м² · Гц). Если A – площадь сбора радиоастрономической антенны в направлении мешающего сигнала и f_0 – частота края полосы, то принятая мощность помех равна

$$P = AS \int_{f_0}^{\infty} 10^{-[a_0 + 10^{-6}k(f - f_0)/10]} df = 4,34 \times 10^{-a_0/10} AS/k. \quad (6.1)$$

Бесконечный предел в интеграле на практике соответствует времени, в течение которого помехи простираются достаточно далеко за край полосы.

Приведенный в Таблице 4.1 максимальный допустимый уровень мощности помех находится в пределах от 10^{-17} до 10^{-21} Вт для типичных значений ширины полосы при частотах выше 1 ГГц. Для непрерывного сигнала с уровнем $S = 2 \times 10^{-13}$ (Вт/м² · Гц) (типичный радиорелейный сигнал) и значения $A = 10^{-3}$ м² (изотропное усиление на частоте приблизительно 3 ГГц) уровень в 10^{-21} Вт не превышает, если, например, характеристика на краю полосы a_0 равна 102 дБ, а наклон k составляет 50 дБ/МГц. Значение k менее критично, чем a_0 , и для $k = 10$ дБ/МГц принимается тот же уровень мощности с $a_0 = 109$ дБ. Итак, характеристика радиоастрономического приемника для частот в гигагерцовом диапазоне должна составлять от -100 до -110 дБ на краю полосы относительно ее центра

и, соответственно, больше, если источник ОоВ расположен в направлении, в котором характеристика телескопа больше 0 дБи. Следует отметить, что на практике спектр службы в соседней полосе нельзя резко обрезать на краю полосы, но он должен снижаться к краю, чтобы не превышать уровня вредных помех в радиоастрономической полосе. Хотя рассмотренный случай упрощенный, он дает полезные представления о требуемой характеристике на краю полосы. Некоторые дополнительные примеры приведены в Таблице 6.1, в которой для радиоастрономической антенны предполагается изотропная характеристика.

ТАБЛИЦА 6.1
Примеры требуемой характеристики на краю полосы частот
для радиоастрономии

Служба	Принятое расстояние до передатчика (км)	Типичный средний уровень сигнала в обсерватории	Требуемая характеристика приемника на краю полосы (дБ)
Радиовещательный спутник (максимально допустимый поток)	36 000	5×10^{-18} Вт/(м ² · Гц)	от –56 до –63
Типовой радиорелейный передатчик	60	2×10^{-13} Вт/(м ² · Гц)	от –102 до –109
Радиолокатор на борту воздушного судна (средняя мощность 10 Вт)	10	10^{-8} Вт/м ²	–100
	300	10^{-11} Вт/м ²	–70

При импульсном сигнале радиолокатора влияние помех с низким коэффициентом заполнения на радиоастрономический приемник зависит от типа проводимых наблюдений и может быть не более сигнала, вызванного непрерывным сигналом с тем же уровнем средней мощности. Для характеристики на краю полосы радиоастрономического приемника, сниженной на 100 дБ, и площади сбора $A = 10^{-3}$ м², принимаемая средняя мощность не превышает 10^{-21} Вт для среднего уровня плотности потока мощности ниже 10^{-13} Вт/м². Это соответствует пиковой плотности потока мощности, равной приблизительно 10^{-9} – 10^{-10} Вт/м². Итак, характеристика на краю полосы в –100 дБ позволяет работать в присутствии сильного сигнала радиолокатора в соседней полосе. С другой стороны, могут оказаться важными явления перегрузки во время импульса, которые могут приводить к взаимной модуляции во входных каскадах приемника, как это описано ниже.

Для того чтобы получить уменьшение характеристики на краях полосы в 100 дБ относительно центра полосы, ширина фильтра в точках –3 дБ должна быть меньше ширины выделенной радиоастрономической полосы. Поскольку промежуточные частоты относительно низкие и обычно находятся в пределах от 100 МГц до 1 ГГц, возможна избирательность с относительно крутыми фронтами. Наклон краев характеристики фильтра зависит от числа секций фильтра и расчетной характеристики. Например, фильтр, обеспечивающий ширину полосы в –3 дБ для 75% полосы в –100 дБ, считается обладающим крутым фронтом. Увеличение наклона характеристики на краях полосы пропускания требует увеличения числа секций фильтра, что в свою очередь приводит к трудностям настройки фильтра и увеличивает изменение фазы с температурой. Итак, фильтрация не всегда позволяет получить простое решение проблемы помех на краю полосы. Уменьшение полезной ширины радиоастрономической полосы особенно нежелательно при наблюдениях спектральных линий, поскольку для измерения изменений частоты и ширины линий, возникающих в результате доплеровского эффекта и по другим причинам, обычно требуется вся полоса частот. Блоки цифровых многофазных фильтров обеспечивают необходимую стабильную фильтрацию с крутыми фронтами и не подвержены температурным отклонениям. Они становятся стандартными компонентами современных спектрометров.

6.3.2 Нелинейные эффекты и взаимная модуляция

Два и более сигналов, одновременно возникающих на входе приемника, но за пределами полосы пропускания приемника, за счет нелинейности начальных каскадов могут образовать сигнал в пределах полосы пропускания приемника. Наиболее важным эффектом, вероятно, является взаимная модуляция третьего порядка, при которой частоты f_1 и f_2 около края полосы пропускания создают компоненты $(2f_1 - f_2)$ или $(2f_2 - f_1)$ в полосе пропускания.

Рабочие характеристики взаимной модуляции конкретного усилителя обычно описываются точкой пересечения уровня двухчастотной взаимной модуляции третьего порядка. Это пересечение представляет собой точку, в которой на графике зависимости выходной мощности от входной мощности в логарифмическом масштабе по обеим осям пересекаются две прямые линии, описывающие характеристику полезного усилителя и характеристику взаимной модуляции. Уровень входной мощности в этой точке равен I_{IM} , для которого здесь использовано значение в -40 дБВт, характерное для малошумящего транзисторного усилителя с усилением около 30 дБ. Эффективный мешающий сигнал мощностью ΔP_H может привести к взаимной модуляции сигналов в области ОоВ мощностью P_{IM} , определяемой как

$$P_{IM} = (2I_{IM} + \Delta P_H) / 3 \quad \text{дБВт.} \quad (6.2)$$

Приняв значения ΔP_H , приведенные в Таблице 4.1, и предполагая усиление 0 дБи для приемной антенны, можно получить соответствующие значения плотности потока мощности S_{IM} . Приемлемые значения для некоторых радиоастрономических полос, распределенных на первичной основе, приведены в Таблице 6.2 с использованием указанного выше значения I_{IM} . Если плотность потока мощности на частотах вблизи радиоастрономических полос превышает эти уровни, то создаваемые в результате продукты взаимной модуляции превысят порог вредных помех в Таблице 4.1. В этом случае потребуется фильтр на входе приемника. Такое фильтрование может приводить к снижению чувствительности за счет вносимых потерь, которые на входе приемника добавляются к шумовой температуре системы. Однако последние усовершенствования фильтров с использованием сверхпроводящих материалов сделали фильтрацию на входе радиоастрономических приемников более приемлемой. Разрабатывается вариант с распределением усиления для входного усилителя и фильтра.

ТАБЛИЦА 6.2

Типичные значения принимаемой мощности и плотности потока мощности для двух сигналов равной интенсивности, которые могут приводить к помехам на уровне порога вредности из-за взаимной модуляции

Центральная частота радиоастрономической полосы (МГц)	P_{IM} (дБВт)	S_{IM} (дБ(Вт/м ²))
325,3	-94	-82
1 413,5	-95	-71
4 995	-96	-60
10 650	-94	-52
15 375	-94	-49
23 800	-92	-43
43 000	-90	-36

6.3.3 Линейность

Чтобы избежать проблем, описанных в п. 6.3.2, приемники радиотелескопов обычно проектируют так, чтобы они сохраняли общую мощность в полосе пропускания ниже уровня сжатия в 1% в любой точке цепи каскадов усиления, фильтров и т. д. от антенны до выхода приемника. Приемник, работающий в точке со сжатием 1% в присутствии сильных сигналов непосредственно за радиоастрономической

полосой, может создавать продукты взаимной модуляции низкого уровня в пределах радиоастрономической полосы. Желательно также иметь близкие к линейным характеристики приемника, поскольку это облегчает калибровку выхода по уровням входных сигналов. Желательно также иметь существенный "запас" между уровнем рабочей мощности и уровнем мощности, при котором возникает 1% сжатия, особенно в присутствии помех с меняющимся со временем уровнем. Уровень мощности в любой точке приемника меняется в зависимости от ориентации антенны и уровня помех, и обычно систему проектируют так, чтобы запас не падал до 0 дБ. Если в амплитудно-частотной характеристике доминирует квадратичный член, то точка со сжатием усиления в 1% обычно находится на 16 дБ ниже точки сжатия усиления на 1 дБ и на 26 дБ меньше уровня пересечения третьего порядка.

6.3.4 Фильтрация и оцифровка

Увеличение нелинейности систем с большим усилением можно частично регулировать с помощью использования на пути сигнала все более узких фильтров. Фильтрация может происходить в разных каскадах радиоастрономического приемника с использованием аналоговых и цифровых фильтров. Любой конкретный аналоговый каскад должен обеспечивать только соответствующее подавление для защиты линейности последующих каскадов усилителя. Для каскада i цепи сигнала можно определить следующие параметры:

- $G_i(f)$ – коэффициент усиления по мощности $P_{out}(f)/P_{in}(f)$, для каскада i в зависимости от частоты f ;
- N_i – коэффициент шума;
- P_{N_i} – общая мощность, суммированная по частоте во входном каскаде i , для которого нелинейность в пределах этого каскада приводит к сжатию усиления на 1%.

Условия для устранения нелинейности, например в пятом каскаде, следующие:

$$[P_{in}(f)G_1(f)G_2(f)G_3(f)G_4(f)df + kT] \{ [N_1(f) - 1]G_1(f)G_2(f)G_3(f)G_4(f) + [N_2(f) - 1]G_2(f)G_3(f)G_4(f) \} df < P_5, \quad (6.3)$$

где $P_{in}(f)$ – входная мощность от антенны, k – постоянная Больцмана, $T = 290$ К, и предполагается, что усиление в первых двух каскадах достаточно велико, чтобы можно было пренебречь вкладом шума в последующих каскадах.

В большинстве радиоастрономических приемников, используемых с одиночной антенной, сигналы обрабатываются в автокорреляционном устройстве для получения спектра полной мощности. Для антенных решеток сигналы обрабатываются в системе кросс-корреляции. В любом случае сигнал ПЧ оцифровывается, и последующая обработка проводится цифровыми методами. На входе аналого-цифрового преобразователя (А/Д) требуется аналоговый фильтр для устранения эффектов наложения спектров в целях введения отсечки частоты в спектре ПЧ, чтобы можно было проводить выборку при удвоенной ширине полосы сигнала, как это требуется для выборки Найквиста. Если удастся избежать нелинейности в аналоговой системе и наложения спектров из-за недостаточно высокой частоты выборки при А/Д-преобразовании, то последующую фильтрацию можно проводить цифровыми методами до каскадов автокорреляции или кросс-корреляции. Мешающие сигналы с пороговыми уровнями вредных помех, указанными в Рекомендации МСЭ-R RA.769 (и в Таблицах 4.1 и 4.2), приводят к уровням сигналов в системе ПЧ на 40–80 дБ ниже уровня, для которого возникает опасность нелинейности. Таким образом, сигналы, которые превосходят эти уровни на несколько десятков децибел, можно успешно устранить с помощью цифровых фильтров, если они находятся за пределами радиоастрономической полосы. Цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (FIR) могут обеспечивать очень резкое обрезание на краях полосы и вместе с аналоговыми фильтрами в первых каскадах обеспечивать подавление на величину свыше 100 дБ. Многофазные фильтры, в которых сигнал ПЧ свертывается с цифровым приближением sinc-функции, особенно эффективны и используются все более широко. Итак, вообще говоря, можно спроектировать радиоастрономический приемник так, чтобы он обеспечивал подавление помех, лежащих за пределами радиоастрономической полосы.

6.4 Помехи от передатчиков служб, работающих в других полосах частот

В Рекомендациях МСЭ-R RA.517 "Защита радиоастрономических служб от передатчиков, работающих в соседних полосах" и МСЭ-R RA.611 "Защита радиоастрономической службы от побочных

излучений" приведен перечень случаев, в которых передатчики, работающие в соседних и не в соседних полосах, могут создавать помехи для радиоастрономии.

6.4.1 Службы, которые могут создавать помехи для радиоастрономии из соседней полосы и через механизм генерации гармоник

Большинство активных служб, работающих в соседних с радиоастрономией полосах или на частотах, которые являются субгармониками частот радиоастрономии, могут служить источником помех для радиоастрономии. Однако вероятность возникновения таких помех от любой службы в значительной степени зависит от характера передач. Например, передачи фиксированных и подвижных служб (за исключением воздушной подвижной службы) редко создают проблемы. К службам, которые могут с наибольшей вероятностью создавать помехи за счет взаимной модуляции и влияния гармоник, относятся службы с большой выходной мощностью, такие как УВЧ-телевидение. Серьезные проблемы могут также возникать со службами, использующими передачи со спутников, в связи с распространением в пределах прямой видимости и необходимостью уменьшать вес спутников, что делает установку фильтров трудной и дорогостоящей. Методы, обеспечивающие широкий спектр в боковых полосах, такие как расширение спектра с использованием прямой последовательности без соответствующей фильтрации неиспользуемых боковых полос, могут создавать очень серьезные проблемы для радиоастрономии.

6.4.2 Переход к цифровому телевидению и его влияние на незащищенное использование радиоастрономической службой полос частот, используемых для наземного телевизионного вещания

Во всех уголках земного шара телевидение стало одним из основных средств связи. Его практическая ценность как источника новостей, развлекательной информации и информации о происшествиях очевидна со времени его появления более 60 лет назад. Наземное телевизионное радиовещание в настоящее время охватывает несколько миллиардов жителей Земли и является одним из наиболее распространенных способов использования радиочастотного спектра.

Радиоастрономическая служба и наземное телевизионное радиовещание не используют на совместной основе каких-либо распределенных полос частот, однако радиовещание, как правило, занимает спектр, крайне важный для низкочастотной астрофизики и наблюдений за нейтральным водородом с красным смещением (HI), возникшим еще на начальной стадии формирования Вселенной. В соответствии с п. 4.4 Регламента радиосвязи (RR) на данный момент радиоастрономы для проведения наблюдений используют телевизионные полосы частот.

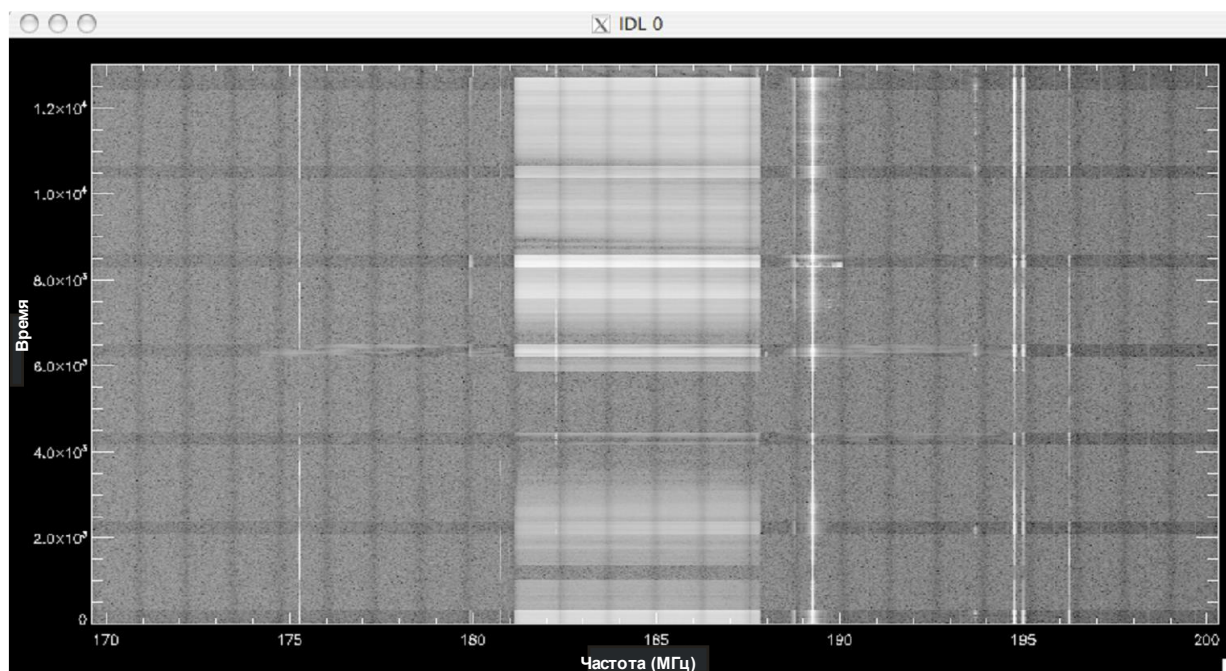
В настоящее время многие страны переходят от аналоговых на цифровые стандарты телевизионного вещания, а некоторые, помимо этого, пересматривают распределения частот радиовещательным службам в целях высвобождения спектра при помощи так называемого "цифрового дивиденда". Ожидается, что некоторые аспекты перехода к цифровому радиовещанию приведут к сокращению возможности использования радиоастрономами полос частот наземного телевизионного вещания для наблюдений, которые в настоящий момент проводятся на основе отсутствия защиты (см. Таблицу 6.3). Некоторые аспекты могут повысить возможности проведения пассивных наблюдений в телевизионных полосах.

В представленных ниже разделах кратко изложены планы перехода к цифровому радиовещанию для ряда стран мира, в которых действуют радиоастрономические программы, работающие в полосах частот наземного телевизионного вещания, а также для стран, имеющих стратегическое значение для будущих радиоастрономических станций, находящихся в настоящее время в стадии проектирования и разработки, на которых планируется использовать данные полосы частот. В настоящее время проводится обсуждение влияния правил эксплуатации цифрового телевидения на использование полос частот телевизионного радиовещания в радиоастрономии.

РИСУНОК 6.3

Пример воздействия цифровых ТВ-сигналов в сравнении с аналоговым ТВ. Спектры были получены в результате исследований на радиоастрономической станции в течение короткого периода значительного улучшения характеристик распространения радиоволн.

ТВ-сигналы излучаются источником, удаленным приблизительно на 290 км от места наблюдения



Radio-Astro_63

Цифровой сигнал в полосе 181–188 МГц "заполняет" спектр намного плотнее, чем аналоговые ТВ-сигналы, занимающие полосы 174–181 МГц, 188–195 МГц и 195–202 МГц, спектры которых сосредоточены на отдельных несущих – видео, цветности и звука.

6.4.2.1 Австралия

Австралийское правительство объявило о реализации программы перехода от аналогового к цифровому телевизионному радиовещанию. Планируется, что цифровое телевидение будет работать в существующих распределенных для служб радиовещания полосах частот: III (174–230 МГц), IV (526–582 МГц) и V (582–820 МГц). Работа австралийских наземных телевизионных радиовещательных служб планируется в растре канала 7 МГц в диапазонах ОВЧ и УВЧ. Максимальное значение э.и.м., планируемое для австралийских цифровых служб, как правило, на 6 дБ меньше, чем в службах аналогового телевидения, работающих в тех же полосах частот.

Австралийской радиоастрономической службе в этих полосах частоты не распределены, поэтому радиотелескопы размещаются в менее заселенных районах, чтобы минимизировать риск помех от различных систем радиосвязи, включая радиовещание. В настоящий момент с помощью радиотелескопа Паркс ведутся наблюдения в диапазоне 700–764 МГц в режиме отсутствия защиты от помех. Австралийский путепроисковый телескоп (ASKAP) площадью в 1 квадратный километр (SKA), запуск которого был запланирован на 2013 год, будет работать в полосе частот 700–1800 МГц. Кроме того, Австралия является потенциальным местом для размещения радиотелескопа SKA.

6.4.2.2 Бразилия

Отключение всех аналоговых наземных вещательных телевизионных передающих систем в Бразилии запланировано на 29 июня 2016 года. После перехода на цифровой режим передачи будут осуществляться в диапазоне УВЧ (470–806 МГц).

6.4.2.3 Япония

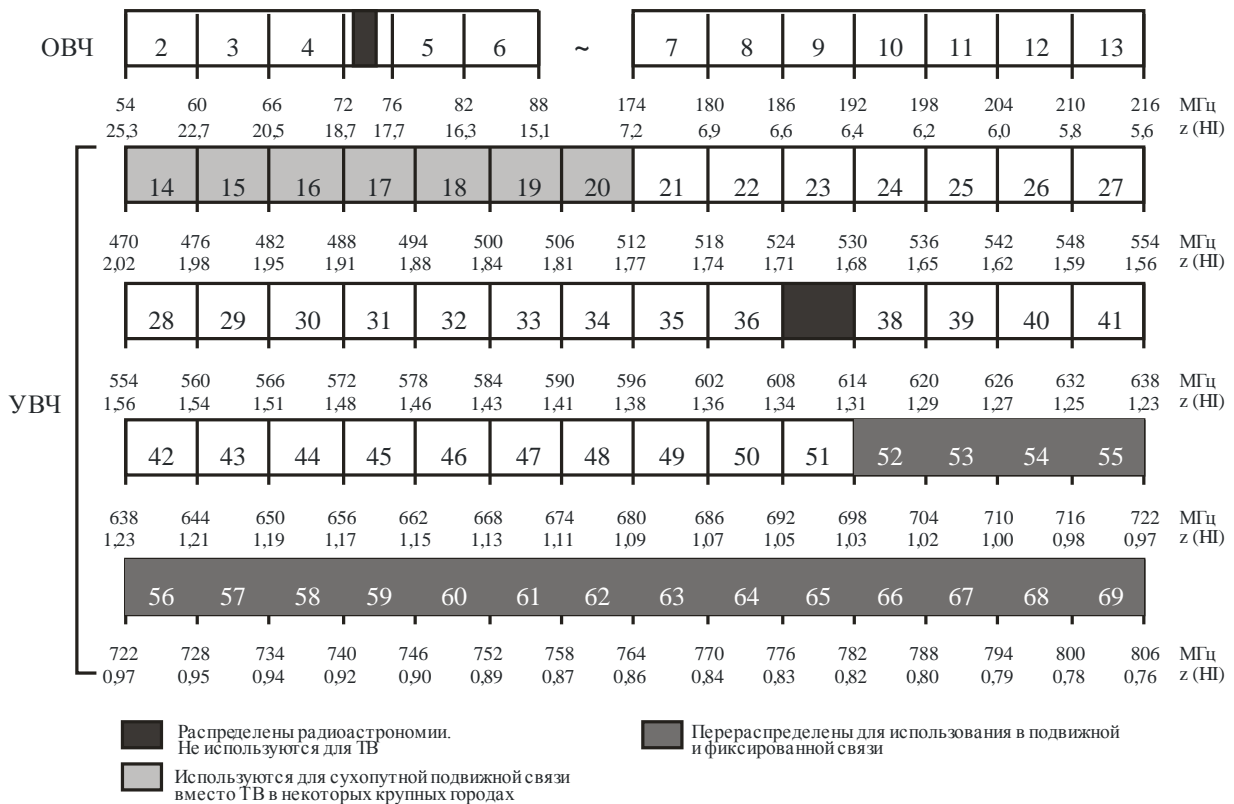
В Японии все телевизионные наземные вещательные передачи переведены в цифровой режим. Ширина каждого телевизионного канала равна 6 МГц, все телеканалы размещены в диапазоне УВЧ (470–710 МГц). Существует только одна радиоастрономическая станция (Хираисо), приемник которой работает в диапазоне частот 500–2500 МГц. Однако в Японии нет полосы частот в диапазоне 470–710 МГц, распределенной радиоастрономической службе. Следовательно, согласно п. 4.4 РР на станции Хираисо можно вести наблюдения в полосе частот в диапазоне 470–710 МГц.

6.4.2.4 Соединенные Штаты Америки

В Соединенных Штатах Америки все телевизионные вещательные передачи, предоставляющие полный комплекс услуг, к 12 июня 2009 года были переведены на цифровой стандарт Комитета по передовым телевизионным системам (ATSC). На Рисунке 6.4 изображен спектр телевизионного вещания после перехода к цифровому вещанию. Для каждого канала на рисунке указаны расширение полосы частот и соответствующий красный сдвиг z (HI) для спектральной линии водорода на частоте 1420 МГц.

РИСУНОК 6.4

Телевизионные каналы США после перехода на цифровое телевидение



Radio-Astro_64

В результате перехода 18 телевизионных каналов (52–69), занимающих участок спектра шириной 108 МГц (698–806 МГц), больше не используются для регулярного телевидения. Данный диапазон был перераспределен на первичной основе для служб фиксированной и подвижной радиосвязи и будет использоваться для систем беспроводной связи последующего поколения; для передачи видеоизображений по линиям односторонней связи непосредственно на беспроводные пользовательские устройства; и в системах связи в сфере общественной безопасности. Полоса 37-го телевизионного канала (608–614 МГц) по-прежнему распределена на первичной основе не радиовещательной, а радиоастрономической службе. Этот канал используется совместно с маломощной медицинской телеметрией и медицинскими устройствами телеуправления, работающими в той же полосе частот.

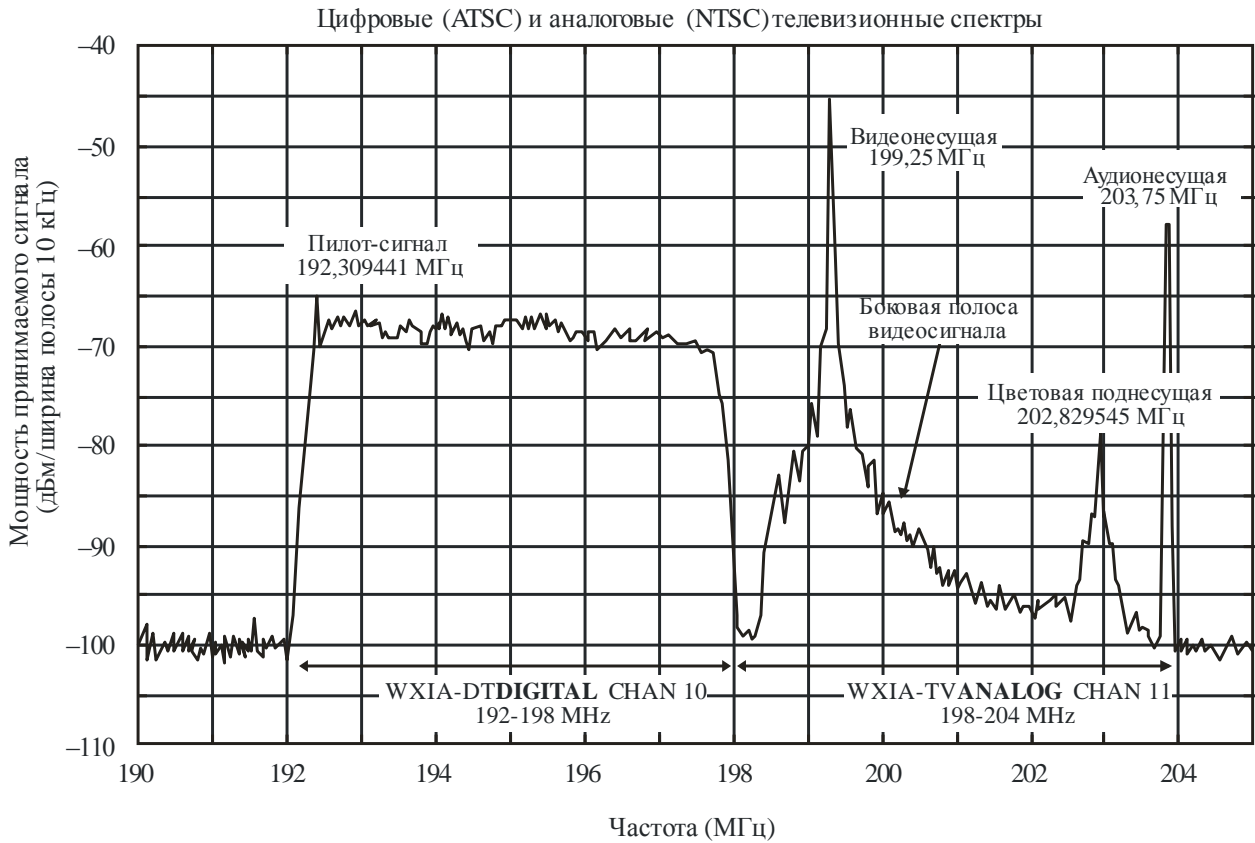
Если сравнивать с таблицей выделений аналогового телевидения, то после перехода значительно меньшее количество станций ЦТВ будут занимать нижнюю часть диапазона ОВЧ. В целом это повышает возможности использования полос частот 54–72 МГц и 76–88 МГц для незащищенных радиоастрономических наблюдений. Однако это зависит главным образом от близости станций, работающих в каналах 2–6, к конкретной радиоастрономической станции.

Для цифровых телевизионных систем требуется несколько меньшая суммарная передаваемая мощность, чем для покрытия прежней зоны вещания аналогового телевидения (для ОВЧ – в 2 раза, а для УВЧ – в 5 раз). Кроме того, ограничения на нежелательные излучения от цифровых телевизионных станций определены более четко. При удалении более чем на 6 МГц от границы полосы затухание должно составлять по крайней мере 110 дБ.

На Рисунке 6.5 приведено непосредственное сравнение аналогового сигнала NTSC и соответствующего цифрового сигнала ATSC, передаваемых одной и той же станцией и той же мачтой, с использованием соседних телеканалов.

РИСУНОК 6.5

Непосредственное сравнение эквивалентных телевизионных спектров – цифрового ATSC (слева) и аналогового NTSC (справа), передаваемых одновременно одной и той же станцией с той же мачтой

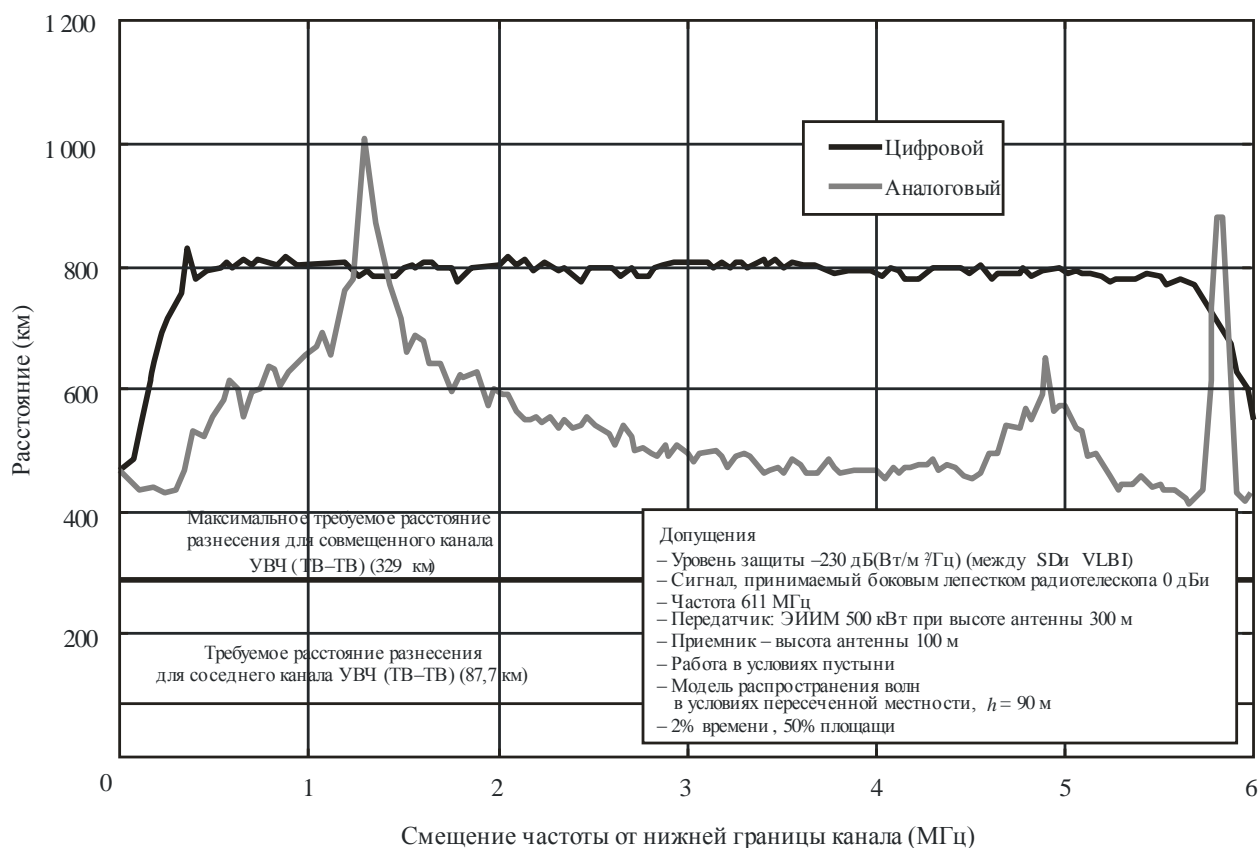


Radio-Astro_65

Несмотря на то что мощность цифрового сигнала несколько меньше мощности аналогового сигнала, последний в значительной степени сосредоточен в несущих частотах трех компонентов. Для более чем 94% ширины спектра спектральная плотность мощности цифрового сигнала превышает соответствующий показатель аналогового сигнала в 1100 раз (> 30 дБ). В связи с этим предполагается, что по завершении перехода к цифровому телевидению цифровой сигнал отдельно взятой ТВ-станции усложнит гибкое использование рассматриваемой полосы частот в радиоастрономических целях по сравнению с аналоговым сигналом, использовавшимся ранее на данной станции. В качестве иллюстрации на Рисунке 6.6 приведено сравнение расчетного разнесения аналогового и цифрового ТВ-сигналов, необходимого для соответствия уровням вредных помех, приведенным в Рекомендации МСЭ-R RA.769.

РИСУНОК 6.6

Минимальное расстояние разнесения между цифровой и аналоговой телевизионными станциями, необходимое для соответствия уровням помех радиоастрономической службе при заданных допущениях



Radio-Astro_66

Данные по цифровому ТВ взяты из Отчета МСЭ-R RA.2195, где представлена более подробная информация.

6.4.3 Помехи от передач со спутников

Передача со спутников может создавать сильные помехи для службы РАС. Если наземные источники помех обычно находятся в области дальних боковых лепестков антенны радиотелескопа и могут дополнительно затухать за счет рельефа вокруг радиобсерватории, то помехи от спутниковых передач могут приниматься через внутренние боковые лепестки с существенно более высоким усилением. Характер помех зависит от типа передатчика и службы, обеспечиваемой системой, от того, находится ли спутник на геостационарной или негеостационарной орбите, а также от количества спутников в рассматриваемой системе, которые находятся выше горизонта радиобсерватории. Необходимо отметить, что проблемы помех, связанных с передачами со спутников, также относятся в большой степени и к передачам с воздушных судов.

6.4.3.1 Геостационарные спутники

Почти со всех работающих в настоящее время радиотелескопов видно множество геостационарных спутников, которые занимают геостационарный спутниковый пояс по всему небосводу. Радиус геостационарной орбиты приблизительно в 6,6 раза больше радиуса Земли. На таком расстоянии один спутник может облучать сигналами треть поверхности Земли и, следовательно, многие радиотелескопы, находящиеся в пределах прямой видимости. На Рисунке 4.3 показано положение пояса геостационарных спутников в звездных координатах, видимых с широт некоторых основных

радиоастрономических обсерваторий. Планы развития некоторых активных служб требуют большого числа геостационарных спутников. Такая серия возможных источников помех, которые могут приниматься через ближние боковые лепестки диаграммы направленности антенны радиотелескопа, может создавать чрезвычайные трудности для радиоастрономии.

Пороговые уровни вредных помех для радиоастрономии приведены в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Там перечислены уровни мощности (для каждой радиоастрономической полосы), попадающей в приемник, которая как раз достаточна, чтобы вызвать вредные помехи. Там же приведена плотность потока мощности (дБ(Вт/м²)), вызывающая вредные помехи, которые рассчитываются в предположении, что усиление радиотелескопа равно 0 дБи в направлении создающего помехи источника. Такое усиление подходит для рассмотрения наземных источников помех, находящихся вблизи горизонта. В случае геостационарных источников возникает другая ситуация.

Если предположить, что радиоастрономическая антенна обладает характеристиками боковых лепестков, принятыми в Рекомендации МСЭ-R SA.509, то усиление бокового лепестка соответствует 0 дБи для угла 19° от оси основного лепестка. Для такой антенны уровень вредных помех будет превышен, если основной лепесток ориентирован в пределах 19° от спутника, который создает в границах ширины полосы радиоастрономии плотность потока мощности в месте расположения радиообсерватории, равную пороговому уровню вредных помех в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Серия спутников, разнесенных с интервалом около 30° вдоль орбиты геостационарных спутников, излучающих помехи на этом уровне, создаст зону шириной около 38° с центром на орбите, в которой станут невозможны радиоастрономические наблюдения, свободные от вредных помех. Ширина этой запрещенной зоны увеличивается с количеством создающих помехи спутников на орбите и может, в принципе, покрыть весь небосвод. Эффективное число создающих помехи спутников зависит от того, направляются ли мешающие сигналы передающими антеннами спутников или излучаются в более широком секторе. Излучение ОоВ, которое нешироко разнесено от частоты передатчика спутника, может направляться антенной так же, как и основной сигнал. Нежелательные излучения типа гармоник, которые дальше отнесены по частоте, могут передаваться в более широком секторе, но их легче устранить с помощью фильтрации в передатчике.

Очевидно, для решения проблемы помех от геостационарных спутников необходим компромисс между площадью небосвода, потерянной для радиоастрономических наблюдений, и трудностями подавления нежелательных излучений от спутниковых передатчиков. Анализ Рисунка 4.3 показывает, что положение геостационарной орбиты на небосводе, если смотреть с Земли, меняется приблизительно на 10°, если переходить от обсерватории в одном полушарии к обсерваториям в другом полушарии. Таким образом, если наблюдения проводятся в пределах 5° от геостационарной орбиты, то каждую точку небосвода можно наблюдать по крайней мере из одной существующей обсерватории при условии, что она имеет необходимое оборудование для таких наблюдений. Желательность снижения побочных излучений, чтобы позволить проводить радиоастрономические наблюдения в пределах 5° от геостационарной орбиты, обсуждается в главе 4.

Это рассмотрение излучений от геостационарных спутников основано на предположении, что орбиты находятся в экваториальной плоскости Земли. Однако для целей координации частот под определение геостационарных спутников подпадают все геосинхронные спутники с углами наклона менее 15°. Влияние наклона орбиты на проблему координации частот для радиоастрономии зависит от распределения углов наклона спутников, которые могут быть источниками помех.

6.4.3.2 Негеостационарные спутники

Возможность вредных помех от спутников на негеостационарных орбитах (LEO) увеличивается в связи с их большим количеством, в результате чего многие из них могут одновременно находиться над горизонтом радиообсерватории и в пределах прямой видимости антенны радиотелескопа. При этом антенна радиотелескопа может принимать нежелательные излучения от этих видимых негеостационарных спутников LEO через ближние и дальние боковые лепестки диаграммы направленности антенны, а также через главный лепесток. Проблема помех осложняется постоянно меняющимся направлением прихода мешающих сигналов и необходимостью слежения с помощью антенны радиотелескопа за наблюдаемым звездным источником. Множество входных сильных

сигналов могут сдвинуть рабочую точку приемника в нелинейный диапазон, что приведет к генерации продуктов взаимной модуляции.

Воздействие нежелательных излучений, возникающих на радиоастрономических станциях за счет созвездия спутников на (низких) негеостационарных орбитах, можно определить с помощью методики эквивалентной плотности потока мощности, описанной в Рекомендации МСЭ-R S.1586 "Расчет уровней нежелательных излучений, создаваемых негеостационарной системой фиксированной спутниковой службы в местах расположения радиоастрономических станций" или в Рекомендации МСЭ-R M.1583 "Расчет помех между негеостационарными системами подвижной спутниковой или радионавигационной служб и местами расположения радиоастрономических телескопов", а также с помощью усиления антенны, приведенного в Приложении 1 к главе 4.

Эти Рекомендации можно использовать для определения процента потерь данных во время наблюдений, проводимых на конкретной радиоастрономической станции, за счет помех от определенной спутниковой системы. Максимальный допустимый процент потери данных приведен в Рекомендации МСЭ-R RA.1513.

6.4.3.2.1 Пример нежелательных излучений, создаваемых фиксированной спутниковой службой

Полоса 10,6–10,7 ГГц распределена для службы РАС на первичной основе, а подполоса 10,68–10,7 ГГц распределена исключительно для пассивных служб (к этому вопросу относится примечание в п. **5.340** РР, в нем перечислен ряд полос, в которых запрещены любые излучения).

Эта полоса успешно использовалась для наблюдения непрерывного радиоспектра галактического и внегалактического радиоизлучения, включая исследование поляризации, и для изучения пульсаров.

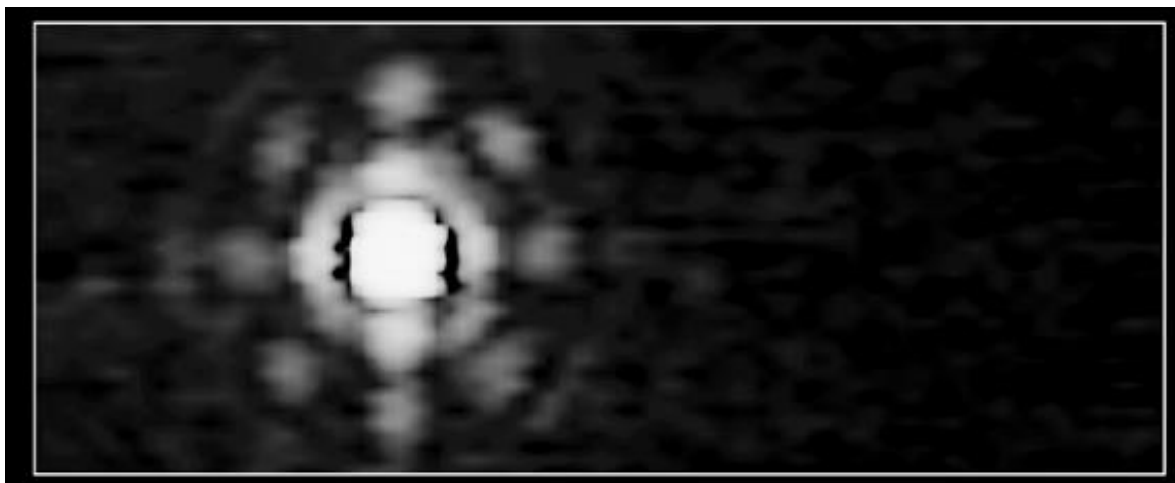
Полоса 10,7–11,7 ГГц распределена ФСС на первичной основе. Использование полос 10,7–10,95 ГГц (космос-Земля) и 11,2–11,45 ГГц (космос-Земля) геостационарными системами ФСС соответствует положениям статьи 10 Приложения **30В** РР.

Ниже описан случай помех работе РАС, причиняемых конкретной геостационарной спутниковой системой ФСС.

На Рисунке 6.7 показаны результаты измерений РАС в диапазоне 10,6 ГГц, проведенных в Эффельсберге радиотелескопом диаметром 100 м, который был направлен на один из самых сильных точечных космических радиоисточников 3С84. Эти измерения проводились до 1995 года. Наблюдаемое поле имеет размер 30×12 дуговых минут, плотность потока от источника составляет $20,5 \text{ Ян}$ ($\sim -247 \text{ дБ(Вт(м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}))}$). Наблюдаемая структура соответствует данным, полученным с помощью главного лепестка и ближних боковых лепестков радиотелескопа.

РИСУНОК 6.7

Карта внегалактического источника 3С84 в полосе 10,6–10,7 ГГц, полученная с помощью радиотелескопа в Эффельсберге диаметром 100 м



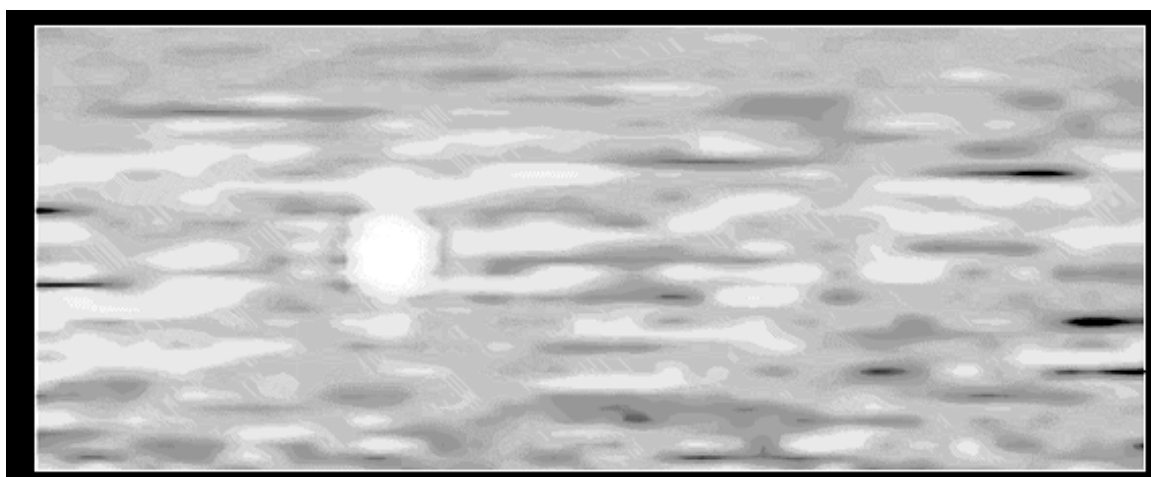
Radio-Astro_67

Затем в 1995 году был введен в действие геостационарный спутник ФСС с определенной позицией на орбите, в которой уже некоторое время работали другие спутники. Спутник имел низкую центральную частоту передачи в 10,714 ГГц и ширину полосы ретранслятора в 26 МГц. Возникающие флуктуации шума, создаваемые нежелательными излучениями ФСС от этой позиции на орбите в соседней полосе РАС 10,6–10,7 ГГц, были настолько сильными, что они полностью маскировали любые астрономические сигналы.

На Рисунке 6.8 показана последующая карта для того же поля в 30×12 дуговых минут на небосводе, что и на Рисунке 6.7, но после ввода в эксплуатацию спутника в 1995 году, чья позиция на орбите была смещена на 10° от картируемого поля небосвода. Очень сильный точечный источник 3С84 утонул в помехах, и его больше нельзя было различить как космический источник.

РИСУНОК 6.8

Карта того же поля небосвода, что и на Рисунке 6.7, но с помехами, принятыми радиотелескопом в Эффельсберге



Radio-Astro_68

Для исследования этого случая помех станция слежения за спутниками Регламентарного органа Германии в Лихейме измерила спектр передачи ФСС от спутника на заданной позиции на орбите (см. Рисунок 6.8), чтобы определить уровень нежелательных излучений в полосе РАС. Однако необходимо отметить, что чувствительность и динамический диапазон станции слежения в то время были недостаточны для проверки помех на уровнях, которые установлены в качестве критериев защиты для РАС в Рекомендации МСЭ-R RA.769.

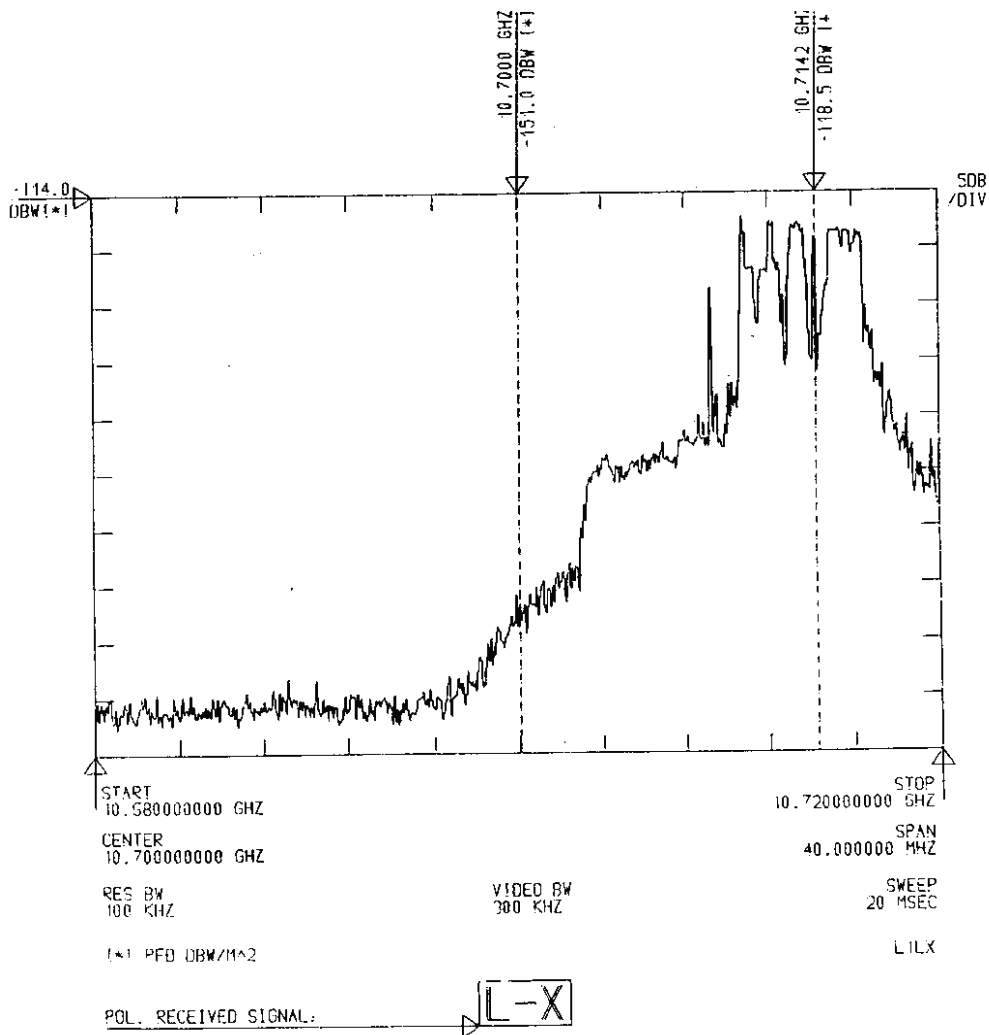
Из Рисунка 6.9 видно, что на краю диапазона 10,7 ГГц, распределенного для РАС для исключительно пассивного использования, измеренный уровень нежелательных излучений составил -151 дБ(Вт/м²) в эталонной ширине полосы 100 кГц. Это соответствует -201 дБ(Вт/(м² · Гц)), а в Рекомендации МСЭ-R RA.769 в качестве порога помех указывается уровень на 39 дБ меньше, т. е. -240 дБ(Вт/(м² · Гц)). Более того, для геостационарных спутников желательно использовать на 12–15 дБ более жесткие пределы, как это обсуждалось в п. 4.7.3. Такое большое расхождение возникает у верхнего края полосы 10,6–10,7 ГГц, и оно меньше в остальной полосе.

От края диапазона 10,7 ГГц приблизительно до 10,69 ГГц, где мешающий сигнал достигает уровня собственного шума станции слежения в Лихейме (плотность потока мощности ~ -160 дБ(Вт/м²)), спад сигнала составляет порядка 10 дБ на 4 МГц. Если предположить, что скорость спада остается неизменной до 10,6 ГГц, то расчетная общая мощность, излучаемая с этой позиции на орбите в полосе 10,6–10,7 ГГц, составит $-145,6$ дБ(Вт/м²), что на 14,4 дБ выше порога в -160 дБ(Вт/м²), приведенного в Рекомендации МСЭ-R RA.769 для этой полосы. Итак, вся полоса 10,6–10,7 ГГц оказывается совершенно непригодной для использования при радиоастрономических наблюдениях, как видно из Рисунка 6.8.

Это спутник ФСС был перемещен в другое исходное положение и больше не оказывает влияния на наблюдения при помощи телескопа в Эффельсберге.

РИСУНОК 6.9

**Измерения помех от геостационарной ФСС,
проведенные на станции слежения в Лихейме (1995 год)**



Radio-Astro_69

6.4.3.3 Возможные случаи гармонических помех от спутников

6.4.3.3.1 Излучение второй гармоники в полосе 23,6–24,0 ГГц от радиовещательных спутников

Возможным источником помех для радиоастрономии служит излучение второй гармоники радиовещательными спутниками в полосе от 11,7 до 12,5 ГГц. Диапазон, занимаемый гармониками от 23,4 до 25,0 ГГц, охватывает исключительно пассивную полосу от 23,6 до 24,0 ГГц. Для Районов 1 и 3 в Дополнении 3 к Приложению 30 РР приведены минимальные значения плотности потока мощности для отдельного приема в полосе от 11,7 до 12,5 ГГц, равные -103 дБ(Вт/м²) на краю зоны покрытия, и плотность потока мощности в центре зоны покрытия должна составлять, как правило, -100 дБ(Вт/м²). Эти значения плотности потока мощности применимы к каждому каналу радиовещательной спутниковой службы. Общая плотность потока мощности в полосе 11,8–12,0 ГГц может достигать значения -91 дБ(Вт/м²).

Согласно Таблице 4.1 вредные для радиоастрономии помехи возникают для сигналов, превышающих -147 дБ(Вт/м²) в ширине полосы 400 МГц на 24 ГГц. При усилении бокового лепестка радиоастрономической антенны 0 дБи требуемое подавление второй гармоники получается равным 56 дБ, и его можно получить с помощью принятых методов проектирования.

6.4.3.3.2 Излучение второй гармоники вблизи 22,2 ГГц от фиксированной спутниковой службы

Ситуация, подобная обсуждаемой в п. 6.4.3.2.1, возникает для радиоастрономического диапазона паров воды на 22,2 ГГц, но разрешенная плотность потока мощности на Земле от передатчиков фиксированной спутниковой службы ниже, чем для радиовещательной спутниковой службы, и, соответственно, возникают меньшие проблемы помех. Это также относится к пассивным полосам 15,35–15,4 ГГц и 164–168 ГГц, в которые также попадают вторые гармоники частот, распределенных для передач космос-Земля.

6.4.3.3.3 Излучение второй гармоники в полосе 4990–5000 МГц от спутниковой службы радиоопределения и подвижной спутниковой службы

Полоса 2483,5–2500 МГц распределена спутниковой службе радиоопределения и подвижной спутниковой службе для передач по линии вниз со спутников к устройствам пользователей. Вторые гармоники таких передач попадают в радиоастрономическую полосу 4990–5000 МГц на всемирной первичной основе (4950–5000 МГц в Австралии, Аргентине и Канаде). Пороговый уровень вредных помех для радиоастрономии в полосе 4990–5000 МГц из Таблицы 4.1 составляет -171 дБ(Вт/м²).

6.4.3.3.4 Излучение третьей гармоники в полосе 1400–1427 МГц от метеорологической спутниковой службы

Некоторые метеорологические спутники используют полосу 460–470 МГц для опроса платформ на Земле в целях получения данных и последующей их ретрансляции в центры сбора данных. Третья гармоника таких передач выше 466 МГц попадает в радиоастрономическую полосу 1400–1427 МГц. Для этих передач используются мощности до 40 Вт. Если предположить, что передающая третья гармонику антенна с усилением 0 дБи находится на геостационарном спутнике, то плотность потока мощности в подспутниковой точке на Земле составит -146 дБ(Вт/м²). Для приема в боковых лепестках радиоастрономической антенны с 0 дБи требуется подавление этой гармоники не менее -34 дБ относительно мощности передачи на основной гармонике.

6.5 Нежелательные излучения от широкополосной модуляции

См. Рекомендацию МСЭ-R RA.1237 "Защита PAC от нежелательных излучений, возникающих при применении широкополосной цифровой модуляции".

6.5.1 Применение широкополосной модуляции

В определенных типах передач, часто связанных с цифровыми данными, генерируются спектральные боковые полосы в гораздо более широком диапазоне частот, чем используемый для приема сигналов. В частности, в методах цифровой манипуляции с фазовым сдвигом получается спектр мощности в форме $[\sin(\pi x)/\pi x]^2$ с повторяющимися дополнительными максимумами за пределами желательной полосы, которые лишь медленно спадают с частотой. Хотя, вообще говоря, для приема соответствующая служба использует только центральный максимум спектра, иногда боковые полосы излучаются без эффективной фильтрации. Например, огибающая нефильтрованных боковых полос на десятикратном расстоянии от центральной частоты в ширине спектральной полосы -3 дБ уменьшается всего на 29 дБ ниже уровня мощности в центральном максимуме. Если к тому же частота манипуляции передачи при двоичной фазовой манипуляции (BPSK) равна 10–20 МГц, то десять значений ширины полосы простираются на несколько сотен мегагерц вокруг присвоенной частоты. Рассмотрим, например, простой передатчик BPSK без фильтрации с частотой манипуляции 10 МГц с центром 1615 МГц и выходной мощностью 40 Вт, излучаемой изотропной антенной, которая смонтирована на воздушном судне. На расстоянии прямой видимости в 400 км от обсерватории нежелательные боковые полосы обусловят уровень плотности потока мощности в спектральном максимуме в радиоастрономической полосе 1400–1427 МГц, превышающей на 48 дБ соответствующий пороговый

уровень вредных помех из Таблицы 4.1. Излучение в полосах 1610,6–1613,8 МГц и 1660–1670 МГц, которые также распределены радиоастрономии, будет иметь существенно более высокий уровень.

Манипуляция PSK также используется для модуляции с расширением спектра по методу прямой последовательности. Обычно для большинства способов расширения спектра характерно использование широкополосного сигнала с низкой спектральной плотностью мощности. Такая характеристика снижает вероятность возникновения помех от таких передач для обычных узкополосных систем связи, для которых важно только восстановление модуляции из сигнала. В отличие от этого, в радиоастрономии требуется точное измерение мощности, полученной от естественных источников. Обычно космические радиоволны имеют характеристики случайного шума, и часто приходится использовать более широкую полосу пропускания приемника для обеспечения требуемой чувствительности. Поэтому часто не существует способа отличить сигналы расширенного спектра от космических сигналов. Пороговые уровни вредных значений плотности потока мощности, причиняющие помехи радиоастрономии и рассмотренные в главе 4, применимы как для нежелательных, так и для преднамеренных излучений, а также ко всем типам модуляции, включая обсуждавшиеся выше.

6.5.2 Формирование импульсов для снижения нежелательных излучений

Уровни нежелательных излучений от цифровой модуляции могут быть значительно снижены с помощью формирования импульсов, т. е. с помощью использования форм импульсов без резких, почти прямоугольных изменений амплитуды или фазы. Теорема преобразования Фурье указывает, что если форма импульса в зависимости от времени становится импульсной для n -й производной, то тогда спектр мощности боковых полос снижается обратно пропорционально частоте в степени $2n$. В случае прямоугольных импульсов во временном интервале первая производная ($n = 1$) функции формы импульса оказывается импульсной, и боковые полосы снижаются как f^{-2} , как для упомянутой выше формы. В качестве примера формирования импульса рассмотрим импульсы, для которых прямоугольные изменения единичной амплитуды заменены $[1 + \sin(x)]/2$, где x линейно меняется от $-\pi/2$ до $\pi/2$ для положительных переходов и от $\pi/2$ до $-\pi/2$ для отрицательных. Получающаяся форма импульса оказывается импульсной для третьей производной, и поэтому спектр мощности снижается как f^{-6} . Этот результат был получен в [Ponsonby, 1994]. Итак, например, на частоте, на которой огибающая спектра мощности падает до -20 дБ относительно максимума для прямоугольных импульсов, она снизится до -60 дБ при описанном синусоидальном формировании. Этот результат очень полезен, поскольку намного сокращается спектральный диапазон, в котором вызванное модуляцией нежелательное излучение может оказаться вредным для радиоастрономии. Описано множество других практических способов формирования импульсов для снижения нежелательных излучений, например гауссова минимальная манипуляция (GMSK) [Murota and Hirade, 1981; Otter, 1994].

Использование методов модуляции, направленных на сведение к минимуму нежелательных излучений, может дать эффект только в случае, если каскады усилителя мощности после модулятора достаточно линейны, чтобы избежать генерации нежелательных излучений в виде составляющих взаимной модуляции. Эта проблема относится в особенности к спутниковым передачам, для которых ограничения электрической мощности могут привести к необходимости максимального повышения эффективности передатчика за счет линейности. На некоторых спутниках связи используют несколько разных лучей для передач на линиях вниз, чтобы можно было повторно использовать частоту. Эти лучи формируются с помощью соответствующей фазировки большого количества излучающих элементов, для каждого из которых применяют свой усилитель мощности. В таких случаях не всегда оказывается удобной фильтрация усиленных сигналов для устранения нежелательных излучений.

6.5.3 Пример помех от широкополосной модуляции

Серия GLONASS спутников радиоопределения [Daly, 1988; Ponsonby, 1991] стала с середины 1980-х годов источником помех для радиоастрономических наблюдений в полосах 1610,6–1613,8 МГц и 1660–1670 МГц [Galt, 1990]. Полностью развернутая система включает 24 спутника с тремя плоскостями орбит. Сначала планировали использовать 24 канала передачи с центральными частотами, разнесенными с интервалами 0,5625 МГц от 1602,5625 до 1615,5 МГц. Спутники создают помехи в каналах, расположенных достаточно далеко от радиоастрономических полос, за счет боковых

полос, возникающих при модуляции с расширением спектра. Частотный спектр боковых полос имеет структуру с интервалами повторения в 0,511 и 5,11 МГц, возникающую за счет частот манипуляции, соответственно для кодовой модуляции низкой и высокой точности. Основная структура боковых полос представляет собой последовательность максимумов, разнесенных на 5,11 МГц, и узких выбросов на частоте, которая возникает в некоторых нулях. Некоторые нулевые выбросы обнаруживаются на частотах, удаленных от канала передачи на такое расстояние, что появляются в радиоастрономической полосе 1660–1670 МГц.

Администрация GLONASS провела серию испытаний в сотрудничестве с IUCAF в ноябре 1992 года. Спутники, использующие каналы передачи вблизи полосы 1610,6–1613,8 МГц, были сдвинуты по частоте или поэтапно выключены. В оценке влияния таких изменений системы GLONASS на качество астрономических данных помогали пятнадцать обсерваторий по всему миру. Оценка результатов послужила основой для официальных соглашений между администрацией GLONASS, IUCAF и правительствами некоторых государств, рассматривающих комплексное решение проблемы помех от GLONASS в радиоастрономических полосах. Это решение состоит в следующем:

- снижение количества необходимых частотных каналов с помощью использования того же канала для спутников в противоположных полушариях;
- смещение вниз отведенных для каналов частот от радиоастрономической полосы; и
- применение фильтрации выше первого нуля в расширенном спектре канала с самой высокой частотой.

Со времени соглашения GLONASS–IUCAF не было запущено ни одного космического аппарата с использованием частот выше 1610 МГц, и все они имели фильтры ОоВ; после 1999 года основные излучения в радиоастрономическом диапазоне 1612 МГц были устранены. Соглашение между GLONASS и IUCAF официально признано в Регламенте радиосвязи. В Таблице 1-2 Приложения к Резолюции 739 (Пересм. ВКР-2007) говорится: "Эта Резолюция не применяется к существующим и будущим присвоениям радионавигационной спутниковой системы GLONASS/GLONASS-M в полосе 1559–1610 МГц, независимо от даты получения соответствующей информации для координации или заявления, в зависимости от случая. Защита радиоастрономической службы в полосе 1610,6–1613,8 МГц обеспечивается и будет поддерживаться в дальнейшем в соответствии с двусторонним соглашением между Российской Федерацией, администрацией, заявляющей систему GLONASS/GLONASS-M, и IUCAF, а также последующими двусторонними соглашениями с другими администрациями".

6.5.4 Пример. Радиопомехи, создаваемые системой подвижной спутниковой связи IRIDIUM (HIBLEO-2)

Данный раздел сформирован на основе Отчета ECC 171, в котором приведена подробная информация о методике и измерениях.

6.5.4.1 Работа радиоастрономической службы (РАС) в полосе частот 1610,6–1613,8 МГц

Полоса частот 1610,6–1613,8 МГц распределена радиоастрономической службе на первичной основе. Она используется для наблюдений спектральной линии гидроксильного радикала (ОН). Переход ОН на собственной частоте 1612 МГц является одной из наиболее важных спектральных линий для службы РАС. В данном качестве радикал ОН указан в Рекомендации МСЭ-R RA.314. Это был первый радикал космического происхождения, обнаруженный на радиочастотах (в 1963 году), и до сих пор служит мощным инструментом для проведения исследований. В основном состоянии молекула ОН создает четыре спектральные линии на частотах приблизительно 1612, 1665, 1667 и 1720 МГц, каждая из которых наблюдалась при излучении и поглощении в нашей Галактике, а также во внешних галактиках. Исследование линий ОН позволяет получить информацию по широкому спектру астрономических явлений, в частности по формированию протозвезд и эволюции звезд. Интерпретация большинства наблюдений по молекуле ОН требует измерения относительной интенсивности нескольких из этих линий. Потеря возможности наблюдения какой-либо из этих линий станет препятствием для исследования данных видов физических явлений.

6.5.4.2 Описание группировки IRIDIUM

Подвижной спутниковой службе (Земля-космос) распределена полоса частот **1610,0–1626,5 МГц**, а подвижная спутниковая служба (космос-Земля) имеет распределение **на вторичной основе** в полосе частот **1613,8–1626,5 МГц**. В примечании **5.208В** сказано, что Резолюция **739** (ВКР-2007) применяется для будущих систем, запланированных для данной полосы частот.

В системе IRIDIUM используются 66 спутников, находящихся на низкой околоземной орбите (LEO) и поддерживающих соединения "пользователь–пользователь", "пользователь-шлюз" и "шлюз-шлюз". В шести орбитальных плоскостях равномерно распределены 66 спутников с наклоном $86,4^\circ$. В каждой орбитальной плоскости имеется один резервный орбитальный аппарат. За исключением плоскостей 1 и 6, орбитальные плоскости вращаются в одном направлении с разносом $31,6^\circ$. Первая и последняя орбитальные плоскости разнесены на 22° и образуют слой, в котором спутники вращаются в противоположных направлениях. Спутники вращаются на орбите высотой 780 км, период которой составляет приблизительно 100 мин 28 с.

Они соединяются со специальной аппаратурой подвижной связи на Земле и в воздухе в полосе частот 1618,25–1626,5 МГц и предоставляют услуги глобальной связи, доступные в любой точке нашей планеты.

6.5.4.3 Происхождение и характеристики помех спутника "IRIDIUM"

Теоретические прогнозы, сделанные в 1998 году при помощи спутниковой группировки IRIDIUM (HIBLEO-2) в искусственно созданных условиях полной загрузки, приведены в Приложении 6 Рекомендации МСЭ-R SM.1633 (2003 год).

4.2 Вычисление уровня помех

Нежелательные излучения в контексте общей величины $spfd$ спутниковых передач системы HIBLEO-2 в полосе частот 1610,6–1613,8 МГц теоретически оцениваются в диапазоне между -214 дБ(Вт/(м²/Гц)) и -223 дБ(Вт/(м²/Гц)) на некоторых радиоастрономических станциях при условиях полной загрузки".

Помехи от спутника "IRIDIUM" в полосе частот 1610,6–1613,8 МГц вызваны возникающими на спутнике интермодуляционными составляющими 7-го порядка, а не перегрузкой радиоастрономического приемника. Анализ спектров помех, полученных на телескопе Эффельсберга (отчет от 1 марта 2006 года), показывает, что две основные несущие, относящиеся к системе IRIDIUM, на частотах $f_1 = 1618,25$ МГц и $f_2 = 1620,25$ МГц создают наблюдаемую помеху на частоте 1612,25 МГц, что соответствует отношению интермодуляции $f_1 - 3df = 4f_1 - 3f_2$ и предполагает наличие интермодуляционной составляющей $4 + 3 = 7$ -го порядка. Составляющие более низкого порядка на 1,61425 и 1,61625 ГГц обнаружены не были. Типовые усилители и смесители формируют кривую помех, на которой мощность в интермодуляционных составляющих снижается с увеличением порядка. Очевидно, что эти интермодуляционные составляющие низкого (3–5) порядка подавляются при обработке сигналов на борту спутника "IRIDIUM", тогда как интермодуляционные составляющие высокого порядка все еще существуют.

Современные микроволновые усилители и радиоастрономические приемники имеют точки пересечения 3-го порядка (ИР₃) в диапазоне от -30 до -25 дБм. Основная несущая спутника "IRIDIUM" -178 дБм (по результатам наблюдений) не может создавать заметные собственные помехи на внешнем интерфейсе радиоастрономического приемника. Мощность помехи позволяет оценить точку пересечения 7-го порядка для спутникового передатчика на уровне около $+19$ дБВт. Это значение близко к э.и.и.м. спутника, равной $+11$ дБВт. Это означает, что спутниковый передатчик, введенный в режим уплотнения, будет создавать мощные внеполосные излучения по обеим сторонам полосы частот IRIDIUM. Для некоторых распределенных каналов передачи интермодуляционные составляющие 7-го порядка попадают в полосу частот службы PAC.

6.5.4.4 Измерения и проверка

В результате совместной программы испытаний, проведенной HIBLEO-2 (IRIDIUM) и Национальной радиоастрономической обсерваторией Соединенных Штатов Америки (NRAO) в 1998 году, были измерены значения с.п.п.м. на этих станциях, находящиеся в диапазоне от -220 до -240 дБ(Вт/(м²/Гц)).

Эти значения относятся к так называемым голосовым каналам, которые включаются во время сеансов связи. Кроме того, было обнаружено, что система HIBLEO-2 непрерывно передает радиовещательные сигналы. На спектрах радиовещательных каналов видны 9–10 узких (шириной менее 40 кГц) пиковых уровней, находящихся в пределах радиоастрономической полосы. Среднее значение пиковых уровней с.п.п.м. в интервале 90 мс оказалось равным -227 дБ(Вт/(м²/Гц)). (Источник: Рекомендация МСЭ-R SM.1633 (2003 год), упомянутая в Отчете 171 ЕСС).

6.5.4.5 Измерения на контрольной станции в Лихейме 8–9 июня 2010 года

Станция космического радиоконтроля в Лихейме расположена приблизительно в 35 км к юго-западу от Франкфурта-на-Майне. Станция в Лихейме оборудована комплектом спутниковых антенн, включая 12-метровую антенну № 1 с параболическим отражателем, предназначенную для охвата диапазона частот 1–13 ГГц, при помощи которой проводился мониторинг. Высокоточное угловое наведение позволило осуществлять точное слежение за движущимися спутниками.

Основная измерительная кампания в Лихейме проводилась совместно MPIfR, ASTRON и BNetzA в период 8 и 9 июня 2010 года на спутниках "IRIDIUM". В процессе измерений показания снимались один раз в секунду в каналах шириной 6,1 кГц в диапазоне 1610,6–1613,8 МГц на основе 28 проходов спутников группировки IRIDIUM, видимых между 08:30 и 17:30 (по местному времени), на протяжении двух дней.

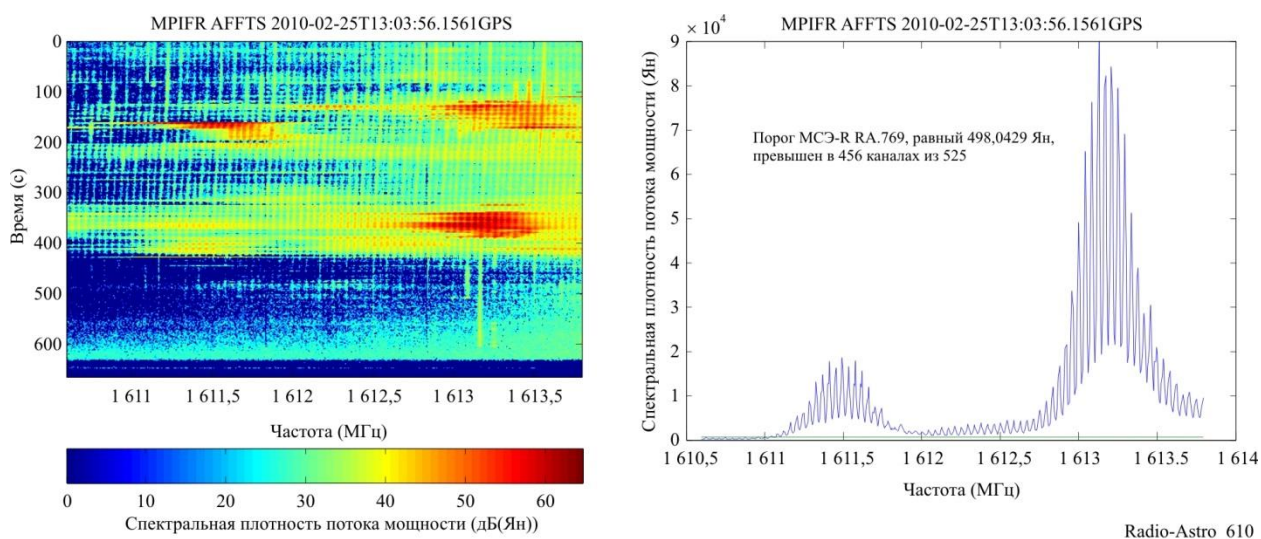
Для подавления сильных излучений от спутников в полосе 1613,8–1626,5 МГц до приемника был установлен полосно-заграждающий фильтр на 70 дБ. Это позволило избежать влияния нелинейности приемной системы в то время, когда антенна отслеживала активный спутник.

Калибровка проводилась непосредственно по радиоисточникам Cas-A и Cyg-A в тот же день с использованием той же конфигурации, которая применялась для спутниковых измерений. Таким образом была обеспечена калибровка абсолютной плотности потока всех каналов спектрометра.

Типичный пример полученных спектров показан на Рисунке 6.10. Наблюдаемая помеха в полосе PAC обладает пиковыми характеристиками, аналогичными приведенным в Рекомендации МСЭ-R SM.1633 от 1998 года. Пиковые уровни излучения, полученные при измерениях на контрольной станции в Лихейме, сравнимы с теми уровнями, которые были получены путем теоретического прогнозирования для условий полной загрузки, где значение -214 дБ(Вт/(м²/Гц)) преобразуется в 40 кЯн.

РИСУНОК 6.10

**Калиброванная спектрограмма (слева) и усредненный спектр (справа)
нежелательных излучений спутника "IRIDIUM-97" в полосе частот 1610,6–1613,8 МГц**



Анализ измерений в Лихейме показал, что каждое отдельное прохождение спутника "IRIDIUM" вызывает поверхностные помехи, превышающие пороговые уровни по времени и по ширине полосы, установленные в Рекомендации МСЭ-R RA.769 для полосы частот 1610,6–1613,8 МГц, более чем на 20 дБ на любой временной шкале в диапазоне от 1 с до 800 с. Потери в полосе пропускания, превышающие 30% во всех усредненных спектрах (среднее значение 76%) и минимум 11% (со средним значением 47%) всех односекундных спектров, должны отбрасываться в связи с засорением спектра внеполосными излучениями системы IRIDIUM. Измерения в Лихейме также подтверждают выводы, приведенные в ранее упомянутом отчете о помехах Эффельсберга от 1 марта 2006 года.

Следует отметить, что измерения, проведенные NRAO на отдельных спутниках в искусственно созданных условиях полной загрузки в 1998 году, показали результаты, аналогичные данному статистическому анализу. В целях повышения совместимости со службой PAC после проведенных NRAO испытаний (примерно в 2003 году) был изменен ряд эксплуатационных параметров системы IRIDIUM.

Последующий анализ ЭППМ, проведенный согласно предписанию Рекомендации МСЭ-R RA.1513, показал значительные колебания потери данных в этой полосе частот. С учетом времени интеграции в 2000 с потери составили 93,2%. Для соответствия критерию 2% уровень мощности помех должен быть снижен на 13 дБ. Потери данных по всему небосводу для частоты 1613,7878 МГц на верхней границе полосы частот PAC оказались равными 100% с учетом времени интеграции в 2000 с. Для соответствия критерию 2% уровень мощности помех должен быть снижен на 20 дБ. Для коротких периодов интеграции, равных 30 с, значения колебались от 4,7% на нижней границе полосы частот PAC до 43,5% ближе к верхней границе полосы, распределенной службе PAC. Для соответствия критерию 2% уровень мощности помех должен быть снижен на 11 дБ.

Представители компании IRIDIUM участвовали во всех этапах измерений, а также в формировании Отчета ECC, послужившего основой для данного раздела.

6.6 Выводы

Изучение проблем помех, создаваемых радиоастрономии от передатчиков, дало возможность сделать несколько выводов, из которых особенно важны следующие.

- Радиоастрономические приемники требуют пристального внимания к фильтрации в РЧ- и ПЧ-каскадах, с тем чтобы свести к минимуму проблемы, связанные с соседними полосами, и это обычно достаточно легко сделать.

- Передатчики, работающие в полосах, которые не соседствуют с радиоастрономическими полосами, могут создавать помехи радиоастрономии за счет излучения гармоник, явлений взаимной модуляции и нефильТРованной широкополосной модуляции.
- Передатчики на спутниках или воздушных судах могут создавать определенные трудности, поскольку обычно существуют условия распространения в пределах прямой видимости и вероятность приема в боковых лепестках вблизи главного лепестка (а не в удаленных боковых лепестках) больше, чем для наземных передач.
- В общем случае распределение полос, соседних с радиоастрономическими полосами, для служб, использующих наземные передачи с большой мощностью или передатчики на спутниках, может создавать сложные и дорогостоящие технические проблемы.
- Широкополосные излучения спутников типа сигналов, использующих модуляцию с расширением спектра по методу прямой последовательности, могут создавать особенно серьезные проблемы для радиоастрономии, если такие передачи должным образом не фильтруются. Такие нежелательные излучения можно существенно сократить с помощью применения методов модуляции с формированием импульсов.

ССЫЛКИ

- DALY, P. [1988] Aspects of the Soviet Union's Glonass satellite navigation system. *J. of Navigation*, Vol. 41, p. 186-198.
- GALT, J. [1990] Contamination from satellites. *Nature*, Vol. 345, p. 483.
- MUROTA, K. and HIRADE, K. [1981] GMSK modulation for digital mobile radio telephony. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-29, p. 1044-1050.
- OTTER, M. A. [June 1994] A comparison of QPSK, OQPSK, BPSK and GMSK modulation schemes. Report of the European Space Agency, European Space Operations Center, Darmstadt, Germany.
- PONSONBY, J. E. B. [July 1991] Spectrum management and the impact of the GLONASS and GPS satellite systems on Radioastronomy. *J. of Navigation*, Vol. 44, p. 392-398.
- PONSONBY, J. E. B. [July 1994] Impact of the direct sequence spread spectrum signals from the Global Satellite Navigation System GLONASS on radio astronomy: problem and proposed solution. *Proc. of the IEEE Spread Spectrum Symposium*, Oulu, Finland.

ГЛАВА 7

Специальные технологии, их применение и места проведения наблюдений

7.1 Введение

В данной главе рассматриваются технологии и места проведения наблюдений, которые не охвачены в полной мере в предыдущих главах в рамках более общего обсуждения. В частности, некоторые применения радиоастрономии включают наблюдения с помощью одной или нескольких антенн в космосе, которые иногда называют космической радиоастрономией. Антенна в космосе необходима по следующим соображениям.

- В VLBI корреляция сигналов от наземных антенн с сигналами космической антенны дает более длинные базовые линии, а следовательно, более высокое угловое разрешение, которого можно добиться, используя только наземные антенны. Перемещение космической антенны по орбите вокруг Земли обеспечивает изменение направления базы, образуемой с наземными антеннами, что важно для получения двухмерного изображения.
- Для наблюдения и измерения структуры космического микроволнового фонового (СМВ) излучения требуется очень высокая чувствительность на частотах около 30 ГГц и выше. Исключение поглощения в атмосфере и, в частности, изменения силы сигнала за счет неоднородностей в атмосфере очень важно, особенно для измерений с помощью одной антенны (общей мощности).
- Для частот, близких к интенсивным линиям H_2O и O_2 в атмосфере Земли (см. Рисунок 3.1), необходимы наблюдения из космоса.
- Для наблюдений на низких частотах, при которых радиоволны не могут проникать через ионосферу или сильно затухают, также необходимы наблюдения из космоса.

Наиболее важные места установки антенн для космической радиоастрономии следующие:

- околоземная орбита, особенно удобная для VLBI (см. п. 7.2);
- точка либрации Солнце-Земля L_2 (см. п. 7.3), находящаяся на расстоянии около $1,5 \times 10^6$ км от Земли и поэтому обеспечивающая некоторую защиту от наземных помех;
- орбита, следующая за движением Земли, на которой спутник оказывается вблизи орбиты Земли вокруг Солнца, но следует за Землей на расстоянии порядка 10^6 – 10^7 км, опять же обеспечивая некоторую защиту от наземных помех;
- экранированная зона Луны (см. п. 7.4), которая обеспечивает наиболее эффективную защиту от наземных помех, но пока не используется.

Точка L_2 , экранированная зона Луны и большинство планируемых земных орбит находятся в радиусе 2×10^6 км. Это расстояние определяет границу между околоземным пространством и дальним космосом. Околоземные орбиты и точку L_2 используют для наблюдения структуры СМВ-излучения. Наземные пункты, выбранные из-за крайне низкого содержания паров воды в атмосфере у Южного полюса и в пустыне Атакама, также используются для СМВ-наблюдения (см. п. 7.5).

Другие специальные технологии и применения, обсуждаемые в данной главе, включают геодезические измерения с помощью VLBI (см. п. 7.2.2), наблюдения пульсаров, которые могут найти применение для службы точного времени (см. п. 7.6), и наблюдения Солнца и его влияния на космическую метеорологию (см. п. 7.7).

7.2 VLBI, включая космическую VLBI

В методе VLBI применяются одновременные наблюдения радиоисточника с использованием антенн, разнесенных на большие расстояния. Зачастую антенны находятся в разных странах или на орбите Земли. Ни один из наземных методов астрономических исследований не позволяет добиться углового разрешения, доступного для наблюдений VLBI. Антенные решетки VLBI с максимальными базовыми линиями, достигающими диаметра Земли, позволяют добиться углового разрешения, не превышающего одну дуговую миллисекунду. Антенные решетки VLBI позволяют точно подбирать частоты наблюдений путем использования высокостабильных атомных часов для поддержания фазовой когерентности без привязки к эталону в реальном времени. Когда водородные мазеры используются в качестве часов, когерентное время интегрирования, как правило, ограничивается только уровнями отклонений в разности хода лучей при распространении через атмосферу и ионосферу. Однако на высоких частотах стабильность мазеров (10^{-14}) может оказаться ограничивающим фактором; например, на частоте 100 ГГц она ограничивает когерентное время интегрирования до 1000 с. Данные, полученные на станциях с отдельными антеннами, либо записываются (в настоящее время на магнитные диски), либо передаются по высокоскоростным глобальным вычислительным сетям. Скорость записи или передачи данных зависит от научных задач и процедур наблюдения, а также от имеющихся в наличии технических средств. Максимальные значения скорости передачи, используемые на практике, достигают 2 Гбит/с. Это является новым стандартом, принятым для антенной решетки со сверхдлинной базой (VLBA), – специальным инструментом VLBI, включающим десять станций наблюдения, распределенных по всей территории Соединенных Штатов Америки. Центральный пункт обработки данных выравнивает воспроизводимые сигналы по времени с учетом значительной задержки светового потока, достигающей 20 мс, и совмещает все пары сигналов для формирования продуктов корреляции.

Разрешение, доступное для метода VLBI, позволяет радиоастрономам наблюдать относительные перемещения отдельных сгустков плазмы с высокой энергией, извергаемых на релятивистских скоростях из активных галактических ядер. В пределах Галактики Млечного Пути метод VLBI позволяет измерять расстояния на основе параллакса по всему галактическому диску. В настоящее время действует интенсивная программа наблюдений, целью которой является исследование спиральной структуры Галактики с беспрецедентной точностью. VLBI является главным компонентом при определении небесной и наземной систем координат, а также стандартного времени. Кроме того, данный метод успешно применяется в других областях – от перемещения пластов земной коры до точного углового позиционирования удаленных космических аппаратов.

Чувствительность сетей VLBI к помехам от активных служб обсуждалась в п. 4.4, а использование определенных полос частот – в п. 5.8.

7.2.1 Космическая VLBI

Космическая VLBI выводит разрешающую способность метода VLBI за рамки ограничений, связанных с размером Земли, путем задействования антенны в решетке наблюдения на высокой околоземной орбите. В следующих подразделах приведен обзор прошлых, текущих и планируемых на будущее космических полетов (п. 7.2.1.1), особенностей инструментальных средств, характерных для космической VLBI (п. 7.2.1.2), и в особенности требований, предъявляемых данным методом к частотам связи (п. 7.2.1.3).

7.2.1.1 Проекты космической VLBI

В Таблице 7.1 приведены основные параметры проектов космической VLBI, описанных в настоящем разделе. Частоты, указанные в таблице, и последующее обсуждение относятся к радиоизлучениям, принимаемым от космических радиоисточников естественного происхождения.

ТАБЛИЦА 7.1
Исследования с космической VLBI

Экспедиция/ эксперимент	Даты	Параметры орбиты	Диаметр антенны	Полосы частот наблюдения (ГГц)
Эксперимент TDRSS VLBI	1986–1988	Геосинхронная 38 000 км	4,9 м	2,271–2,285 15,35–15,43
VSOP/HALCA	1997–2003	Апогей 21 400 км Перигей 560 км Наклонение 31°	8 м	1,60–1,73 4,7–5,0 22,0–22,3
Радиоастрон	2011	Апогей 280 000–353 000 км Перигей 7100–81 500 км Наклонение 5°–85°	10 м	0,316–0,332 1,652–1,684 4,812–4,852 22,212–22,252
Миллиметрон	2019	Точка L ₂ Солнца-Земля, 1,5 × 10 ⁶ км от Земли	10 м	18–26, 31–45, 84–116, 211–275, 602–720, 787–950
Антенная решетка космической VLBI в длинноволновой части миллиметрового диапазона	2020	Апогей 60 000 км Перигей 1200 км Наклонение 28,5°	Двойные 10-метровые антенны	6–9 20–24 40–46

Технические возможности космической VLBI впервые были продемонстрированы в 1986 году с применением антенны диаметром 4,9 м, установленной на спутнике системы TDRSS (слежения и передачи данных) агентства NASA [Levy *et al.*, 1989]. В первом эксперименте использовалась рабочая частота 2,3 ГГц. Последующие эксперименты были проведены в 1988 году на частоте 15 ГГц с использованием той же спутниковой системы.

Первые научные наблюдения с применением орбитальной антенны, специально предназначенной для VLBI, проводились в рамках японской исследовательской программы VSOP – Программы космической обсерватории VLBI [Hirabayashi *et al.*, 1998] – с 1997 по 2003 год. В рамках этой программы в 1996 году Институтом космической науки и аэронавтики (ISAS, в настоящее время является частью JAXA (Японское агентство аэрокосмических исследований)) был запущен спутник "HALCA". Спутник "HALCA" был оборудован 8-метровой антенной и находился на эксцентрической орбите с апогеем 21 400 км и орбитальным периодом 6,3 ч. Рабочими диапазонами частот были 1,6; 5 и 22 ГГц, однако последний из них не использовался для плановых наблюдений из-за ограниченных технических характеристик. Минимальная ширина синтезируемого луча составляла 1,8 и 0,6 дуговых миллисекунд на частотах 1,6 и 5 ГГц соответственно. Сигнал с суммарной шириной полосы 32 МГц оцифровывался и передавался на землю по линии связи 128 МБит/с на частоте 14,2 ГГц. Специальная сеть наземных телеметрических станций была предоставлена организациями ISAS, НАСА и NRAO. В наблюдениях VSOP была задействована разветвленная сеть радиотелескопов наземного базирования, координация которой осуществлялась международным консорциумом по всему миру. Союз URSI организовал рабочую группу по глобальному VLBI, в компетенцию которой входила координация наземных антенных решеток и вопросы совместимости при приеме и передаче данных. Основными научными целями исследований VSOP являлись, в числе прочих, активные галактические ядра, области мазеров ОН, пульсары и вспыхивающие звезды.

В настоящее время космические исследования VLBI проводятся в рамках российской программы "Радиоастрон". Космический аппарат "Радиоастрон" с 10-метровой антенной на борту был разработан Астрокосмическим центром Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук и Научно-производственным объединением им. С. А. Лавочкина. В 2011 году аппарат был выведен на

высокоэксцентрическую орбиту, максимальный апогей которой (353 000 км) почти достигает расстояния до Луны. Непреднамеренные возмущения орбиты, вызываемые Луной, используются для внесения быстрых изменений в орбитальные параметры и обеспечивают качественное покрытие апертуры при быстрой перемене направлений на небосводе. "Радиоастрон" – это первая космическая программа VLBI, в которой используется бортовой стандарт частоты на основе водородного мазера. Он работает в диапазонах частот 0,32; 1,66; 4,8 и 22 ГГц. Сигнал с суммарной шириной полосы 32 МГц оцифровывается и передается на землю по линии связи 128 Мбит/с на частоте 15 ГГц. В соответствующей наземной сети VLBI работает несколько основных радиотелескопов по всему миру. Недавно в рамках программы "Радиоастрон" были выдвинуты предложения по ключевым направлениям научных исследований, в том числе по галактическим ядрам, сверхмассивным черным дырам, релятивистским потокам, галактическим и внегалактическим мазерам, а также пульсарам.

Запуск космической обсерватории "Миллиметрон", предложенной Астрокосмическим центром Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, запланирован на 2019 год. Комплекс, оборудованный 10-метровой антенной, будет работать в точке либрации L_2 Солнце-Земля в полосах наблюдения в диапазоне от 18 до 950 ГГц. Уникальные характеристики "Миллиметрона", не представленные в предыдущих космических программах VLBI, включают в себя поверхность антенны с криогенным охлаждением и хранение результатов наблюдения на борту. Научными целями программы являются, в том числе, исследование формирования звезд и планетарных систем, релятивистских стадий эволюции звезд, супермассивных черных дыр, а также галактической и космологической эволюции. Один из главных аспектов проекта связан с однозеркальными антеннами и здесь не рассматривается.

Антенная решетка космической VLBI в длинноволновой части миллиметрового диапазона – это первый этап построения космической миллиметровой решетки VLBI, проектные исследования по которому утверждены Комитетом космических научных проектов китайской Академии наук. Запуск аппарата запланирован на 2020 год. Каждый из модулей сдвоенного космического аппарата, оборудованных 10-метровой антенной, вращается на орбитах с апогеем 60 000 км в плоскостях под углом 120° и ведет наблюдения в диапазонах частот 8, 22 и 43 ГГц. Оборудование космического аппарата включает в себя бортовые стандарты частоты на основе водородного мазера и систему хранения данных. Линия передачи данных космос-Земля поддерживает скорость передачи данных до 2 Гбит/с. Научными целями программы являются, в том числе, исследование сверхмассивных черных дыр, мегамазеров во внегалактических аккреционных дисках, струй в активных галактических ядрах и эволюции массивных звезд.

7.2.1.2 Отличительные особенности космической VLBI и развитие этого метода в последнее время

Некоторые аспекты метода космической VLBI, которые ограничивали возможности в ранних исследовательских программах, в настоящее время уступают место более современным технологиям. В частности, в программе "Радиоастрон" успешно использовался бортовой водородный мазер. В будущем его планируется применять в российских и китайских проектах. Однако система двусторонней передачи фазы, используемая в VSOP, работает удовлетворительно и может по-прежнему применяться в будущем в качестве резервного варианта.

Ограничения, накладываемые на определение орбиты в первых космических программах, также могут быть значительно ослаблены благодаря увеличению диапазонов задержки интерферометров и частоты интерференции, поддерживаемых современными программными корреляторами.

Возможность хранения результатов наблюдений на борту для последующей передачи на Землю может привести к значительному упрощению наземной поддержки космических программ. Хотя в таком рабочем режиме может быть достаточно и одной наземной телеметрической станции, требуется более широкая полоса передачи, обратно пропорциональная коэффициенту заполнения линии вниз. В то же время многие исследовательские задачи программ космической VLBI крайне зависимы от чувствительности и предъявляют все более жесткие требования к полосе пропускания при передаче данных по линии вниз.

Одна из проблем, связанных с обработкой изображений в космической VLBI, на данный момент еще не решена – обычный метод самокалибровки, используемый при анализе данных VLBI, не эффективен

для антенных решеток, в которых одна станция – космическая антенна – геометрически изолирована от всех остальных станций. Множество космических антенн, которые планируется включить в состав антенной решетки космической VLBI в длинноволновой части миллиметрового диапазона, могут стать первым шагом на пути к преодолению этого ограничения.

7.2.1.3 Требования к частотам для работы космической VLBI

Совместное использование частот для космической VLBI представляет собой более сложную задачу, чем для наземной VLBI. Это связано с трехсторонними требованиями к линиям управления, двусторонними сигналами фазового переноса и широкополосной передачей данных по линии космос-Земля. Все эти случаи требуют защиты от вредных помех, когда рабочие полосы попадают в полосы частот, используемые другими системами космических исследований.

Полосы частот, используемые в действующих космических программах VLBI, расположены в полосах, выделенных для космических исследований: 7,190–7,235 ГГц (Земля-космос), 8,025–8,500 ГГц (космос-Земля), 14–15,35 ГГц (космос-Земля) и 14,5–15,35 ГГц (Земля-космос). Этих распределений достаточно для удовлетворения требований космических программ к полосе пропускания. Однако будущие программы, вероятно, потребуют полос пропускания в несколько гигагерц для передачи данных по линиям вниз, распределенных на частотах выше 20 ГГц. Для двух запланированных программ космической VLBI, описываемых в конце п. 7.2.1.1, частоты для широкополосной передачи данных по линиям вниз еще не выбраны. Другие распределения возможны в полосах 37–38 ГГц (космос-Земля), 40–40,5 ГГц (Земля-космос) и 74–84 ГГц (космос-Земля).

Процесс резервного фазового переноса требует предварительного планирования соответствующих линий связи, хотя в настоящее время это уже не актуально. В связи с наличием ионосферных и тропосферных эффектов распространения волн необходимо, чтобы частоты находились в диапазоне 7–20 ГГц. Частоты передачи для линии вверх (Земля-космос) и линии вниз (космос-Земля) должны быть как можно более близкими, но поскольку они обычно не совпадают, необходимо моделировать атмосферу, чтобы обеспечить компенсацию для эффекта изменений длины пути.

Критерии защиты для линий связи околоземных пилотируемых и непилотируемых исследовательских спутников приведены в Рекомендации МСЭ-R SA.609. Они также подходят для линий связи телеметрии и синхронизации планируемых космических систем VLBI. Рекомендуемые пороговые уровни вредных помех, которые не должны превышаться в течение более чем 0,1% времени, составляют –216 дБ(Вт/Гц) для приемника земной станции и –177 дБ(Вт/кГц) – для спутникового приемника. Полосы частот, которые должны использоваться для линий связи в планируемых проектах космических VLBI, распределены многим службам радиосвязи. Однако рассмотрение потенциальных уровней помех в зависимости от положения спутников на орбите показывает, что эффективное совместное использование полос частот возможно. В некоторых случаях может потребоваться тщательная координация.

7.2.2 Применение VLBI для геодезических целей

Метод VLBI играет важную роль как инструмент для измерения и мониторинга Земли. При наличии сети антенн в разных пунктах по всему миру и системы радиоисточников с точно определенным положением расстояния между парами антенн можно определять с точностью до нескольких миллиметров. VLBI – это единственный геодезический метод, способный предоставить полный набор параметров ориентации Земли (ЕОР – продолжительность дня и ориентация полюса), которые задают положение Земли относительно инерциальной небесной системы координат (CRF), описываемой в каталоге по квазарам. Путем измерения параметров ЕОР метод VLBI предоставляет абсолютную ориентацию и масштаб для наземной системы координат (TRF). Параметры ЕОР играют важную роль для навигации космических аппаратов, однако они изменяются в малых масштабах времени и непредсказуемы и поэтому требуют проведения регулярных измерений. К примеру, калибровка данных спутников GPS невозможна без VLBI. Международной службе VLBI (IVS) по геодезии и астрометрии [Schuh and Behrend, 2012] поручена миссия по поддержанию CRF и проведению регулярных измерений параметров ЕОР.

На протяжении последних лет планируется модернизация сети телескопов, задействованных в службе IVS. Модернизация позволит решить ряд сложных задач, в том числе достичь точности

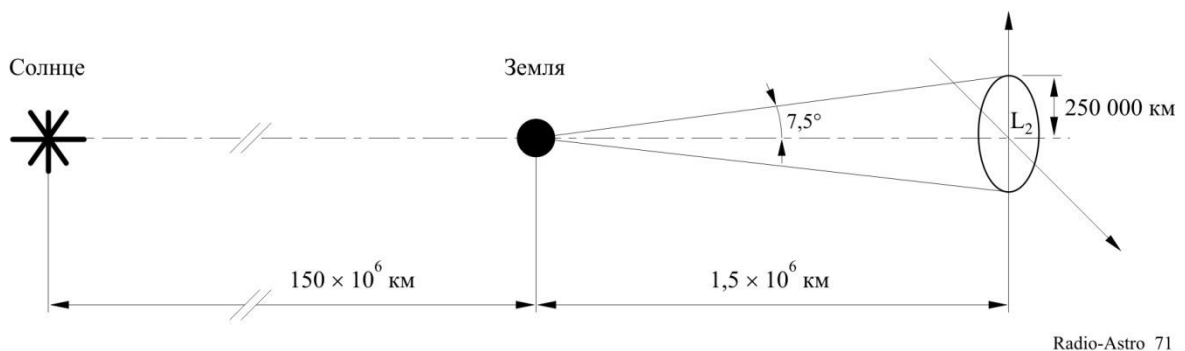
позиционирования 1 мм и скорости 0,1 мм в год [Petrachenko *et al.*, 2013]. Эта инициатива, получившая название "Глобальная система наблюдения VLBI2010" (VGOS), требует создания новых, быстро движущихся телескопов и широкополосных приемных систем. Уже построено несколько новых телескопов (например, антенная решетка VLBI AuScope) [Lovell *et al.*, 2013], другие телескопы находятся в процессе создания или проектирования. Для обеспечения частотного покрытия и чувствительности, требуемых для решения задач VGOS, необходимы широкополосные приемные системы. Обсерватории будут вести запись четырех полос двойной поляризации шириной 1 ГГц в диапазоне 2–14 ГГц.

7.3 Радиоастрономия из точки либрации L₂ Солнце-Земля

Существует пять специальных точек либрации в гравитационном поле системы Солнце-Земля, вокруг которых можно получить стабильные орбиты (гало) для космического аппарата. Эти положения удобны для введения постоянно действующих лабораторий в космосе. Точки L₁ и L₂ расположены вдоль линии Солнце-Земля на расстоянии около $1,5 \times 10^6$ км с каждой стороны от Земли (см. Рисунок 7.1). Точка L₂ находится дальше от Солнца, и в этом положении линии прямой видимости (LoS) на Солнце, Землю и Луну лежат в нескольких градусах одна от другой. Диаметр геостационарной орбиты вокруг Земли из точки L₂ стягивается в угол около $3,1^\circ$, так что антенна со слабыми задними боковыми лепестками, направленными от Земли, будет хорошо защищена от большинства передатчиков вблизи Земли. Эти соображения и другие преимущества, такие как благоприятные условия в космосе для поддержания низкой физической температуры антенны и приемного оборудования, послужили основой для предложений о ряде радиоастрономических экспедиций на орбите вокруг точки L₂. Предварительные данные по некоторым из них приведены в Таблице 7.2. Защита электромагнитного окружения точки L₂ рассматривается в Рекомендации МСЭ-R RA.1417, в которой предлагается, чтобы объем пространства с радиусом 250 000 км и центром в точке L₂ был защищен как зона координации от слабого электромагнитного излучения.

РИСУНОК 7.1

Типичная геометрия орбиты L₂



Radio-Astro_71

ТАБЛИЦА 7.2

Действующие или планируемые радиоастрономические программы космического базирования для работы вблизи точки либрации L₂ Солнце-Земля

Экспедиция/ апертура оператора	Тип экспедиции. Режим наблюдения	Даты проведения работ	Полосы частот (ГГц)
MAP/NASA 1,4 м × 1,6 м	Построение изображений космического микроволнового фонового излучения в непрерывном спектре при помощи однозеркального телескопа. Непрерывный спектр	2001–2009 годы	18–96
PLANCK/ESA 1,5 м × 1,9 м	Построение изображений космического микроволнового фонового излучения в непрерывном спектре при помощи однозеркального телескопа. Непрерывный спектр	2009–2012 годы	30 ± 3 44 ± 4,4 70 ± 7 100 ± 10 150 ± 28 217 ± 40 353 ± 65,5 545 ± 101 857 ± 158,5
Herschel/ESA 3,5 м	Однозеркальная радиоастрономия при помощи однозеркального телескопа. Спектральные линии и непрерывный спектр	2009–2013 годы	490–642 640–802 800–962 960–1 122 1 120–1 250 1 600–1 800 2 400–2 600
Millimetron/ РОСКОСМОС 12 м	Однозеркальная радиоастрономия и космическая интерферометрия со сверхдлинной базой (sVLBI). Спектральные линии и непрерывный спектр	2015–2030 годы	18–4 800
SPICA/JAXA 3,5 м	Однозеркальная астрономия/ спектральные линии и непрерывный спектр	2018 год	1 500–10 000

7.4 Радиоастрономия в экранированной зоне Луны

Электромагнитный спектр сейчас столь интенсивно используется на Земле, что большая часть его ценности для радиоастрономических исследований существенно снизилась. Это связано не только с общим увеличением объемов радиосвязи, особенно с использованием спутников Земли, но и с тем, что некоторые наблюдения в радиоастрономии надо проводить на частотах спектральных линий, для которых не предусмотрена защита в РР, и они вряд ли получат защиту в будущем.

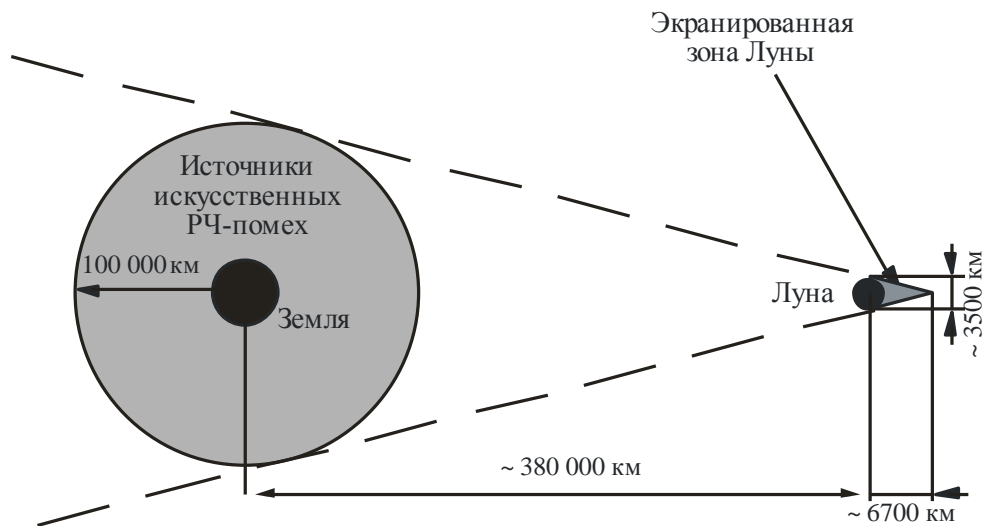
Вероятно, обратная сторона Луны осталась единственным достижимым местом, в котором возможны радиоастрономические наблюдения во всем радиоспектре без помех. Однако зонды дальнего космоса, спутники Луны, комплекты научных приборов и исследовательские станции на лунной поверхности все же могут создавать помехи для наблюдений, и для них следует очень тщательно распределять частоты, чтобы избежать помех для радиоастрономии в экранированной зоне.

7.4.1 Экранированная зона Луны

Луна имеет период вращения вокруг своей оси, равный ее периоду обращения вокруг Земли, и поэтому к Земле она всегда обращена одной стороной. Поскольку орбита вокруг Земли слегка эллиптическая и наклонена, наблюдатели с Земли видят больше половины поверхности Луны. Скрытая часть поверхности Луны всегда защищена от сигналов помех, возникающих на Земле или вблизи нее (см. Рисунок 7.2). Экранированная часть поверхности лежит в более чем $23,2^\circ$ от среднего диска Луны, который должен быть виден из центра Земли. В примечании 22.22.1 РР экранированная зона Луны определена как экранированная часть ее поверхности с примыкающей частью космического пространства, которая экранирована от помех, возникающих на расстоянии в пределах 100 000 км от центра Земли.

РИСУНОК 7.2

Упрощенная схема экранированной зоны Луны



РЧ-помеха – радиочастотная помеха

Radio-Astro_72

7.4.2 Предпочтительные спектральные диапазоны для наблюдений Луны

Радиоастрономические наблюдения на низких частотах могут дать важные данные о солнечной активности, космических лучах и магнитных полях в нашей Галактике, а также о низкочастотных спектрах отдельных галактик и внегалактических радиоисточников. Однако такие наблюдения очень трудно проводить с Земли на частотах ниже приблизительно 30 ГГц ввиду непрозрачности и неоднородности ионосферы. Наблюдения на частотах ниже 20 МГц возможны только в исключительных обстоятельствах, в специальных местах и только в течение ограниченных промежутков времени (см. главу 3). Наземные естественные и антропогенные радиопомехи также мешают радиоастрономическим наблюдениям на этих частотах. На частотах ниже приблизительно 500 кГц авроральное излучение служит основным источником шума. В диапазоне 1–30 МГц преобладает дальняя связь. В действительности спектр до 300 МГц интенсивно используется

активными службами. В связи с этими ограничениями важно резервировать экранированную зону Луны, на которую не действуют ионосферные эффекты и антропогенное излучение, для радиоастрономических наблюдений на низких частотах.

На более высоких частотах до 20 ГГц радиоастрономия на Земле существенно ограничивается антропогенными излучениями. Хотя многие астрофизически важные переходы спектральных линий получили защиту в Регламенте радиосвязи (см. главу 3), в общем отсутствует достаточная защита для частот с доплеровским сдвигом, связанных с удаленными галактиками с красным смещением. Кроме того, все еще обнаруживают важные переходы, которые имеют частоты без защиты, например линии метанола (CH_3OH) в диапазонах 6,7 и 12,2 ГГц и циклопропилидена (C_3H_2) в диапазоне 18,3 ГГц. Линия 1420 МГц нейтрального атомарного водорода обнаружена на низких частотах с доплеровским сдвигом до 323 МГц [Uson *et al.*, 1991], и необходимо обеспечить защиту для всего спектрального диапазона ниже 1420 МГц.

На частотах выше 20 ГГц радиоастрономическим наблюдениям с поверхности Земли препятствует непрозрачность атмосферы за счет интенсивных переходов H_2O и O_2 (см. главу 3). Хотя были успешно проведены некоторые наблюдения в атмосферных окнах между переходами, они становятся все труднее с увеличением частоты. Большинство молекулярных линий находится на высоких частотах, и некоторые из них невозможно наблюдать с Земли. Для радиоастрономии отсутствие помех в полосах частот, закрытых атмосферой Земли, будет иметь важность для обсерваторий в экранированной зоне Луны, хотя успешные наблюдения на этих частотах могут оказаться возможными и из других мест в космосе.

7.4.3 Регулирование использования экранированной зоны Луны

Поскольку весь спектр частот в экранированной зоне Луны свободен от излучений, возникающих в окрестности Земли, зона служит уникальным местом для научных наблюдений. Радиоастрономические и другие научные эксперименты в этой зоне станут возможными в обозримом будущем, и очень важно предусмотреть регулирование деятельности служб радиосвязи, чье оборудование может создавать излучения в данной зоне. Необходимо обратить внимание на требования к спутникам Земли, зондам для дальнего космоса и передатчикам, планируемым для экранированной зоны, понимая, что желательно поддерживать эту зону максимально свободной от радиопомех и сохранить ее большую ценность для пассивных наблюдений.

В пп. 22.22–22.25 РР признается необходимость сохранить экранированную зону как зону с большими возможностями для радиоастрономических наблюдений и пассивных служб космических исследований, а следовательно, поддерживать ее максимально свободной от передач.

В Рекомендации МСЭ-R RA.479 предлагается, чтобы при планировании использования радиоспектра в экранированной зоне Луны в национальном и международном масштабах была учтена потребность в обеспечении радиоастрономических наблюдений. Там также рекомендуется, чтобы особое внимание было обращено на те полосы частот, в которых наблюдения затруднены или невозможны с поверхности Земли, и чтобы спектр использовался в соответствии с набором предварительных руководящих указаний. Согласно этим руководящим указаниям в экранированной зоне весь спектр радиочастот будет доступен для использования пассивными службами, за исключением полос частот, которые доступны в настоящее время или будут распределены в будущем:

- для обеспечения космических исследований службой космических исследований, службой космической эксплуатации, спутниковой службой исследования Земли и спутниковой службой радиоопределения; а также
- для радиосвязи и передач, связанных с космическими исследованиями, в пределах зоны.

Службам космической радиосвязи с передатчиками, работающими на расстояниях свыше 100 000 км от Земли, потребуется координировать свою деятельность со службой РАС. Наконец, рекомендуется, чтобы радиоастрономия была защищена от вредных помех при работе в экранированной зоне на частотах, отведенных для использования активными и пассивными космическими станциями в этой зоне.

Можно разработать руководящие указания по выбору полос частот, которые должны быть зарезервированы для радиоастрономии в экранированной зоне Луны. Переходы Н1 на частоте

1420 МГц, CO на частоте 115 ГГц и в меньшей степени OH на частотах 1612, 1665, 1667 и 1720 МГц играют наиболее заметную роль в исследованиях красного смещения удаленных галактик. Так, только для исследований HI и OH спектральный диапазон ниже 2 ГГц должен сохраняться свободным от излучения. Для наблюдения CO с доплеровским сдвигом наиболее важные спектральные диапазоны, требующие резервирования, соответствуют полосам, в которых велика непрозрачность земной атмосферы. Необходимо резервировать полосы частот для многих представляющих наибольшую важность для астрофизики переходов, особенно для тех, которые сегодня слабо защищены. Это позволит проводить наблюдения с помощью VLBI с использованием антенны в экранированной зоне. Эти частоты должны получить максимальную защиту от вредных помех, будь то внутриполосные или внеполосные (OOB) излучения (включая излучения в полосах, которые дают вредные гармоники). На частотах выше 15 ГГц спектральный диапазон, закрытый на Земле атмосферой, должен сохраняться доступным для радиоастрономов. Проблемы детектирования в будущем спектральных линий в незащищенных полосах можно уменьшить, если системы радиосвязи и передачи данных в экранированной зоне будут иметь гибкие частоты, которые позволяли бы им менять полосу в случае открытия важной спектральной линии в полосе передачи.

7.5 Места на поверхности Земли с низким атмосферным поглощением

Места с особенно низким содержанием атмосферных водяных паров являются наилучшими точками для проведения наземных наблюдений в субмиллиметровом диапазоне длины волны, т. е. на радиочастотах свыше 300 ГГц. Более подробная информация по параметрам таких мест, помимо тех, которые упомянуты здесь, приведена в главе 13 документа [Thompson *et al.*, 2001].

7.5.1 Антарктика

Большая высота над уровнем моря и крайне низкие температуры Антарктического плато обеспечивают очень низкую плотность паров воды в столбе воздуха и делают это плато лучшим из известных мест на Земле для астрономических наблюдений в диапазоне частот 300–15 000 ГГц (диапазон длин волн 1–0,02 мм). Дополнительное преимущество для радиоастрономических наблюдений на более низких частотах связано с тем, что спутники на строго геостационарной орбите оказываются в этом месте ниже горизонта. Однако Антарктическое плато является относительно недоступным и пока не разработано как место для обсерватории. Южный полюс, хотя и несколько хуже в плане качества наблюдений, чем это плато, считается лучшим местом для высокочастотной обсерватории из всех доступных в мире пунктов. Здесь с помощью телескопов можно проводить наблюдения, которые очень трудно или невозможно осуществлять в любом другом месте, поскольку атмосфера прозрачна в указанном выше спектральном диапазоне практически постоянно. Очень высокая стабильность прозрачности атмосферы особенно выгодна для измерения явлений низкой яркости. Однако следует отметить, что в предположении о возможном охвате телескопом небосвода вплоть до угла возвышения в 5° часть доступной для наблюдения звездной сферы с полюса составляет всего лишь половину наблюдаемой в более низких широтах, как, например, из Серро-Чахнантор или Мауна-Кеа, отмеченные ниже.

На Южном полюсе 10-метровый телескоп ведет наблюдения на частотах 95–350 ГГц. Кроме того, на Южном полюсе работает 13-элементный интерферометр DASI, ведущий наблюдения в диапазоне частот 26–36 ГГц [Leitch *et al.*, 2002].

7.5.2 Серро-Чахнантор, Чили

В чилийской пустыне Атакама в окрестностях телескопа ALMA с координатами 67°45'11,4" з. д., –23°01'22" на высоте 5000 м расположена точка наблюдения, в которой атмосферные условия для радиоастрономических исследований сравнимы с условиями Южного полюса. ALMA представляет собой сложное оборудование, состоящее из комплекса антенн 50 × 12 м, 12 × 7 м и 4 × 12 м, ведущее наблюдения в диапазоне частот 30–950 ГГц. Неподалеку расположены 12-метровые телескопы APEX и ASTE. Тот же район использован для другого оборудования, специально предназначенного для измерения СМВ, – установки для получения изображения космического фона, которая работает в том же диапазоне частот 26–36 ГГц, что и DASI, но перекрывает дополнительный участок угловой структуры [Padin *et al.*, 2001].

7.5.3 Мауна-Кеа, Гавайи

На вершине Мауна-Кеа (Гавайи) ($155^{\circ}28'18''$ з.д., $+19^{\circ}49'36''$) высотой 4080 м расположена субмиллиметровая антенная решетка 10×6 м (SMA) [Moran, 1998], а также телескопы – 10-метровый CSO и 15-метровый JCMТ, работающие в диапазоне 180–900 ГГц.

7.5.4 Гора Грэм, Аризона

На этой площадке, находящейся на высоте 3200 м ($109^{\circ}53'28,5''$ з. д., $+32^{\circ}42'05,8''$) установлены 10-метровый телескоп SMT, работающий на частоте 200–700 ГГц, и большой оптический телескоп 2×8 м LBT.

7.6 Наблюдения пульсаров и их использование в качестве эталонов времени

Радиопульсары подробно обсуждались в главе 2.

Наблюдаемый диапазон периодов пульсации меняется от секунд до миллисекунд; обнаружен также малый период в 1,55 мс. Главный импульс, а иногда и слабый вторичный импульс обычно занимают только меньшую часть цикла. Как правило, циклы импульсов очень регулярны. Однако в некоторых случаях периоды претерпевают неожиданные изменения. Кроме того, для некоторых периодов проявляется небольшое регулярное изменение периода, и это указывает, что нейтронные звезды входят в двойные системы и вращаются по орбите вокруг второй звезды с низкой массой. Измерения времени прибытия импульса в течение нескольких лет дают не только точное положение и относительное перемещение (т. е. угловое движение по небосводу) пульсаров, но также и информацию о длительной стабильности периодов пульсаров.

Детектирование отдельных импульсов возможно только для более мощных пульсаров. В этих случаях было обнаружено, что интенсивность импульсов может сильно меняться; полагают, что некоторые изменения являются мерцаниями, вызванными межзвездным веществом, через которое проходят импульсы. Для слабых пульсаров используют методы усреднения импульсов со временем интегрирования до нескольких часов для определения среднего профиля импульса. Обычно интенсивность излучения пульсара снижается с увеличением частоты быстрее, чем для всех других радиоисточников.

7.6.1 Пульсары как эталонные часы

Было обнаружено, что пульсары с миллисекундными периодами очень стабильны. Производная периода (изменение периода со временем) находится в пределах от 10^{-18} до 10^{-20} , что приблизительно на четыре или пять порядков меньше, чем для других пульсаров. Эти пульсары представляют большой интерес для астрофизики, и несколько обсерваторий в мире проводят поиск таких объектов. Известны пульсары с периодом около 100 мс.

В настоящее время проводят длительные наблюдения миллисекундных пульсаров по времени. Они указывают на длительную стабильность периодов пульсаров, сопоставимую по крайней мере с достигнутой сегодня с использованием атомных стандартов частоты. Это предполагает возможность использования таких пульсаров в будущем для службы точного времени. Это мнение получило подкрепление при обнаружении южных миллисекундных пульсаров, которые на два порядка ярче других миллисекундных пульсаров. Их интенсивность позволяет отбирать отдельные импульсы. Сейчас проводятся исследования в целях изучения возможности использования этих пульсаров в будущем для точной шкалы времени.

Надо найти ряд решений, прежде чем удастся включить миллисекундные пульсары в будущую службу времени (см., например, Вопрос МСЭ-R 205/7, Отчет МСЭ-R RA.2099). Это связано с проблемами наблюдения, такими как предпочтительные полосы частот для наблюдения пульсаров (например, была предложена широкая полоса в диапазоне 1330–1427 МГц), уровни нежелательных сигналов, которые создают вредные помехи, и возможность совместного использования частот в полосах наблюдения с другими службами. Другие проблемы включают сравнение данных времени с атомной шкалой времени, определение времени прибытия импульса, оценку точности измерения времени, методы детектирования при наличии помех и процедуру, которую следует использовать при сравнении данных времени с атомной шкалой времени.

7.6.2 Пульсары в качестве объектов для начальных координат

В начале данной главы обсуждалось применение радиоастрономических VLBI как метода, дающего самое высокое угловое разрешение, в частности космических VLBI. Угловые размеры пульсаров очень малы и составляют 10^{-7} – 10^{-10} дуговых секунд. Полагают, что распределение яркости их магнитосферы не поддается разрешению. Сами же пульсары можно рассматривать в качестве точек для начальных координат на небосводе. Временной расчет (в годах) положения пульсара измеряется в динамической системе координат с точностью до 0,5 дуговых миллисекунд, которой соответствует погрешность в 1 мкс при отсчете времени и 300 м при измерении орбиты Земли. Подобной точности можно добиться применением межконтинентальной VLBI в диапазоне S (Калязин, Россия – Касима, Япония) [Sekido *et al.*, 1998]. Данные VLBI для координат пульсаров были получены в ICRF. Это дает возможность скорректировать с высокой точностью систему небесных координат. Координаты пульсаров по данным VLBI можно использовать как независимые, когда используют процедуру подгонки для определения параметров пульсара (период, временные производные периода, координаты, истинное движение и параметры Кеплера для двоичной системы).

7.7 Мониторинг Солнца

Поскольку солнечная активность может влиять на функционирование некоторых служб, в частности сетей энергоснабжения, во всем мире она отслеживается в различных участках электромагнитного спектра. В качестве примера контроля Национальный совет по исследованиям Канады с 1947 года проводит ежедневные измерения солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см. Эта программа, включающая точные измерения общей спектральной п.п.м. и работу службы контроля вспышек, обеспечила самые длительные из существующих записи солнечной активности. Результат измерения, выраженный в солнечных единицах потока ($1 \text{ сеп} \equiv 10^{-22} \text{ Вт/м}^2/\text{Гц}^{-1}$) обычно обозначают как $F_{10,7}$ и используют во всем мире как основной показатель солнечной активности. Его используют не только в области физики солнца, но и в науке об атмосфере, в технике связи, в силовых инженерных сетях и в других службах, чья работа может ухудшиться при высокой солнечной активности и сопутствующих ей магнитных бурях. Его также используют космические агентства при моделировании плотности верхних слоев атмосферы Земли для расчета орбит спутников. Поскольку основным является солнечное радиоизлучение на сантиметровых длинах волн за счет вклада (медленно меняющийся компонент), вносимого в концентрацию плазмы, поддерживаемую магнитными полями и тепловыми электронами в магнитных полях, интенсивность на длине волны 10,7 см строго коррелируется с суммарным магнитным потоком. Она также хорошо коррелирует с другими мерами солнечной активности и широко используется как замена параметров типа цюрихского числа солнечных пятен, солнечной светимости и интегральной ультрафиолетовой интенсивности, которые трудно измерять с требуемой согласованностью и непрерывностью. Подробное описание $F_{10,7}$ приведено в работе [Tapping, 2013].

В связи с интенсивностью солнечного излучения и тем, что большинство измерений в последние годы проводится в хорошо экранированных местах, вредные помехи от активных служб не создают проблем. Тем не менее основные получатели информации контроля указывают, что любой уровень потери данных за счет технических неполадок или помех должен удерживаться ниже 1% за каждый год.

Более мощный прибор контроля за Солнцем – радиогелиограф Нобэяма (Япония) – был закончен в 1992 году и ежедневно работает на частоте 17 ГГц с угловым разрешением Солнца в 10 дуговых секунд и высоким разрешением по времени в 20 мс. Сейчас изучают новое и более универсальное оборудование – быстро перестраиваемую по частоте солнечную решетку (FASR), которая сможет давать изображения Солнца и его атмосферы с разрешением в дуговую секунду в диапазоне частот 0,1–30 ГГц [Bastian *et al.*, 1998].

ССЫЛКИ

- BASTIAN, T. S., GARY, D. E., WHITE, S. M. and HURFORD, G. J. [1998] *Broadband imaging spectroscopy with a solar-dedicated array*. Proc. SPIE, Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes. T. G. Phillips, ed. p. 609-619.
- D'ADDARIO, L. R. [1991] Time synchronization in orbiting VLBI. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-40, p. 584-590.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- HIRABAYASHI, H. *et al.* (52 coauthors) [1998] Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme. *Science*, Vol. 281, p. 1825-1829.
- LEITCH, E. M. *et al.* [2002] Experiment design and first season observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 28-37.
- LEVY, G. S. *et al.* (31 co-authors) [1989] VLBI using a telescope in Earth orbit. 1. The observations. *Astrophys. J.*, Vol. 336, p. 1098.
- LOVELL, J. E. J., MCCALLUM, J. N., REID, P. B., MCCULLOCH, P. M., BAYNES, B. E., DICKEY, J. M., SHABALA, S. S., WATSON, C. S., TITOV, O., RUDDICK, R., TWILLEY, R., REYNOLDS, C., TINGAY, S. J., SHIELD, P., ADADA, R., ELLINGSEN, S. P., MORGAN, J. S., & BIGNALL, H. E. [2013], "The AuScope geodetic VLBI array", *Journal of Geodesy* 87 527-538.
- MORAN, J. M. [1998] *The submillimeter array*. Proc. Spie. Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes, T. G. Phillips, ed., p. 208-219.
- PADIN, S. *et al.* [2001] First intrinsic anisotropy observations with the cosmic background imager. *Astrophys. J. Lett.*, L1-L5.
- PETRACHENKO, WILLIAM, BEHREND, DIRK, HASE, HAYO, MA, CHOPO, NIELL, ARTHUR, SCHUH, HARALD, & WHITNEY, ALAN 2013, "The VLBI2010 Global Observing System (VGOS)" EGU General Assembly, held 7-12 April, [2013] in Vienna, Austria, id. EGU2013-12867, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..1512867P>.
- PRESTON, R. A., BURKE, B. F., DOXSEY, R., JORDAN, J. F., MORGAN, S. H., ROBERTS, D. H. and SHAPIRO, I. I. [1983] *The future of VLBI observatories in space. (Techniques d'interférométrie à très grande base)*. F. Biraud, ed., Cepadues, Toulouse, France.
- SEKIDO, M., IMAE, M., HANADO, Yu., HAMA, S., KOYAMA, Y., KONDO, T., NAKAJIMA, J., KAWAI, E., KURIHARA, N., ILYASOV, Yu. P., ORESHKO, V. V. and RODIN, A. E. [1998] Pulsar VLBI experiment with Kashima (Japan) – Kalyazin (Russia) baseline. *New Astronomy Rev.* Vol. 43, p. 599-602.
- SCHUH, H. and BEHREND, D. [2012], "VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry". *Journal of Geodynamics*, 61, 68-80.
- TAPPING, K. F., "The 10.7cm solar radio flux ($F_{10.7}$)", *Space Weather*, Volume 11, Issue 7, July [2013], Pages: 394-406.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. [2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. 2nd ed. Wiley, New York, United States of America.
- USON, J. M., BAGRI, D. S. and CORNWELL, T. S. [1991] Radio detection of neutral hydrogen at redshift $z = 3.4$. *Phys. Rev. (Lett.)*, Vol. 67, p. 3328-3331.

ГЛАВА 8

Ослабление помех

Настоящая глава посвящена вопросам ослабления радиочастотных помех (RFI) в радиоастрономии. Полное описание и исчерпывающие справочные материалы представлены в Отчете МСЭ-R RA.2126 "Методы ослабления радиочастотных помех в радиоастрономии".

8.1 Введение. Задачи

Целью ослабления помех в радиоастрономии является снижение или устранение влияния сигналов, создаваемых активными службами в пределах или за пределами полос частот радиоастрономической службы. Результатом воздействия помех всегда (или почти всегда) является потеря данных, а также потеря качества данных. Если это происходит внутри полосы частот, распределенной РАС, то проблема носит регуляторный характер. Однако при потере данных в полосах, не распределенных РАС, вопрос не может быть решен путем регуляторных мер. Очевидно, что наилучший способ избежать потери данных – это регуляторные меры, которые могут предотвратить возникновение мешающих сигналов. Предотвращение помех гораздо эффективнее, чем их ослабление. Методы ослабления, которые включают профилактические меры изменения локальной среды РЧ-помех с помощью регуляторных мер, методов предварительного и последующего обнаружения, различных методов предварительной корреляции и методов, применяющихся для корреляции и посткорреляции, могут использоваться на различных этапах работы системы приема данных. Однако чем раньше приступить к решению той или иной проблемы в технологической цепочке по обработке данных, тем лучше. Раннее вмешательство влечет за собой уменьшение потери данных, сокращение затрат на нисходящий поток информации и уменьшение сложности системы. При значительном отношении помеха/шум (INR) проще добиться ослабления помех. В отношении слабых РЧ-помех целесообразнее всего принимать меры позже, в цепочке обработки данных, следующей за интеграцией данных. Это позволит увеличить отношение сигнал/шум (SNR).

В настоящее время по ряду причин научного характера действующие системы РАС работают со все более широкими полосами пропускания, и чувствительность систем постоянно возрастает. В результате наблюдения часто охватывают полосы, распределенные активным службам. В этих полосах служба РАС не защищена. Таким образом, для получения пригодных астрономических данных в нераспределенных полосах частот необходимо применять методы ослабления РЧ-помех.

Главная проблема, с которой сталкивается служба РАС при работе в более широких полосах частот, заключается в распространении маломощных широкополосных устройств с расширением спектра. Эти устройства выпускаются в массовом порядке и не проходят лицензирование. Для обеспечения оптимального режима работы РАС необходим нестандартный подход к решению проблем ослабления помех. Еще одной проблемой, возникающей при радиоастрономических исследованиях вне распределенных полос, является динамический доступ к спектру (DSA), который позволяет системам работать в неиспользуемых участках спектра (пробелах). Ожидается, что спектр будет все больше заполняться когнитивными радиоустройствами, использующими новую технологию совместного использования частотного спектра. Безусловно, работа РАС в широкополосном режиме подвержена влиянию принципа DSA по мере внедрения новых когнитивных радиоустройств.

8.2 Характеристики источников РЧ-помех и их влияние

Фактическое влияние помех на данные, полученные при помощи радиоастрономических телескопов, зависит от ряда факторов, первым из которых является тип используемого радиотелескопа. Однозеркальные радиотелескопы наиболее уязвимы, так как они обладают небольшой направленной избирательностью по отношению к проходящим РЧ-помехам, в результате чего сигналы астрономической службы и РЧ-помех когерентно складываются. По-другому обстоит дело с чувствительностью к РЧ-помехам телескопов, включенных в связанные решетки, предназначенные для интерферометрии. В данном случае РЧ-помехи поступают в систему до некоторой степени

некогерентно. В такой конфигурации расширенные базовые линии служат пространственным фильтром, который отделяет РЧ-помехи. Каждая интерферометрическая система, использующая методы "блокирования граничной зоны", способна отфильтровать РЧ-помехи. Чем длиннее базовая линия, тем ярче выражена эта способность. Тем не менее калибровка каждой станции в составе решетки все еще подвержена влиянию локальных РЧ-помех.

Вторым фактором является тип наблюдения. В то время как при проведении измерений в непрерывном спектре можно пожертвовать определенными временными слотами или полосами частот в пределах частотной-временной диаграммы наблюдения, наблюдение в спектральных линиях нарушается всякий раз, когда частота и ширина РЧ-помехи непосредственно влияют на астрономический сигнал.

В третьих, влияние на результаты наблюдений зависит от типа РЧ-помехи. Вопрос в том, является ли РЧ-помеха переменной во времени (импульсной), узкополосной или широкополосной или же имеет место наложение диаграмм РЧ-помех. Прямая (и косвенная) передача сигналов от наземных сетей, зависящая от плотности населения и финансового благополучия местных жителей, дает постоянный фоновый сигнал. Спутники и воздушные службы могут вызывать как постоянные, так и импульсные компоненты РЧ-помех. В зависимости от расположения обсерватории относительно ближайших воздушных коридоров на ее работу могут влиять как прямые сигналы от авиационных трасс, так и отраженные сигналы от наземных объектов, таких как радиолокаторы аэропортов. Большинство РЧ-помех возникают как следствие связи по боковым лепесткам с активными службами. Однако источниками пагубного воздействия связи между главными лучами могут являться спутники и воздушные службы. В качестве примера можно привести помехи от спутника "Cloudsat" на частоте 94 ГГц. Помимо внешних РЧ-помех в принципе возможно появление внутренних РЧ-помех, создаваемых компьютерной техникой и электронным оборудованием обсерватории; эти источники могут быть идентифицированы и должны быть надлежащим образом экранированы.

В четвертых, изменчивость РЧ-помехи во времени может особенно сильно влиять на астрономические наблюдения, для которых время является критически важным параметром. Переменные, неповторяющиеся РЧ-помехи, возникающие в процессе исследования нестационарных явлений и пульсаров, могут уничтожить результаты важных наблюдений, в том числе уникальных и неповторимых. Они могут влиять на временную последовательность импульсов, а также на калибровку данных в том случае, если время является критически важным параметром.

И наконец, среда РЧ-помех в последние годы быстро меняется по мере появления новых прикладных услуг и исчезновения старых. Появление широкополосных приложений с расширением спектра для радиовещания и связи, а также нелегальных устройств, которые вместо прежних мощных пиковых сигналов используют более широкополосные и менее мощные, приводит к возникновению сигналов, которые нелегко исключить из данных, получаемых службой РАС. Более интенсивное использование спектра и динамического доступа к спектру все сильнее изменяет характер среды РЧ-помех и требует от радиоастрономического сообщества регулярного пересмотра методов по снижению негативного воздействия РЧ-помех на результаты радиоастрономических наблюдений.

8.3 Методы ослабления РЧ-помех – уровни ослабления

Некоторые методы ослабления РЧ-помех могут использоваться на различных этапах получения данных. Первым и наиболее действенным методом является управление приходящими РЧ-помехами до их поступления в приемник при помощи изменения локальной и региональной среды РЧ-помех. В качестве второго уровня могут использоваться методы предварительного обнаружения в самой приемной системе, возможно соединенной с буфером приема данных. Третий уровень, включающий цифровое удаление (вырезание) и методы устранения РЧ-помех, может быть использован до корреляции. С появлением программной (SW) корреляции данных эти цифровые методы могут быть включены в процесс корреляции. В соответствии с четвертым возможным уровнем цифровые методы следует применять после корреляции и после интеграции данных или их буферизации. И наконец, пятый уровень ослабления заключается в обработке (вырезании и маркировке) полученных астрономических данных в целях устранения воздействия известных и неизвестных источников РЧ-помех.

Эффективность всех указанных методов зависит от INR, т. е. от относительной интенсивности РЧ-помех или от соотношения разброса шумов системы к разбросу РЧ-помех. Большинство методов

эффективны только в случаях, когда наличие РЧ-помех при передаче данных может быть четко определено; при этом воздействие РЧ-помех может быть устранено вплоть до мгновенного уровня шума. Показателем эффективности этих методов служит выигрыш при обработке данных после подавления или уменьшения РЧ-помех, представляющий собой отношение SNR (после применения) к SNR (до применения).

Степень эффективности любого метода зависит от требуемого уровня подавления, так как каждый уровень ослабления имеет свои ограничения. В данном случае играет роль полоса частот, занимаемая астрономическим сигналом, по отношению к полосе частот РЧ-помехи. Важным является тот факт, что потери исследуемого сигнала (SOI) рассматриваются при оценке результатов ослабления, так как эти потери отличаются для каждого метода. Однако последовательное применение нескольких методов оказывает совокупное воздействие, поскольку каждый последующий уровень ослабления применяется в отношении РЧ-помех, оставшихся после предыдущей обработки, т. е. в отношении остаточных помех. Кроме того, каждый применяемый метод может обеспечивать измерение "токсического действия", т. е. ущерба, причиняемого данным, который приводит к постоянно нарастающему ухудшению их качества. Общий ущерб, нанесенный данным, в качестве меры потери данных в результате (последующей) обработки в целях ослабления помех количественно выражается как отношение SNR (после обработки) к SNR (при отсутствии РЧ-помех).

8.4 Профилактические методы – изменение среды РЧ-помех

Координация с активными пользователями и обращение к национальным и международным регуляторным положениям могут способствовать снижению вероятности появления РЧ-помех на радиоастрономической станции, а также ослаблению их воздействия на наблюдения. Совершенствование и укрепление регуляторной базы на национальном, региональном и международном уровнях играет важную роль для защищенного использования спектра пассивными службами – материалы, которые могут служить обоснованием данного подхода, содержатся в настоящем Справочнике, в Рекомендациях МСЭ-R, в частности в серии "Радиоастрономия" (RA), в сериях RA Отчетов МСЭ-R и в Справочнике CRAF. Для изменения среды РЧ-помех, которые создаются наземными источниками на телескопе, могут использоваться координационные зоны и зоны радиомолчания. Установка передатчиков в непосредственной близости (в радиусе 2–6 км) от обсерватории запрещается в соответствии с местными и национальными регуляторными положениями, действующими в отношении многих обсерваторий. Для некоторых станций наблюдения проводится широкомасштабная координация и развертываются зоны радиомолчания. Вот несколько примеров: Национальная зона радиомолчания вокруг станции Грин-Бэнк (Западная Вирджиния, США), Пуэрториканская координационная зона вокруг обсерватории Аресибо в Пуэрто-Рико или координационная зона, созданная вокруг обсерватории ALMA в пустыне Атакама, Чили. Окружающие условия для размещения новых телескопов, например два предполагаемых места для антенного комплекса размером в один квадратный километр, регулируются с помощью опережающих регуляторных положений на национальном уровне. Это позволит проводить на данных территориях наблюдения с максимальной чувствительностью.

В связи с тем что гораздо лучше решать проблемы, связанные с возможными РЧ-помехами, заранее, до развертывания систем наблюдения, важно идентифицировать как действующие, так и будущие передатчики, которые могут оказывать воздействие на участки спектра радиочастот, представляющие интерес для обсерватории. Это можно реализовать путем отслеживания изменений в местном лицензионном законодательстве и учета тенденций использования спектра. Контроль за использованием спектра может применяться для определения тенденций, идентификации "соседей по спектру" и для того, чтобы "знать своего врага". Контроль за использованием спектра также является инструментом для определения процента потери данных, вызванных помехами в пассивных полосах частот.

Опыт показывает, что зачастую обсерватории сами являются источниками значительных РЧ-помех. Компьютерное и электронное оборудование, расположенное в зданиях, способно создавать гармонические и внеполосные излучения, которые поступают в систему обнаружения телескопа. Выявление и устранение этих источников является высокоприоритетной задачей для каждой обсерватории. Шкафы, подавляющие РЧ-помехи, клетки Фарадея для размещения электронного и компьютерного оборудования, а также сокращение деятельности человека (пункты дистанционного

управления) и ограничение локального использования компьютеров – эти средства помогают создать зону радиомолчания в обсерватории. Данные мероприятия являются неотъемлемой частью подготовки каждой обсерватории к проведению наблюдений с максимальной чувствительностью.

8.5 Предварительное обнаружение и последующее обнаружение

Стандартным методом исключения РЧ-помех в частотной области является установка в приемнике полосового фильтра или фильтра высоких/низких частот. В результате появляются внесенные потери, и существенно повышается температура системы на частотах, близких к границе полосы. Влияние подобных фильтров может быть существенно снижено путем применения технологии сверхпроводящих фильтров. Фильтрация полос частот РАС служит для предотвращения повреждения оборудования из-за наличия мощных сигналов за пределами полосы. Помимо прочего, фильтрация приводит к потере данных при наблюдении в непрерывном спектре. Вместе с тем зачастую возникает необходимость в проведении наблюдений в спектральных линиях при возникновении РЧ-помехи на критической частоте в пределах полосы пропускания приемника.

Для удаления помех во временной области можно использовать гашение или блокирование процесса получения данных, в частности прекращение накопления данных в корреляторе. Этот метод успешно применялся для импульсных и периодических сигналов. В обсерватории Аресибо используется система гашения радиолокаторов аэропорта, которая прекращает обработку в корреляторе синхронно с периодом импульса радиолокатора в течение окна времени, предназначенного для нейтрализации артефактов на радиолокаторе, возникающих вследствие особенностей рельефа и многолучевого рассеяния. Если эта разновидность РЧ-помех возникает в пределах полосы, распределенной РАС, то потерянные данные рассматриваются как потери времени наблюдения.

Большой объем исследовательской работы посвящен разработке надежных приемников с высокой степенью линейности, способных работать в жестких условиях РЧ-помех. Широкополосные наблюдения возможны в том случае, если приемные системы достаточно линейны, и поэтому отсутствуют эффекты наложения, интермодуляционные составляющие и не возникает перегрузка.

8.6 Предварительная корреляция

8.6.1 Цифровая обработка на базе антенн

Цифровая обработка в реальном времени может производиться в рамках ПЧ-обработки на однозеркальных радиотелескопах (РТ), а также в рамках процесса обработки на станции и/или формирования луча для оборудования в составе антенной решетки. Этот экономически эффективный метод целесообразно применять для импульсных (переходных) РЧ-помех. Данный метод требует быстрой выборки данных, а также наличия циклов вычислений на каждой из станций. В количественном выражении потеря данных определяется импульсной природой РЧ-помех. При помощи маркировки и удаления в реальном времени на основе промежуточной частоты удается минимизировать потерю данных, возникающую в результате применения метода маркировки и удаления, направленного лишь на пораженные РЧ-помехами временные и частотные сегменты; это не должно наносить дополнительного ущерба соседним временным и частотным интервалам. Этот метод отличается от посткорреляционной обработки, которая является более эффективной, поскольку для маркировки и удаления базовых линий и антенн используются интегрированные выборки данных.

Пороговая фильтрация как во временной, так и в частотной областях может применяться в том случае, если сигнал РЧ-помехи в выборочных данных достаточно мощный и его можно идентифицировать, а занятость спектра РЧ-помехой относительно невелика. Пороговая фильтрация впервые была применена для устранения РЧ-помех на телескопе Ratan 600 и с тех пор использовалась много раз. Недавно пороговая фильтрация была успешно применена на синтез-радиотелескопе в Вестерборке (WSRT), где данные с двойной поляризацией на частоте 20 МГц, полученные с каждого из четырнадцати телескопов, обрабатывались в реальном времени. Метод пороговой фильтрации также применялся для обработки информации о пульсарах, предшествующей свертке периода.

Методы подпространственной фильтрации заключаются в поиске определенной формы колебаний в компоненте данных о мощности РЧ-помех в целях ее идентификации и устранения. Особенно успешно применяется поиск стационарности по циклам среди данных, который эффективен для борьбы с сигналами РЧ-помех, имеющими цифровую модуляцию.

В другой разновидности подпространственного удаления используется анализ распределения вероятностей сигнала. Поскольку влияние РЧ-помехи изменяет вид спектра мощности на нецентральное (хи-квадратное) распределение, определяемое моментами более высоких порядков, оно может быть удалено из данных. Аналогичный подход заключается в использовании куртозиса (четвертого момента спектра мощности) для идентификации и устранения компонента РЧ-помехи. Этот метод использовался в наблюдениях Солнца при помощи однозеркального телескопа, а также для (пост)корреляционной обработки в программной корреляционной среде. Медианная фильтрация и использование преимуществ медианных свойств многоэлементной системы также предполагают использование статистических свойств данных и эффективны при ослаблении в реальном времени РЧ-помех, влияющих на данные наблюдений в спектральных линиях.

Предкорреляционные методы ослабления, включающие удаление выборок данных, приводят к изменениям в калибровке данных по усилению. При этом необходимо точно рассчитывать ресурсы, что позволяет определить влияние на данные и соответствующую потерю данных. Замена поврежденных данных в частотной (или временной) области эмпирически подобранной базовой линией влияет только на среднеквадратическое значение в пораженных каналах.

8.6.2 Адаптивное (временное) шумоподавление

Адаптивное шумоподавление (ANC) часто используется в системах связи и военных технологиях. Основным принципом временной адаптивной фильтрации является применение к полученным данным быстрого преобразования Фурье (БПФ), выполнение действий по адаптации над элементами разрешения по частоте и последующий возврат к частотной области через обратное БПФ. Этот метод, основанный на фильтрации Винера, эффективен в тех случаях, когда сигналы помех обладают значительным отношением помеха/шум (INR), т. е. когда РЧ-помеха доминирует над системным шумом. Подавление мешающего сигнала может приблизительно соответствовать его мгновенному отношению INR. Адаптивные фильтры эффективны в случаях, когда спектральная информация не имеет особого значения, например при изучении пульсаров и непрерывного спектра. Данный метод также эффективно применялся с многоэлементными решетками или решетками в фокальной плоскости на однозеркальных телескопах (см. следующий раздел). Одним из вариантов адаптивной фильтрации является вычитание эталонного канала данных из сигнального канала данных с использованием копии самой РЧ-помехи путем сравнения сигналов "включенный источник плюс РЧ-помеха" и "выключенный источник плюс РЧ-помеха". В ряде действующих систем телескопов копия РЧ-помехи формируется при помощи вспомогательной эталонной антенны, направленной на источник помех. Однако в этом случае каждый отдельно взятый источник РЧ-помех нуждается в своей собственной антенне.

Параметрическая оценка известных сигналов РЧ-помех и их вычитание из данных успешно применялись при передаче сигналов спутником "Глонасс С/А" путем использования известных параметров модуляции – без применения вспомогательных антенн удалось добиться подавления сигнала более чем на 20 дБ. Целью недавнего внедрения методов адаптивной фильтрации является удаление сигнатуры передач сигналов L3 от одиночного спутника GPS в обсерватории Аресибо.

8.6.3 Пространственная фильтрация и управление положением нуля

Каждая из многоэлементных антенных решеток имеет боковые лепестки и провалы в диаграмме направленности, которые могут использоваться для подавления сигналов от локализованных источников РЧ-помех. Как правило, адаптивная система, использующая алгоритм формирования луча, требует высокого уровня отношения INR и ограничена небольшим количеством объектов воздействия РЧ-помех, отслеживаемых в процессе наблюдения. Необходимо также, чтобы источники РЧ-помех в процессе наблюдения оставались стабильными и предсказуемыми. Пространственная фильтрация в режиме формирования луча при ограниченном количестве источников РЧ-помех в большинстве случаев не приводит к ухудшению изображения, формируемого главным лучом.

Для определения направления прихода сигналов и для реализации алгоритмов формирования луча применяются технологии "умных" антенн, использующие многочисленные датчики в системах связи и радиолокации. Аналогичным образом телескопы нового поколения с множеством датчиков, в зоне прямой видимости которых находятся идентифицированные источники РЧ-помех (например, низкочастотная антенная решетка (LOFAR) и радиотелескоп Murchison Widefield Array (MWA)),

позволяют оптимизировать процесс формирования луча путем включения адаптивного подавления помех в реальном времени и пространственной фильтрации сигналов, излучаемых отдельными источниками РЧ-помех. При практической реализации для формирования двух отдельных лучей использовались сто антенн LOFAR, при этом постоянный нулевой провал диаграммы находился в одном положении – под углом 15° над горизонтом. Тщательно откалиброванные, оборудованные множеством датчиков фазовые антенные решетки позволяют управлять положением нуля в диаграмме направленности антенны и отслеживать спутник, поддерживая на целевом поле луч с высоким усилением, несмотря на то что сложность обработки существенно возрастает, если речь идет о многоспутниковой системе.

Для прореженных решеток с относительно длинными базовыми линиями в первую очередь может производиться корреляция, а затем – синтез лучей. Если предположить, что источники РЧ-помех локализованы, то их подавление достигается путем обработки кратковременных интервалов потока данных и применения комплексного взвешивания в процессе обработки изображений. Компьютерное моделирование посткорреляционной пространственной фильтрации показывает, что очистка при помощи луча, скорректированного по РЧ-помехе, может оказаться эффективным методом.

Системы с решетками в фокальной плоскости (FPA) и многолучевые приемники предоставляют новые возможности для применения пространственной фильтрации, поскольку каждый из компонентных облучателей, наряду с общим сигналом РЧ-помехи, имеет независимый небесный сигнал. Кроме того, в многолучевой системе один из облучателей всегда может использоваться в качестве эталонной антенны.

8.7 В процессе корреляции

В процессе корреляции оцифрованные данные, как правило, интегрируются по интервалам времени в диапазоне от длины интервала выборки до нескольких секунд, благодаря чему отношение помеха/шум (INR) значительно возрастает. В результате постоянный, но слабый сигнал РЧ-помехи, который не может быть обработан в реальном времени, и слабые (спектральные) сигналы, оставшиеся после предыдущих процедур ослабления, становятся доступными для обработки. С другой стороны, при помощи этой интеграции могут быть снижены высокие пиковые значения переменного сигнала РЧ-помех. Что касается оборудования антенной решетки, то пространственная фильтрация, являющаяся результатом слежения за задержкой (интерференционной полосой) небесного источника, снижает также интенсивность наземной РЧ-помехи в данных с перекрестной корреляцией.

На этом этапе процесса сбора данных могут быть задействованы протоколы несовпадения в целях идентификации компонентов РЧ-помех, а также цифровая обработка ослабления помех и использование данных эталонной антенны. Программные корреляторы нового поколения позволяют выполнять интеграцию приложений (маркировку на основе куртозиса) до и после FX-корреляции (преобразование Фурье перед умножением) и протоколов стека. В системе LOFAR применяется ослабление помех на разных стадиях процесса обработки. Для однозеркального оборудования корреляционная обработка (нескольких) отдельных полос может включать как определение порога или статистические методы, так и шумоподавление при помощи эталонной антенны.

Применение цифровой обработки и входных сигналов, полученных от эталонных антенн в процессе программной корреляции, эквивалентно описываемой выше обработке путем предварительной корреляции полосы модулирующих частот. С другой стороны, реализация данных методов в стандартных (существующих) аппаратных выходных буферах требует дополнительной установки специального аппаратного и программного обеспечения.

8.8 Посткорреляция – до или в процессе обработки изображений

Традиционная пост-корреляционная обработка включает в себя маркировку и удаление. Эти процедуры занимают много времени и часто выполняются вручную. Поскольку эта операция применяется к интегрированным и коррелированным данным, потеря данных, возникающая в результате маркировки, может быть довольно существенной, тем более что маркировке могут подвергаться целые временные слоты, целые базовые линии и/или целые антенны. В отличие от этого при маркировке или удалении на основе антенн маркируются небольшие подмножества, и это неизбежно приводит к относительному сокращению общей потери данных.

Онлайн- или офлайн-обработка (интегрированных) коррелированных данных позволяет задействовать автоматическую маркировку и удаление, при этом более сложная статистическая или подпространственная обработка (см. п. 8.6.1) может выполняться для удаления компонента РЧ-помех, не приводя к значительной связанной потере данных.

На самом деле эталонная антенна была введена в действие на стадии посткорреляции в целях устранения сигнала от четко определенного источника с использованием имеющихся отношений замыкания.

Для удержания граничной частоты центральной позиции наблюдения на нулевой отметке во время наблюдений в оборудовании антенной решетки используются методы блокирования граничной зоны и компенсации задержки. В результате стационарные (наземные) и спутниковые компоненты РЧ-помех, входящие в состав данных, разделяются путем более быстрого, чем в астрономических источниках, образования интерференционных полос, т. е. на частоте блокирования граничной зоны. Это четко выраженное (относительное) движение позволяет осуществлять офлайн-идентификацию и удаление сигналов от стационарных источников РЧ-помех из коррелированных данных, а также из плоскости изображений, не приводя к потере данных. Код, который первоначально применялся в GMRT, теперь включен в состав AIPS.

8.9 Реализация на телескопах – стратегия

Процесс сбора данных в радиоастрономических обсерваториях постоянно совершенствуется в соответствии с быстро развивающейся научно-технической средой. Аналого-цифровые преобразования сигналов в настоящее время выполняются на ранних этапах схемы обработки данных, что позволяет производить цифровую обработку на протяжении большей части цепочки данных. Более совершенные характеристики позволяют проводить обработку данных в более широкой полосе частот, с более высокой разрешающей способностью по времени и более высокой разрешающей способностью по частоте ($< \text{кГц}$).

Многие действующие выходные буферы не позволяют реализовать ослабление помех на ранних стадиях цепочки обработки данных без проведения серьезной модернизации аппаратного обеспечения. В отличие от них, выходные буферы нового поколения и программная корреляция дают возможность задействовать подобные схемы на различных этапах обработки данных.

Поскольку для каждого из методов ослабления помех требуется определенное пороговое значение INR, для удаления большинства РЧ-помех необходимо многоуровневое применение методов, позволяющее использовать прогрессивную интеграцию данных и возрастающее отношение INR. В то время как ни один из методов не способен удалить РЧ-помехи, уровень которых ниже минимального уровня шума, последующие этапы ослабления помех могут удалить остаточный ослабленный сигнал РЧ-помехи, а также слабую РЧ-помеху, которая становится заметной только после интеграции.

Использование вспомогательных антенн в составе оборудования антенных решеток зависит от возможности задействования их выходного сигнала в системе обработки, точнее в корреляторе. Направленные эталонные антенны, как правило, работают с определенными источниками РЧ-помех и менее эффективны в сложных условиях.

Вмешательство оператора в процесс ослабления РЧ-помех играет важную роль в практической работе. Таким образом, онлайн-обработка в реальном времени, которая может быть адаптирована к разнообразным сигнатурам РЧ-помех, может иметь приоритет перед ограниченным применением эталонных антенн и/или пространственной фильтрации для известных и фиксированных передатчиков. Эта технология, вероятно, будет применяться до тех пор, пока не будет задействована какая-либо схема управления с искусственным интеллектом, способная руководить процессом ослабления РЧ-помех.

Интерферометры менее восприимчивы к воздействию РЧ-помех. Блокирование граничной зоны и декорреляция путем компенсации задержки обеспечивают естественное подавление на более длинных базовых линиях. Однако мощная РЧ-помеха по-прежнему увеличивает системный шум и влияет на калибровку и комплексную видимость станции. Станции VLBI и распределенные сети датчиков способны реализовать ослабление помех на каждой отдельно взятой станции, тем самым снижая воздействие локальной РЧ-помехи на всю систему в целом.

Для выполнения корректной калибровки системы необходим точный расчет ресурсов для всех поврежденных данных. Это позволяет получить корректные весовые значения для последующей самокалибровки, процедур очистки и обработки изображений.

В будущем для реализации ослабления помех необходимо рассмотреть более совершенные методы, нежели простые (на основе куртозиса и прочие) алгоритмы маркировки и удаления РЧ-помех, которые в основном применяются в настоящее время. Применение статистических методов, в которых используются моменты более высокого порядка, дает возможность удалять компоненты РЧ-помех, не затрагивая остальные данные. Существуют методы, позволяющие выполнять частичное восстановление информации, тем самым сокращая потери данных. Адаптивная фильтрация систем с расширением спектра может применяться в том случае, если известны их схемы цифровой манипуляции.

8.10 Выводы

Онлайн- и офлайн-обработка данных успешно применялись для улучшения обстановки по РЧ-помехам в радиоастрономических обсерваториях. Несмотря на наличие многочисленных эффективных вариантов ослабления помех, выбор метода сильно зависит от характеристик РЧ-помехи, типа радиотелескопа и вида наблюдений. В частности, в переменной среде РЧ-помех может быть предпочтительна онлайн-обработка данных в реальном времени, в то время как для известных и фиксированных источников РЧ-помех более целесообразными могут быть специальные методы с использованием эталонных антенн и пространственной фильтрации. Помимо этого, привлекательным вариантом может стать автоматическая онлайн-обработка, не требующая вмешательства оператора в процесс ослабления помех.

Универсального метода ослабления РЧ-помех, влияющих на астрономические данные, не существует. Эффективность подавления РЧ-помех зависит от отношения помеха/шум и ее временных и спектральных характеристик. Количественная оценка используемого метода не всегда возможна, поскольку алгоритмы ослабления помех представляют собой, как правило, нелинейные процессы, которые могут влиять на шумовые характеристики и калибровку. Фактором, определяющим оценку выбранного метода, является суммарная потеря данных в результате его применения.

Для работы в более распространенных средах РЧ-помех может возникнуть необходимость применения нескольких методов. Однако удаление РЧ-помех на каждом этапе ослабления изменяет характеристики данных. Кумулятивный эффект ослабления РЧ-помех при этом не является линейным, а представляет собой сумму практически достижимых результатов.

Стоимость компьютерного оборудования и оцифровки данных быстро снижается, что дает возможность внедрения и автоматизации алгоритмов ослабления РЧ-помех. Это позволяет увеличить ширину полосы пропускания, повысить разрешающую способность по времени и спектральную разрешающую способность астрономических наблюдений. Однако с учетом постоянно растущих объемов данных необходимо внедрять коммуникации для автоматического сокращения данных и соответствующие алгоритмы автоматического ослабления помех.

На рынок выходят все новые и новые технологии электросвязи и радиовещания, часто реализованные в виде нелегализованных мобильных устройств. Эти устройства, постоянно меняющееся местоположение которых контролировать невозможно, оказывают вредное воздействие на работу обсерваторий. Необходимо найти алгоритм удаления подобных сигналов из результатов астрономических наблюдений. Особенно серьезную проблему для пассивных служб представляют устройства с расширением спектра (ультраширокополосные), поскольку их цифровые схемы модуляции перекрывают границы распределений спектра. Проведенные предварительные расчеты показывают, что количество передающих устройств, используемое каждым человеком, растет быстрыми темпами. Многие из этих устройств работают по принципу динамического доступа к спектру.

Пространство исследований для радиоастрономии в значительной степени определяется техническими характеристиками системы наблюдения и ограничивающими факторами, в частности средой РЧ-помех. В то время как телескопы нового поколения размещаются в наиболее пустынных, незаселенных местах, действующие системы вынуждены сосуществовать с локальной инфраструктурой. Для того чтобы РЧ-помехи не стали фактором, ограничивающим работу действующих систем, основное внимание следует уделять управлению использованием спектра.

ГЛАВА 9

Зоны радиомолчания

9.1 Введение

Настоящая глава посвящена определению зоны радиомолчания (RQZ) и основным аспектам ее создания и поддержки. Более полное описание и многочисленные примеры представлены в Отчете МСЭ-R RA.2259 "Характеристики зон радиомолчания".

9.1.1 Определение и общие требования зоны радиомолчания

Некоторые администрации создали зоны радиомолчания вследствие того, что радиоастрономические наблюдения, проводимые с поверхности Земли, изначально чувствительны к преднамеренным и непреднамеренным радиопомехам от антропогенных источников. Зона радиомолчания, по приведенному здесь определению, – это любая официально установленная географическая область, в пределах которой изменены стандартные процедуры по управлению использованием спектра с конкретной целью – сокращение или избежание помех для радиотелескопов и оптимизация условий проведения наблюдений.

Имеется целый ряд различных процедур, которые могут применяться к некоторым конкретным полосам частот, периодам времени и/или к различным классам источников помех. Управление может осуществляться на технической, географической или регуляторной основе. Таким образом, в зависимости от конкретных требований к различным радиотелескопам применяются различные определения зон радиомолчания и методы управления.

Большинство ограничений, вводимых в зонах радиомолчания, относятся к фиксированным, наземным передатчикам, а не к авиационной или спутниковой передаче сигналов. Причина заключается в том, что помехи, возникающие в мобильных, в особенности авиационных источниках, являются, как правило, кратковременными; их легко обнаружить, однако источник помех к моменту идентификации обычно исчезает. Ограничения для зоны радиомолчания не распространяются на передачу спутниковых сигналов. В Отчете МСЭ-R RA.2259 определен широкий спектр используемых средств управления, и приведены примеры различных зон RQZ по всему миру.

Важно подчеркнуть, что наличие зоны радиомолчания не означает полное отсутствие передачи радиосигналов. Всегда будет необходимость сосуществования с некоторыми техногенными устройствами. В зоне RQZ могут быть предусмотрены варианты уведомления других пользователей и переговоров в целях ослабления помех. Таким образом, RQZ является буферной зоной, в которой с помощью эффективных стратегий по ослаблению помех и нормативному регулированию работы радиочастотных передатчиков реализуются механизмы защиты радиоастрономических наблюдений от вредных радиочастотных помех.

9.1.2 Роль нормативного регулирования

Регуляторное управление локальными радиопомехами осуществляется на национальной основе правительственными регуляторными органами. Ключевым компонентом национального регулирования является план использования радиочастотного спектра, в котором закрепляется распределение полос частот службам, причем несколько полос частот распределены радиоастрономической службе. Национальные планы использования спектра опираются на Регламент радиосвязи МСЭ в той степени, в какой это необходимо для избежания вредных помех между разными странами.

Как указано в Отчете МСЭ-R RA.2259, национальные регуляторные органы могут применять различные средства управления для зон радиомолчания и содействовать решению проблем, связанных с вредными помехами, которые возникают при несоблюдении регуляторных положений.

В случае наличия помех между различными национальными администрациями, МСЭ вправе содействовать решению данных вопросов. Маловероятно, что это имеет отношение к зонам радиомолчания.

9.2 Соображения, касающиеся построения зоны радиомолчания

9.2.1 Географический аспект

Наиболее приемлемым является расположение радиоастрономических станций как можно дальше от густонаселенных районов, на тех территориях, рельеф местности которых обладает некоторым экранирующим эффектом. Специалисты некоторых обсерваторий обнаружили, что хвойные леса, окружающие радиотелескопы, оказывают благоприятное воздействие на их работу. Благодаря наличию влаги в иголках, они обеспечивают дополнительную защиту от РЧ-помех, поступающих от горизонта, и особенно на частотах свыше нескольких гигагерц. Координация зон радиомолчания представляет особую сложность, когда обсерватории расположены на горных вершинах и имеют сверхдлинные линии прямой видимости (LoS).

Согласно одной из моделей зон радиомолчания работа любых передатчиков в данной зоне запрещена, возможно, в конкретном частотном диапазоне, который связан с работой радиотелескопа. В другой модели работа передатчиков разрешена до тех пор, пока уровень принимаемого сигнала на радиоастрономической станции не превысит заданный порог помех опять же в каком-то частотном диапазоне. В других зонах радиомолчания может применяться комбинация двух моделей – с "внутренним кольцом", в котором работа передатчиков запрещена, и "внешним кольцом", в котором передатчики должны соответствовать определенным критериям помехозащищенности. Некоторые зоны радиомолчания действуют во всем спектре радиочастот.

Наиболее значительные для радиоастрономии помехи создают воздушные суда. Должна быть рассмотрена возможность создания над обсерваторией национальной бесполетной зоны. Такая мера поможет сократить количество воздушных источников помех на борту воздушных судов, но не устранил их полностью, так как радиогоризонт воздушного судна на крейсерской высоте может достигать 400 км.

9.2.2 Частотные аспекты

Частотный диапазон для работы в зоне радиомолчания должен быть непосредственно связан с защищенной работой астрономических приборов, находящихся в ней. Необходимо контролировать только те частоты, которые требуются для защищенной работы как действующих, так и планируемых астрономических приборов. Тем не менее необходимо охватывать более широкие частотные диапазоны в связи с широкими полосами пропускания современных радиоприемников и стремлением следовать доплеровскому сдвигу спектральных сигналов для снижения частот в расширяющейся Вселенной. Зона радиомолчания, вероятно, будет охватывать частотные диапазоны, используемые другими многочисленными системами радиосвязи.

9.2.3 Воздействие РЧ-помех на наблюдения РАС

Воздействие РЧ-помех на радионаблюдения варьируется в широких пределах – от простого увеличения уровней шума, которые можно ослабить, до тех уровней, при которых приемник радиотелескопа может выйти из строя. Для нормального функционирования службы РАС интенсивность РЧ-помех не должна превышать того уровня, при котором усилители приемников становятся нелинейными. Ослабление уровня РЧ-помехи в некоторой степени необходимо, даже если он достаточно низок для проведения радионаблюдений. Наибольшее преимущество зон радиомолчания заключается в характерных для них низких уровнях РЧ-помех, которые не только защищают радиоастрономические приемники, но и делают возможным применение наиболее простых способов ослабления помех. Более предметное обсуждение воздействия РЧ-помех на наблюдения РАС приводится в главах 6 и 8.

9.3 Электромагнитная среда

Существуют разнообразные источники помех, влияющих на радиоастрономические наблюдения, и для каждого из них может потребоваться отдельный вид контроля.

Проблему индивидуальных помех, создаваемых одиночными передатчиками, можно в большинстве случаев решить с помощью действующих процессов управления использованием спектра. Однако минимальный уровень шума возрастает из-за увеличения количества устройств, развертывания систем подвижной связи и других электронных приборов, излучающих как преднамеренные (т. е. полезные), так и случайные сигналы. Для того чтобы выявлять проблемы до того, как они проявятся в виде значительных потерь данных и времени наблюдения, необходима программа систематического измерения минимального уровня шума и его изменений во времени.

9.3.1 Источники полезных сигналов

Источники полезных сигналов – это системы и устройства, которые создают радиочастотные излучения, предназначенные для связи или зондирования; т. е. передача радиоэнергии – неотъемлемый элемент их функционирования. В целом это означает, что полоса частот, ширина полосы, уровень передаваемой мощности, схема модуляции и другие эксплуатационные параметры известны или могут быть рассчитаны с определенной точностью. Кроме того, источники полезных сигналов работают в основном в узких диапазонах частот в отличие от источников случайных сигналов или радиоастрономических приемников, которые охватывают широкие полосы частот.

МСЭ-R дает определения множеству служб радиосвязи, в том числе наземным системам (воздушная подвижная, воздушная радионавигационная, любительская, радиовещательная, фиксированная, сухопутная подвижная, морская подвижная, морская радионавигационная, вспомогательная служба метеорологии, радиолокационная, радионавигационная, служба стандартных частот и сигналов времени) и спутниковым системам (спутниковая служба исследования Земли, фиксированная спутниковая, межспутниковая, служба метеорологических спутников, подвижная спутниковая, служба космической эксплуатации и служба космических исследований).

К лицензированным устройствам радиосвязи относятся устройства, работа которых разрешена национальными регуляторными органами. Лицензирование таких устройств может осуществляться на индивидуальной основе, в данном случае регуляторный орган обладает сведениями о местоположении (или зоне действия), частоте, мощности, полосе пропускания, модуляции, высоте антенны, диаграмме направленности излучения и других параметрах станции. Тем самым контроль в зоне радиомолчания можно в некоторой степени осуществлять, ограничивая или сокращая количество определенных типов передатчиков, например, по полосе частот или по уровню мощности. Многие администрации также обладают функцией лицензирования спектра, в соответствии с которой пользователи имеют право задействовать данную полосу частот на определенной географической территории, возможно на определенный промежуток времени. На основании лицензии на использование спектра пользователи могут по своему усмотрению развертывать радиопередатчики в пределах назначенной частоты и географической территории. Вследствие этого контролировать зону радиомолчания сложнее, чем отдельные вышеуказанные лицензированные устройства, кроме тех случаев, когда в условиях лицензирования спектра указаны конкретные ограничения, действующие в зонах радиомолчания.

Устройства с лицензированным классом (или нелицензированные) – это устройства, которые работают без специального лицензионного соглашения между пользователем и регуляторным органом. Согласно национальным регуляторным положениям данные устройства могут работать только в определенных полосах частот, у них ограничена мощность, полосы пропускания и другие параметры. Данные устройства часто являются мобильными и, как правило, маломощными. Примерами могут служить беспроводные телефоны, Wi-Fi, идентификационные радиочастотные метки и автомобильные системы доступа без ключа. В общем случае это устройства любительского уровня, которые могут также применяться на крупных предприятиях. Осуществлять контроль передатчиков с лицензированным классом в зоне радиомолчания сложнее, чем контроль лицензированных устройств, поскольку национальный регуляторный орган не обладает сведениями о местонахождении устройства и других его эксплуатационных параметрах.

Как отмечалось выше, радиопередатчики на борту воздушного судна также могут создавать помехи радиоастрономическим приемникам.

9.3.2 Источники случайных сигналов

Источники случайных сигналов излучают радиочастотный шум как побочный продукт своей основной деятельности. Как правило, в отличие от источников полезных сигналов, эти излучения генерируются

с меньшей спектральной плотностью мощности, но в более широких полосах частот. Излучаемая радиочастотная энергия не определяется в достаточной мере уровнем мощности, частотой или статистическими характеристиками, а является комбинацией фонового шума с гауссовым распределением и импульсного шума с более высоким уровнем, но меньшей вероятности.

Оборудование, предназначенное для промышленного и бытового использования, является потенциальным источником радиопомех. Хотя уровень помех отдельно взятых устройств вряд ли будет превышать установленные стандарты, однако их суммарное излучение может быть достаточно мощным и создавать серьезные помехи для работы радиообсерваторий. Подобные помехи скорее всего будут иметь широкополосный шумоподобный спектр, на который накладываются узкополосные, изменяющиеся во времени сигналы.

Системы зажигания автомобилей, а также другие электродвигатели (вентиляторы, стеклоочистители, обогреватели и т. д.) также являются источниками радиочастотного шума. Шум, как правило, возрастает с увеличением частоты, поэтому полосы частот ниже примерно 1 ГГц в наибольшей степени подвержены воздействию помех. Многие автомобили оборудованы компьютерными системами управления двигателем, которые также являются потенциальными источниками помех.

Радиопомехи от линий электропередачи могут возникать из-за искрообразования, а от линий с напряжением около 70 кВ и выше – из-за коронных разрядов. В последнее время рассматривается использование сетей передачи электроэнергии в качестве средства доставки услуг электросвязи.

В системах электросвязи по линиям электропередачи (PLT) используются радиочастотные сигналы до 200 МГц, которые применяются на распределительных линиях сети энергоснабжения. Сигналы PLT на данных линиях способны создавать помехи службам радиосвязи, в том числе радиоастрономической службе. Применение модемов PLT, в том числе расположенных на значительном расстоянии от радиоастрономических обсерваторий, может привести к возникновению вредных помех для радиоастрономических наблюдений. Это связано с ионосферными эффектами распространения в ВЧ-диапазоне и совокупным излучением PLT.

Устройства промышленного, научного и медицинского применения (ПНМ) – это устройства, в которых радиочастотная энергия используется для целей, не относящихся к услугам связи. В качестве примеров можно привести микроволновые печи, аппараты медицинской диатермии и радиочастотные сварочные машины. С точки зрения контроля зоны радиомолчания данные устройства аналогичны устройствам с лицензированным классом и работают, как правило, в тех же полосах частот.

9.3.3 Распространение сигналов помех

Для оценки вероятности создания помех радиоастрономической станции со стороны вышеуказанных потенциальных источников необходимо прогнозировать распространение сигналов РЧ-помех.

Важно различать прогнозирование распространения при проектировании радиосистем и при анализе помех. При проектировании систем следует учитывать максимальные (или близкие к максимальным) потери на трассе между передатчиком и приемником, чтобы обеспечить прием радиосигналов с достаточным уровнем мощности. С другой стороны, чтобы оценить вероятный максимальный уровень мощности радиосигнала во время приема, при анализе помех должны рассчитываться минимальные (или близкие к минимальным) потери на трассе между передатчиком и приемником, подвергающимся воздействию помех. Данное разделение должно соблюдаться при использовании рекомендаций 3-й Исследовательской комиссии МСЭ-R или других методов прогнозирования распространения радиоволн.

Основные механизмы распространения, влияющие на уровень мешающего сигнала от источника помех на входе приемника радиотелескопа, – это потери в свободном пространстве, дифракция, обусловленная неровностями рельефа или другими препятствиями, затухание в атмосферных газах и/или осадках, волноводное распространение, рассеяние или отражение от метеоров и пролетающих воздушных судов.

9.4 Методы реализации зон радиомолчания

Существует целый ряд методов реализации зоны радиомолчания. Их можно условно разделить на методы на стороне приемника и методы на стороне передачи. Некоторые из этих методов могут

использоваться в сочетании. Выбор метода в значительной степени зависит от частоты, местоположения, необходимого типа наблюдений, способа использования участка земли и других факторов.

9.4.1 Методы на стороне приемника

Для достижения оптимальных радиочастотных условий при проведении радиоастрономических наблюдений в радиоастрономических обсерваториях используют географические факторы и их влияние на распространение радиочастотного сигнала. Правильный выбор данных факторов представляет собой методику, позволяющую соответствовать требованиям для зоны радиомолчания.

Природа распространения радиочастотных сигналов такова, что мощность помех уменьшается с увеличением расстояния до передатчика. Следовательно, базовый подход заключается в выборе географического местоположения, достаточно удаленного от населенных пунктов и транспортных путей. Данные условия идеально подходят для новых и крупных объектов, однако могут быть практически неподходящими для всех станций, оборудованных радиотелескопами. В качестве точек установки телескопов часто используются горные вершины благодаря их отдаленности; они также обеспечивают более короткую трассу через атмосферу, использование которой особенно выгодно на высоких частотах.

По возможности следует использовать естественное экранирование места астрономических наблюдений. В этом методе, в отличие от точек на горных вершинах, упомянутых ранее, предпочтение отдается расположению в долинах, окруженных холмами или горами. Подобное расположение особенно эффективно при наблюдениях на низких частотах.

Однако отсутствие линий прямой видимости между источниками помех и зоной радиомолчания не гарантирует полное отсутствие помех, так как сигналы передаются по дифракционным трассам, проходящим над местностью, или отражаются от крупных структур и объектов. Предельная эффективность экранирования точки наблюдения обеспечивается, в частности, на низких частотах (ниже 1 ГГц). Влияние дифракции должно оцениваться для заданного диапазона частот по возможности с использованием точных сведений о рельефе местности.

Однако в случаях, когда рельефа местности как такового достаточно для обеспечения адекватной защиты, этот положительный факт может быть сведен к нулю при установке на вершине ближайшего холма всего лишь одного крупного объекта, отражающего радиоволны, например ветряного двигателя.

9.4.2 Методы на стороне передачи. Управление зоной радиомолчания

Контроль источников излучения потенциально мешающих сигналов в пределах зоны радиомолчания является главным аспектом управления этой зоной. При этом необходимо также обеспечивать доставку услуг электросвязи и других услуг в районы с небольшим числом жителей, расположенные в пределах зоны радиомолчания. При определении конкретной зоны необходимо учитывать как требования к аппаратуре, предназначенной для эксплуатации в зоне на данный момент, так и дополнительные функции и аппаратуру, которые, возможно, появятся за время существования этой зоны.

Существует также дополнительная потребность в надлежащих формальных процедурах управления зоной радиомолчания на протяжении десятилетий. Это необходимо для решения прикладных задач общественного и промышленного развития, а также прочих естественных процессов, сопутствующих организации землепользования. Кроме того, при определении данной зоны нельзя забывать о возможности использования новых измерительных приборов и функциональных возможностях ведения наблюдений.

9.4.2.1 Законодательный и регуляторный контроль

Законодательство может обеспечить регуляторную базу для управления источниками РЧ-помех в пределах зоны радиомолчания. Сюда входит нормативное регулирование работы лицензированных и нелицензированных радиопередатчиков (или передатчиков с лицензированным классом) и других видов деятельности, которые могут создавать радиопомехи.

Во многих зонах радиомолчания вокруг станции наблюдения определены зоны ограничения и зоны уведомления. Зона ограничения – это зона, в которой использование устройств радиосвязи ограничено.

Такая зона может быть ограничена для передатчиков, работающих в конкретной полосе или полосах частот. Управление зоной ограничения может осуществляться посредством лицензирования, проводимого регуляторными органами.

Зона уведомления – это зона, в пределах которой необходимо уведомлять регуляторный орган или оператора телескопа о любых планируемых установках радиосвязи (работающих в определенных полосах частот). С процесса уведомления начинается период согласования, в ходе которого оператор телескопа оценивает влияние будущего радиопередатчика на радиоастрономические наблюдения и пытается найти приемлемое для обеих сторон решение вопроса. Зона уведомления, как правило, намного больше, чем зона ограничения.

В общем случае данные регуляторные положения могут применяться только по отношению к лицензированным устройствам радиосвязи. Если речь идет о нелицензированных устройствах или источниках случайных сигналов, применение регуляторных положений ограничено. Однако источники случайных сигналов, как правило, не подпадают под нормативное регулирование использования спектра на национальном уровне. Их контроль может осуществляться в рамках дополнительного местного законодательства.

Важно отметить, что использование зон уведомления и зон ограничения влечет за собой необходимость непрерывного совместного динамического управления зоной радиомолчания на протяжении всего срока работы радиоастрономической обсерватории. Кроме того, предполагается, что реализация зон радиомолчания должна предусматривать максимально возможное количество вариантов последующего расширения функциональных возможностей радиотелескопа (например, с точки зрения полос частот).

Регуляторный контроль также может расширяться в ограниченных географических районах в целях охвата нелицензированных радиоустройств или источников случайных сигналов. Так как данные типы устройств, как правило, обладают малой мощностью, ограничение по географическому признаку не имеет столь большого значения. В непосредственной близости от места размещения телескопа возможно управление физическим доступом в целях предотвращения установки передающих устройств в помещениях станции.

Национальный регуляторный орган либо другая организация, уполномоченная государством, могут также вводить правила для контроля определенных видов деятельности, например тяжелой промышленности или производства на территориях, входящих в зону радиомолчания.

В Таблице 1 указан целый ряд различных национальных зон радиомолчания и методы, используемые для их контроля и управления. Во многих случаях методы, приведенные в таблице, можно применять в ограниченных диапазонах частот, связанных с работой защищаемого оборудования.

ТАБЛИЦА 9.1
Контроль в различных национальных зонах радиомолчания

Зона RQZ/страна	Контроль лицензированных радиопередатчиков	Контроль устройств с лицензированным классом	Служба авиадиспетчерского контроля	Контроль случайных сигналов
LMT/Мексика	Радиус 20 км – нет другой радиосвязи			
NRQZ/США	Площадь 34 000 кв. км – требуется координация работы стационарных передатчиков			Контроль работы электронного оборудования в пределах 10 миль
ALMA/Чили	Отсутствие передатчиков в пределах 30 км; координация в пределах 120 км			
Аресибо/Пуэрто-Рико	Ограничения в пределах 4 км; координация для Пуэрто-Рико и соседних островов	Ограничения в пределах 4 км	Зона запрета полетов над телескопом	Ограничения в пределах 4 км
Разные/Австралия	Зоны уведомления для координации вплоть до 250 км		Зона запрета полетов над телескопами	
MRO/Австралия	Частотный план – служба PAC имеет первичное распределение в пределах 70 км; координационная зона до 260 км	Лицензии классов – помехи недопустимы в пределах 70 км	Зона запрета полетов над станцией	Протокол для электронного оборудования, используемого службой PAC в пределах 10 км
IRAM/Испания	Ограничения для передатчиков в радиусе до 5 км; координация в радиусе до 10 км			Минимальный разнос от промышленных предприятий, железных дорог, ЛЭП 1 км
Итапетинга/Бразилия	Зона диаметром 4 км, не содержащая новых городских объектов	Зона диаметром 4 км, не содержащая новых городских объектов		Зона диаметром 4 км, не содержащая новых городских объектов
AGAA/Южная Африка	Запрет передачи сигналов на площади 140 кв. км, жизненно важные службы только в зоне площадью до 123 408 кв. км		Центральная зона площадью 140 кв. км, контролируемая до высоты 18 500 м	
Пушино/Российская Федерация	Зона диаметром 2 км, не содержащая новых городских объектов	Контроль в пределах зоны 5 км (город Пушино)		Контроль уровня наблюдаемых помех
Dominion RAO/Канада	Строгий контроль лицензий до 200 км	Полное отсутствие на линии видимости и ограничения в пределах 4 км в зависимости от того, какая из зон больше	Срок запрета на полеты истек	Отсутствие городских объектов на линии видимости и ограничения до 4 км в зависимости от того, какая из зон больше
FAST/Китай	Отсутствие передатчиков в радиусе 5 км; координация в радиусе 75 км			

9.4.2.2 Альтернативные технологии и проектирование сетей

Национальный регуляторный орган или оператор телескопа могут на свой выбор предоставить альтернативные виды связи тем, кто создает вредные радиопомехи. Например, подходящей заменой телевизионному радиовещанию может быть кабельное телевидение по волоконно-оптическому кабелю. Сети подвижной радиосвязи могут заменяться другими, работающими в более подходящих полосах частот.

9.5 Последствия образования зоны радиомолчания

9.5.1 Обслуживание зон радиомолчания

С момента своего образования зоны RQZ требуют значительных трудозатрат на их обслуживание. Практически вся нагрузка ложится на оператора радиоастрономического комплекса.

Одной из необходимых процедур является регулярный мониторинг радиосреды, включающей все оборудование, которое должно быть установлено на станции. Эти действия зачастую проводятся с использованием отдельных станций контроля и испытательных приборов, которые, как правило, работают независимо от самого радиотелескопа.

Еще одним видом работ является идентификация источников РЧ-помех, которые влияют на данные, полученные телескопом, но которые могут быть недостаточно мощными для обнаружения станцией (станциями) контроля. В этих случаях анализ может представлять значительные трудности, поскольку ширина полосы, доплеровское слежение, период интеграции и диаграмма направленности антенны телескопа могут оказаться неподходящими для определения такой частоты, изменчивости во времени или местоположения источника помех. Кроме того, некоторые помехи могут быть обнаружены только через длительное время после получения результатов наблюдений, по окончании полной первичной обработки набора данных. В любом случае как только РЧ-помеха идентифицирована, необходимо принять меры по ее ослаблению или по устранению источника помехи.

На территории большинства обсерваторий создаются буферные зоны РЧ-помех, в которых ограничения на работу оборудования – потенциального источника РЧ-помех – ужесточаются по мере сокращения расстояния до радиоастрономической аппаратуры. Сотрудники зоны радиомолчания должны проводить обучение специалистов и посетителей и быть готовы обеспечивать соблюдение местных правил. Все аспекты, касающиеся зон радиомолчания, в идеале должны быть утверждены еще до строительства обсерватории.

Сотрудники зоны радиомолчания обязаны также разбираться со случаями РЧ-помех, исходящих от источников, находящихся за пределами территории обсерватории. Простейшая ситуация, в которой могут применяться национальные регуляторные положения, – это неавторизованные передатчики, которые в других случаях могут работать только по лицензии. Наиболее сложный случай при администрировании зоны радиомолчания – это РЧ-помехи от нелицензированных устройств, находящихся вне помещения обсерватории. Решение подобных вопросов в действующих зонах радиомолчания становится все более проблематичным. Очевидного решения данной проблемы пока нет.

В крупных зонах радиомолчания серьезной нагрузкой для персонала может стать обработка заявлений на получение лицензий для новых передатчиков, работающих в пределах зоны радиомолчания. В некоторых зонах радиомолчания, где передатчики попросту запрещены, администрирование не представляет особых сложностей. В других зонах радиомолчания могут быть установлены критические пороговые значения помех. В этом случае необходимо тщательно анализировать заявки на выдачу лицензий, чтобы убедиться, что сигнал передатчика не превышает пороговые значения помех, установленные для обсерватории.

И последнее, сотрудникам обсерваторий не следует недооценивать необходимость обучения и проведения публичных разъяснительных мероприятий, касающихся функционирования зон радиомолчания. Кроме того, пользователи спектра должны оповещаться об их обязанностях по соблюдению правил в зонах радиомолчания.

9.5.2 Соображения по долгосрочным перспективам

Зоны радиомолчания часто проектировались применительно к конкретным телескопам. Наиболее распространенным видом усовершенствования телескопа являлось расширение возможностей его использования на более высоких частотах путем модернизации оборудования. Позже появилась тенденция совместного расположения телескопов в местах, в которых они могут надлежащим образом выполнять поставленные перед ними задачи. При этом они совместно (в экономическом плане) используют установленную инфраструктуру и регуляторные положения, а также имеют общий доступ к сетям энергоснабжения, линиям связи и дорогам.

Благодаря этому в свою очередь может быть увеличен защищаемый диапазон частот для оборудования, размещенного на станции. Таким образом, рекомендуется проектировать параметры зоны радиомолчания настолько широко, насколько это допускают обстоятельства.

Как только зона радиомолчания согласована, необходимо организовать ее на значительный период времени. Это предполагает тщательное планирование с учетом экономического влияния и потенциального воздействия проектируемой зоны RQZ на будущее распределение населения и развитие затрагиваемой территории.

И наконец, следует ожидать нарастания темпов технических разработок, что станет источником инноваций, ведущих к изменениям среды электромагнитной совместимости вокруг зоны радиомолчания. Точные прогнозы дать невозможно, однако тенденции говорят о том, что проектируемая зона радиомолчания должна быть настолько широкой и надежной, насколько это возможно.

ГЛАВА 10

Поиск внеземного разума (SETI) с помощью наблюдений на радиочастотах

10.1 Введение

Для правильной оценки нашего места во Вселенной необходимо знать, является ли Земля единственной планетой, где существует разумная жизнь. Если разумная жизнь действительно существует только на Земле, то это, должно быть, либо необыкновенная случайность, либо уникальное следствие эволюции космоса. С другой стороны, если это только одно из множества разумных сообществ, населяющих нашу Галактику, то жизнь на Земле может быть одним из вариантов огромного эволюционного разнообразия, и, возможно, она не уникальна по своему развитию и цивилизации. Проблема состоит в том, чтобы выяснить, единственна ли жизнь на Земле.

Некоторые ученые полагают, что жизнь есть во многих частях нашей Галактики и что она могла достичь развитых форм, которые обладают возможностями электросвязи, такими же или более высокими, чем мы. Конечно, характеристики передающих станций, такие как частоты, модуляция, поляризация и расположение, используемые внеземными цивилизациями, если они существуют, нам не известны. Для поиска сигналов от таких станций ученые должны зондировать Вселенную с помощью самого чувствительного приемного оборудования, тщательно и интенсивно просматривая радиоспектр в поиске убедительных признаков сигналов, переданных другой цивилизацией.

Первая схема направленного излучения радиосигналов в космос относится к работе Тесла в 1899 году. Специально переданные в 1939 году сигналы, кодирующие телевизионные передачи США, к сегодняшнему дню достигли по меньшей мере тысячи звезд. Самые амбициозные попытки передать другим возможным цивилизациям сведения о жизни на Земле были предприняты в 1974 году с помощью передачи с радиотелескопа диаметром 305 м в Аресибо (Пуэрто-Рико) сообщений с описанием нашей солнечной системы, состава ДНК и нашего биологического вида.

Моррисон и Коккони (1959) первыми указали на возможность приема радиосигналов от внеземных цивилизаций. Дрейк [1961] провел первый микроволновый поиск (проект "Озма") с использованием 25-метрового радиотелескопа для наблюдения двух звезд, находящихся на расстоянии около 12 световых лет от нас. После этого ученые из ряда стран провели более 99 разных зарегистрированных поисков [Tarter, 2001]. В первое десятилетие ведущее место в этой области занимали российские ученые. Первая книга на русском языке, в которой рассматривались проблемы SETI, была написана И. С. Шкловским в 1962 году. Книга была переведена на многие языки и оказала большое влияние на развитие работ по SETI в СССР (сегодняшней Российской Федерации). Кардашёв [1963] предположил, что можно найти более развитые, чем наше, сообщества, которые овладели техникой радиосвязи и способны обеспечить выходную мощность более 10^{26} Вт для передачи непрерывных изотропных широкополосных сигналов. Было проведено множество исследований [Троицкий и др., 1971]. Достижения в области компьютерных технологий и технологий связи сделали возможным более чувствительный и комплексный поиск. Некоторые попытки позволили обнаружить события, которые не удавалось объяснить, например несколько интригующих сигналов, зарегистрированных между 1986 и 1989 годами во время выполнения программы Мегаканального внеземного анализа (META) с использованием радиотелескопа Гарвардского университета в Соединенных Штатах Америки [Sagan and Horowitz, 1993]. Недавнее повторение наблюдений с гораздо более высокой чувствительностью [Lazio *et al.*, 2002] не подтвердило, что эти сигналы связаны с внеземной техникой. До настоящего времени не получено убедительных доказательств наличия сигналов от внеземных цивилизаций. Большую часть этого периода поиск проводился с недостаточной чувствительностью и охватывал лишь очень малую толику возможных частот, схем модуляции и направлений.

Дополнительная основополагающая информация по SETI была предоставлена Оливером [1987], Бейтсом [1988] и Дрейком и Собелем [1992]. С появлением относительно недорогих компьютеров и технологии обработки цифровых сигналов в последние два десятилетия начался более тщательный поиск. В 1992 году агентство NASA начало Микроволновое обследование с высоким разрешением (HRMS) с использованием ряда самых крупных радиотелескопов на Земле и нового чувствительного приемного радиооборудования. Хотя этот проект NASA был прекращен в 1993 году, Институт SETI в США продолжил выполнение части проекта HRMS "Targeted Search" ("Направленный поиск") с высокой чувствительностью в рамках "Project Phoenix" (проект "Феникс").

Институт SETI и Калифорнийский университет в Беркли построили антенную решетку Аллена (ATA), основной задачей которой являются непрерывные наблюдения SETI. Площадь сбора антенны ATA эквивалентна 40-метровому зеркалу. Шумовая температура системы решетки равна 40 К, а полоса пропускания охватывает весь диапазон от 0,5 до 11,4 ГГц. Система генерирует несколько лучей в пределах поля обзора 3° (на частоте 1 ГГц), позволяя вести круглосуточные наблюдения SETI и другие радиоастрономические наблюдения. Полноповоротная антенная решетка ATA позволяет применять более длительные периоды интеграции, чем те, которые использовались в последних наблюдениях SETI. Достижения в области компьютерных технологий и технологий обработки цифровых сигналов также могут повысить собственную чувствительность приемных систем для сигналов SETI.

ATA также служит прототипом намного большего телескопа с решеткой в квадратный километр (SKA). SKA, находящийся в настоящее время на стадии проектирования и создания прототипа, разрабатывается международным консорциумом университетов и исследовательских институтов. Если будет получено международное финансирование, SKA будет иметь площадь сбора на 45 дБ больше, чем у ATA, и более чем на 13 дБ больше, чем у 305-метрового телескопа Аресибо. Большинство рассматриваемых проектов может создавать несколько диаграмм направленности, позволяя круглосуточно проводить наблюдения по SETI. В сочетании с более мощной системой обработки сигналов SKA позволит искать эквиваленты земной радиотехнологии на расстояниях до 1000 световых лет.

Вероятность обнаружения любых микроволновых сигналов в значительной мере зависит от наличия радиомолчания в местах проведения поиска. Поэтому такие места следует в максимальной степени защитить от антропогенных радиопомех. Хотя современная технология обеспечивает некоторое выделение антропогенных сигналов, она может оказаться недостаточной в связи с быстрым ростом использования радиоспектра для самых разнообразных задач и служб радиосвязи. Со временем вероятность успешного обнаружения будет соответственно уменьшаться.

10.2 Возможности обнаружения сигналов SETI

Если предположить, что сигналы от внеземных цивилизаций достигают Земли, то наша способность обнаруживать зависит от ряда факторов:

- силы приходящих на Землю сигналов;
- площади сбора и эффективности возбуждения антенны поиска;
- чувствительности и частотной гибкости приемной системы;
- способности ориентировать антенну в направлении сигналов;
- возможности отличить принятый сигнал от шума за счет компонентов приемной системы, естественных явлений в Галактике и антропогенных помех.

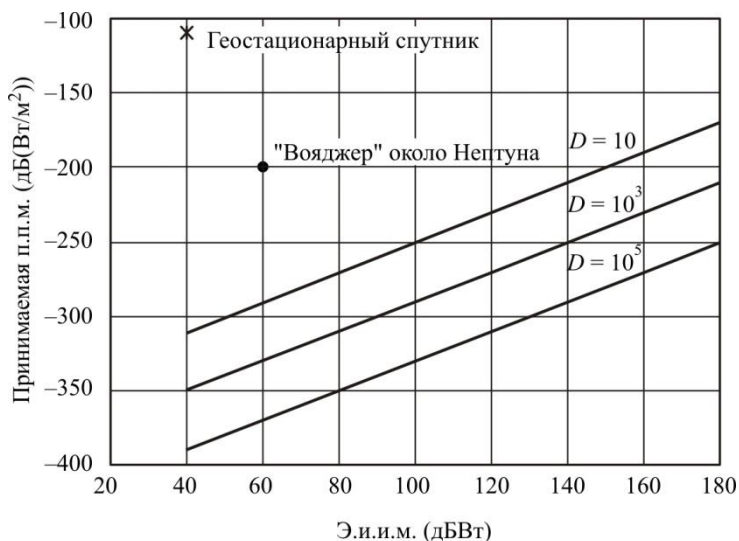
Важными элементами планирования поиска SETI являются стратегии ориентирования антенны и выбор времени интегрирования для поиска, а также других параметров системы. Предпринимаются попытки разработать чувствительные системы, охватывающие широкий диапазон частот и способные одновременно ориентироваться на несколько звезд, обследуя небосвод (особенно плоскость Галактики) и сразу получая изображения в 2π стерадиан. Окончательные эксплуатационные характеристики этих систем во многом будут определяться помеховой средой.

10.3 Интенсивность сигнала

Интенсивность внеземного сигнала на поверхности Земли зависит от переданной мощности и характеристик пути распространения. Плотность потока сигнала, который нужно обнаружить, неизвестна. Однако расстояние, которое должен пройти сигнал, велико, и его интенсивность на Земле, как ожидается, будет очень низкой. Поэтому его обнаружение будет ограничено общей чувствительностью системы наблюдения. На Рисунке 10.1 показана п.п.м. принимаемого на Земле сигнала в зависимости от мощности передатчика для некоторых предполагаемых расстояний до передатчика.

РИСУНОК 10.1

Принимаемая п.п.м. в зависимости от э.и.и.м.



D – расстояние в световых годах (1 световой год = $9,46 \times 10^{15}$ м)

* С орбиты геостационарного спутника

• С космического аппарата "Вояджер" около Нептуна

Radio-Astro_101

Для систем наблюдения, расположенных на поверхности Земли, на некоторых частотах на радиосигнал оказывает влияние атмосфера. Дождь снижает чувствительность на частотах выше 10 ГГц, но наблюдения обычно не чувствительны ко времени и при плохой погоде можно использовать более низкие частоты. На частотах ниже приблизительно 30 МГц прием ограничивается ионосферой, а на частотах около 20 ГГц входящий сигнал ослабляется находящимися в атмосфере молекулами (см. главу 3). Влияние на сигналы зависит от места расположения обсерватории. В случае обсерватории, расположенной вне Земли, например на Луне, на сигналы не будет воздействовать атмосфера и будет доступен весь радиоспектр (см. главу 7).

10.4 Чувствительность приемной системы

Соображения, касающиеся чувствительности приемной системы для поисков SETI, подобны обсуждавшимся в предыдущих главах в отношении радиоастрономических наблюдений. Для заданного усиления антенны чувствительность приемной системы зависит от шумовой температуры системы, выбранной мгновенной ширины полосы и времени интегрирования, затрачиваемого на отдельное измерение.

Шумовая температура системы определяется характеристиками оборудования, а также принимаемым антенной шумом. Последний включает вклады космоса, земной атмосферы и излучения самой Земли, принимаемые через боковые лепестки антенны. Первая составляющая определяется радиоизлучением нашей Галактики, внегалактических источников (других галактик, квазизвездных объектов)

и микроволновым шумом Вселенной (2,7 К). Эта составляющая велика на низких частотах, но снижается с повышением частоты. С другой стороны, шум от атмосферы существенно возрастает на частотах выше приблизительно 20 ГГц, главным образом за счет молекул H₂O и O₂.

Для непрерывного сигнала отношение S/N увеличивается как корень квадратный времени интегрирования. Эффективное время интегрирования ограничивается продолжительностью и стабильностью по частоте сигнала, а также предоставленным для наблюдения временем.

Частота приходящего сигнала будет включать доплеровский сдвиг, который зависит от относительной скорости передатчика (в момент передачи) и наземной приемной системы. Этот сдвиг меняется со временем, даже если он обусловлен только суточными изменениями за счет вращения Земли вокруг своей оси и годовыми изменениями за счет обращения Земли вокруг Солнца. Эти движения приводят к сдвигу частоты, который меняется в зависимости от направления приходящего сигнала. Однако изменения скорости передатчика, которые могут происходить, например, если передатчик находится на вращающейся планете, обращающейся вокруг звезды, трудно установить до обнаружения сигнала. В связи с этими соображениями улучшение отношения S/N в результате увеличения времени интегрирования будет зависеть от возможности слежения за частью сигнала с доплеровским сдвигом. Недостаточное слежение, которое приведет к изменениям частотного канала для сигнала в приемной системе, будет снижать преимущества, получаемые за счет увеличения периода интегрирования.

Общее время, требуемое для выполнения проекта поиска, зависит от числа ориентаций антенны, числа разных частот, устанавливаемых для каждого направления, и времени интегрирования в расчете на наблюдение. Для принятой программы по направлениям и частотам общее время доступа ограничивает время интегрирования для каждого наблюдения и, таким образом, чувствительность поиска. Разработка решеток с несколькими диаграммами направленности, таких как ATA и SKA, если одна или несколько диаграмм будут предоставлены для наблюдения SETI, может обеспечить большее время интегрирования и повышенную чувствительность.

10.4.1 Минимальная обнаруживаемая мощность

Для сигнала, остающегося в одном частотном канале системы обнаружения в течение времени интегрирования, минимальная обнаруживаемая мощность сигнала приемника поиска P_{\min} в предположении, что отношение S/N равно единице, определяется следующим образом [NASA, 1973]:

$$P_{\min} = 10 \log \left[\frac{kT}{t} (1 + (1 + Bt)^{0,5}) \right] \text{ дБВт}, \quad (10.1)$$

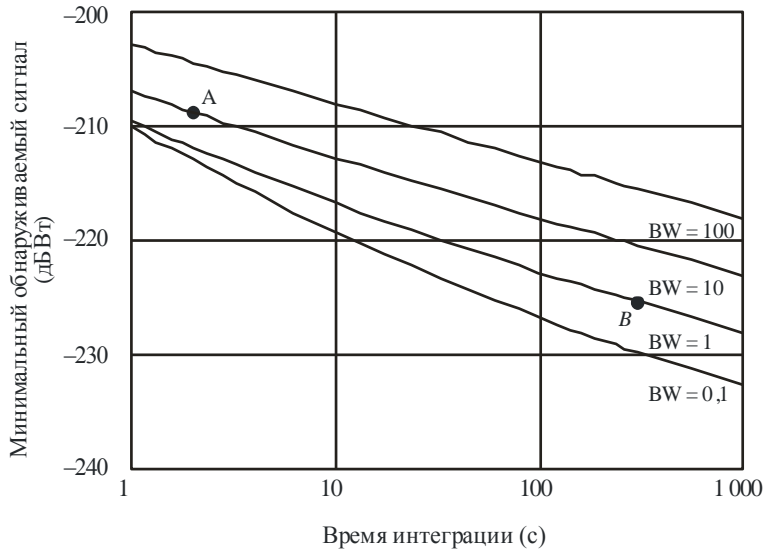
где:

- k – постоянная Больцмана;
- T – шумовая температура системы (К);
- B – полоса пропускания (Гц);
- t – время интеграции (с).

На Рисунке 10.2 показана минимальная обнаруживаемая мощность сигнала P_{\min} в зависимости от времени интегрирования для нескольких значений ширины полосы. Точки A и B на Рисунке 10.2 соответствуют двум возможным приемникам поиска с характеристиками, приведенными в пояснениях к рисунку.

РИСУНОК 10.2

**Минимальная обнаруживаемая мощность сигнала
для систем в качестве примеров**



Шумовая температура системы 30 К

BW – полоса пропускания (Гц)

Пример А – система обзора небосвода: BW = 10 Гц, время интеграции = 2 с

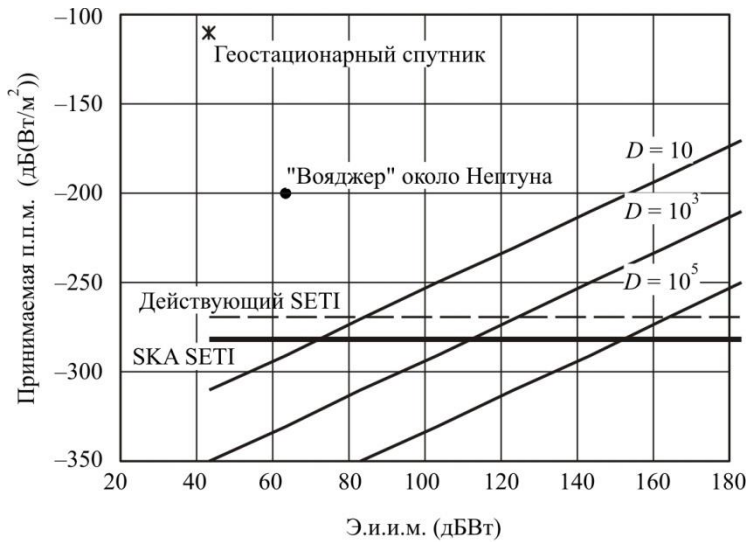
Пример В – система целенаправленного поиска: BW = 1 Гц, время интеграции = 1000 с

Radio-Astro_102

На Рисунке 10.3 показана связь между принимаемой п.п.м. в условиях, предполагаемых на Рисунке 10.1, для текущей программы SETI (тонкая горизонтальная линия) и будущей программы SETI с использованием SKA (толстая горизонтальная линия). Текущая программа SETI, "Проект Феникс", использует 300-метровую антенну с к.п.д. 70%, связанным с эффективной возбуждаемой апертурой в 225 м, шумовой температурой системы 40 К, шириной полосы канала 1 Гц и временем интегрирования 300 с. Будущая программа SETI с использованием SKA предполагает те же параметры наблюдения лишь с увеличением площади сбора на 13 дБ. Это консервативная оценка чувствительности, поскольку вероятно, что станет возможным время интегрирования в 1000 с и более. Сочетания э.и.и.м. и расстояния, которые дают обнаруживаемую плотность потока, лежат выше горизонтальных линий для соответствующих примеров систем.

РИСУНОК 10.3

Возможность обнаружения сигнала для предполагаемой э.и.и.м. передатчика



Чувствительность. Действующий SETI: система "Проект Феникс", антенна 300 м

Ширина полосы 1 Гц, время интегрирования 300 с

SKA SETI: антенна 1000 м, ширина полосы 1 Гц, время интегрирования 300 м

D – расстояние в световых годах (1 световой год = $9,46 \times 10^{15}$ м)

* С орбиты геостационарного спутника

• С космического аппарата "Вояджер" около Нептуна

Radio-Astro_103

Когда ширина полосы частотного канала не ограничивается дрейфом частоты сигнала, самая высокая чувствительность получается с использованием ширины полосы, которая совпадает со спектральной шириной поступающего сигнала. Однако эта ширина заранее не известна. Если приемник имеет только один частотный канал, то при этом возникает проблема, состоящая в том, что уменьшение ширины полосы канала увеличивает время, требуемое для поиска в конкретном диапазоне частот. Например, для поиска в диапазоне от 1 до 2 ГГц с использованием приемника с одним каналом, имеющего ширину полосы 1 Гц и время интегрирования 10 с, потребуется 317 лет. Именно по этой причине тщательный поиск сегодня проводят с помощью приемников, обычно называемых спектрометрами, которые обеспечивают широкую полосу частот, расщепленную на множество узкополосных каналов. В настоящее время спектрометры с 10^9 каналами доступны с экономической точки зрения.

10.5 Направление ориентации антенны

Антенны с большой площадью сбора (т. е. большим усилением) желательны для повышения чувствительности поиска и соответствующего увеличения вероятности обнаружения. Однако для одиночных антенн увеличение площади сбора обычно приводит к снижению ширины диаграммы направленности антенны, что заставляет увеличивать число устанавливаемых ориентаций для поиска в заданном участке небосвода. Это означает, что при заданном времени интегрирования приходится увеличивать общее время поиска. Данную проблему можно решить путем увеличения площади сбора за счет добавления дополнительных антенн.

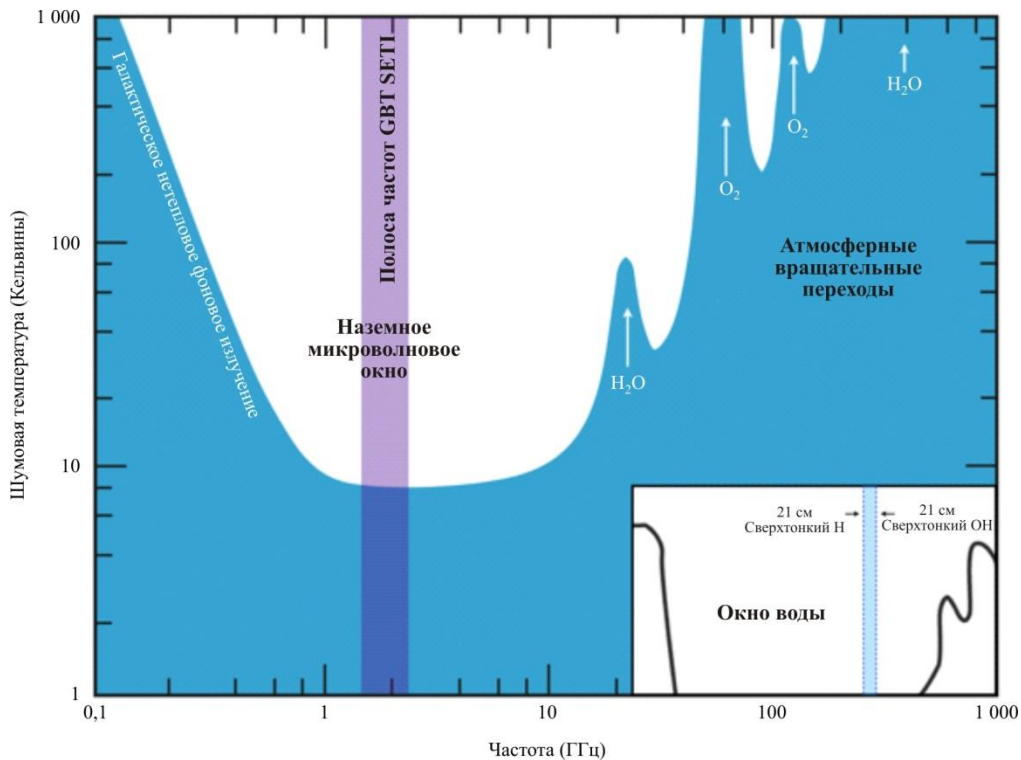
Стратегия ориентации антенны является основополагающим моментом в поиске SETI. Существует два варианта – направленный поиск или общее обследование небосвода. При направленном поиске антенны ориентируются на выбранные звезды; существует почти тысяча звезд, подобных Солнцу, в пределах 100 световых лет от Земли. Слежение за сигналами в реальном масштабе времени позволяет проверять возможное обнаружение сигнала с помощью антенны поиска или другого обеспечивающего прибора. Сигнал от технологического оборудования, созданного внеземной цивилизацией, которое обращается по орбите вокруг выбранной звезды, должен пропадать, когда антенна направлена мимо

цели, и возобновляться, когда цель будет снова захвачена. Поскольку на каждую цель может затрачиваться длительное время, частотно-временная область сигнала на выходе спектрометра может быть исследована одновременно на непрерывный спектр (CW) и импульсные сигналы. Поиск можно даже распространить на объекты с дрейфом частоты.

Новые задачи для исследований SETI были поставлены на основе отчетов об изучении планет за пределами Солнечной системы [Siemion, 2013]. Кроме того, постоянно совершенствующиеся технологии цифровой обработки сигналов позволяют вести поиски в гораздо более широких полосах частот и с более высоким спектральным разрешением. Спектральный диапазон поиска для узкополосных сигналов (<5 Гц) в направлении обнаруженных планет показан на Рисунке 10.4.

РИСУНОК 10.4

**График интенсивности фонового радиоизлучения
в зависимости от частоты**



На графике показаны внешние воздействия на температуру системы приемника, и обозначены диапазоны для SETI. В диапазоне частот от 1 до 10 ГГц наблюдается как слабое галактическое излучение, так и наземное атмосферное влияние на температуру системы. Показан диапазон поиска планеты Кеплер при помощи телескопа Грин Бэнк с полосой пропускания 0,8 ГГц. Рисунок из A. Siemion [2013]

Radio-Astro_104

Общее обследование небосвода, охватывающее огромные объемы пространства, требует намного больше времени, и время, затрачиваемое в каждом направлении, более ограничено. Стратегии специального сканирования могут предусматривать различие между сигналами, связанными со звездными объектами, и сигналами, связанными с обращением по орбите или наземными передатчиками.

Гибридом этих двух концепций является всенаправленная система, которая использует для своей площади сбора множество малых элементов и сводит их выходы для ориентации всех возможных лепестков одновременно на видимый небосвод. Такая радиорешетка будет иметь ограниченную чувствительность, если только число элементов не будет очень большим, и это предъявляет огромные, связанные с расчетами требования, которые пока нельзя выполнить.

10.6 Идентификация сигнала и подавление помех

В большинстве случаев поиска предполагается, что сигнал от внеземной цивилизации будет узкополосным, например 1 Гц, и что, возможно, его интенсивность будет меняться со временем. Основная проблема обнаружения таких сигналов состоит в определении, что сигнал не возникает за счет естественного или антропогенного шума.

Для естественного случайного шума вероятности для амплитуды хорошо известны. Вероятность того, что пик шума превысит порог разыскиваемого сигнала, конечно, хотя этот пик может быть зарегистрирован как возможное обнаружение внеземного сигнала. Частота такого ошибочного обнаружения будет зависеть от принятого уровня порога, и ее можно рассчитать для случая гауссова (белого) шума. Повышение порога для снижения частоты ошибочных оповещений снижает чувствительность приемника. Несколько антенн, работающих совместно, снижают частоту ошибочного обнаружения. В тех случаях, когда эти антенны разделяет большое расстояние, наземная помеха подвергается декорреляции и значительно ослабляется.

Антропогенные сигналы занимают большую часть радиоспектра, особенно на более низких частотах. Стратегии поиска должны включать возможность выделения таких сигналов и отклонения их как возможных кандидатов. Отклонение может основываться на предварительных сведениях о сигналах, которые могут влиять на обсерваторию, или на проведенных в обсерватории измерениях. Успешное исключение этих мешающих сигналов из базы данных, используемой для последующего подробного анализа, является основным фактором в обеспечении успешного поиска.

Рост использования радиоспектра для радиосвязи и других служб еще более затрудняет поиск SETI в будущем. В частности, быстро растущее число новых спутников на геостационарной орбите все сильнее ограничивает возможности поиска на многих частотах в направлениях на участки небосвода, близкие к орбите. Следует отметить, что с точки зрения SETI все антропогенные радиоизлучения, независимо от того, разрешены они или нет, представляют собой потенциальные радиочастотные помехи. Ввиду растущего спроса на радиоспектр становится ясно, что поиск SETI необходимо проводить как можно скорее, чтобы свести к минимуму проблему радиопомех.

10.7 Выбор возможных полос частот

Не может быть никаких предварительных сведений о частоте и других характеристиках сигналов от внеземных цивилизаций, которые могут быть обнаружены, и практически невозможно охватить весь радиоспектр или даже ту его часть, которая доступна для наблюдения из находящихся на поверхности Земли обсерваторий. Поэтому должны быть выбраны ограниченные частотные полосы на основе теоретических догадок.

В Отчете бывшего МККР 700-1 (Дюссельдорф, 1990) обсуждаются основания для выбора определенных полос частот для поиска. Общей особенностью всех предлагаемых полос служит их связь с частотами природных явлений. В основе этого лежит предположение, что внеземные цивилизации могут предпочесть передачу на частотах, которые являются общими для всей Галактики, или на некоторых кратных частотах для этих общих частот исходя из того, что другие цивилизации также знают о данных частотах и соответствующим образом планируют свои приемные системы. Поэтому эти полосы соотносят с частотами известных спектральных линий, связанных с наиболее распространенными в межзвездном пространстве атомами и молекулами, включая атомарный водород (H) на 1420 МГц, гидроксильный радикал (OH) на 1612, 1665, 1667 и 1720 МГц и формальдегид (H₂CO) на 4830 МГц. Участок между линиями водорода и гидроксила, называемый "окном воды", был предпочтительно выбран в предположении, что основанные на воде формы жизни могут счесть этот спектральный диапазон существенным. Предлагали даже полосу, включающую частоту спектральной линии самого легкого искусственного атома позитрония, – 203 ГГц.

Несколько распределенных службе РАС полос защищены от антропогенного излучения, так же как и несколько полос, распределенных для пассивного зондирования. Эти полосы являются удачными кандидатами для использования в программе SETI, поскольку они защищены от помех и во многих случаях включают спектральные линии, широко распространенные в Галактике.

Существует множество точек зрения на выбор полос. Но поскольку нет никаких предварительных сведений о характере и даже существовании внеземных сигналов, то тщательный поиск должен охватывать как можно более широкий диапазон частот.

ССЫЛКИ

BATES, D. [1988] Radio searches for extraterrestrial civilizations. *Quarterly J. of the Royal Astronom. Soc.*, Vol. 29, p. 307-311.

COCCONI, G. and MORRISON, P. [1959] Searching for interstellar communications. *Nature*, 184, p. 844-846.

DRAKE, F. D. [1961] Project Ozma. *Physics Today*, Vol. 14, p. 40-46.

DRAKE, F. D. and SOBEL, D. [1992] *Is anyone out there?: The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*. Delacorte Press, New York, United States of America.

КАРДАШЁВ, Н. С. [1964] Передача информации внеземными цивилизациями. *Советская астрономия, Астрономический журнал*, **8**, с. 217–221.

LAZIO, T. J. W., TARTER, J. C. and BACKUS, P. R. [July 2002] The META Candidates Were Not Transmissions From Intrinsically Steady Sources. *Astronomical J.*, Vol. 124, p. 560-564.

NASA [July 1973] Project Cyclops. Ames Research Center, Moffett Field, California, United States of America, Report CR 114445, Revised Edition, p. 243.

OLIVER, B. M. [1987] The windows of SETI: frequency and time in the search for extraterrestrial intelligence. *The Planetary Report*, Vol. VII, **6**, p. 23-25.

SAGAN, C. and HOROWITZ, P. [September 1993] Five Years Of Project META: An All-Sky Narrowband Radio Search For Extraterrestrial Signals. *Astrophysical J.*, Vol. 415, **218**, p. 218-235.

TARTER, J. C. [2001] The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI). *Annual Rev. of Astronom. and Astrophys.*, Vol. 39, p. 511-548.

ТРОИЦКИЙ, В. С., СТАРОДУБЦЕВ, А. М., ГЕРШТЕЙН, Л. Л. и РАХЛИН, В. Л. [1971] Опыт поиска монохроматического радиоизлучения от звезд в окрестностях Солнца на частоте 927 МГц. *Астрономический журнал*, т. 48, с. 645–647.

SIEMION, A. P. V., DEMOREST, P., KORPELA, E., MADDALENA, R., WERTHIMER, D., COBB, J., HOWARD, A.W., LANGSTON, G., LEBOFKY, M., MARCY, G.W., TARTER, J. A 1.1-1.9 GHz SETI Survey of the Kepler Field. I. A Search for Narrow-band Emission from Select Targets, *Astrophysical. J.*, Vol. 767, p. 94.

SHKLOVSKII, I. S. and SAGAN, C. [1966] *Intelligent life in the Universe*, Holden-Day, Inc.

ГЛАВА 11

Наземная радиолокационная астрономия

11.1 Введение

Астрономия с использованием радиолокаторов предъявляет те же требования, что и радиоастрономия, т. е. доступ без помех к полосам в радиоспектре. Она отличается от радиоастрономии тем, что является активной службой, которая не только принимает, но и передает. Она также отличается тем, что сегодня существует всего три передающие станции, работающие в этой области: одна в Пуэрто-Рико, одна в Калифорнии и одна в Крыму, которые используют четыре полосы между 430 МГц и 8 ГГц (см. Таблицу 11.1). Поскольку прием отраженного сигнала радиолокатора возможен передающей или вспомогательной антенной, то принимающих станций почти вдвое больше, чем передающих станций. Все используемые сегодня передающие и принимающие антенны применяются также для пассивных радиоастрономических наблюдений или связи с космическими аппаратами. Снова возник интерес к наблюдению с помощью радиолокатора солнечной короны и к обсуждению систем передачи, работающих в сочетании с планируемыми решетками низкочастотных радиотелескопов (LOFAR). Частота пока не выбрана, но, вероятно, она будет в диапазоне от 15 до 50 МГц.

Радиолокационная астрономия включает использование наземных радиолокационных систем для:

- изучения характеристик отражения радиоволн, размера и направлений вращения больших и малых твердых тел в солнечной системе;
- измерения доплеровских сдвигов и задержки по времени для получения скоростей и расстояний в целях определения параметров орбиты, особенно для находящихся вблизи Земли астероидов, которые могут в будущем создать угрозу для Земли;
- изучения межпланетной среды и солнечной короны с помощью их воздействия на распространяющийся через них сигнал радиолокатора и изучения отражений радиолокационного сигнала от солнечной короны.

С радиолокационной астрономией связаны такие исследования, которые выдвигают аналогичные требования; они включают изучение атмосферы и ионосферы Земли с помощью некогерентного рассеяния, стратосферные и метеорные радиолокаторы.

Радиолокационная астрономия официально родилась в 1946 году при обнаружении первых отражений от Луны, но ее фактическое начало в качестве подраздела астрономии приходится на 1961 год, когда обнаружили отраженные сигналы от Венеры. Вскоре последовало обнаружение других планет земной группы – Меркурия и Марса. К успехам этого начального периода можно отнести определение периодов вращения Венеры и Меркурия и уточнение в сто раз наших сведений об астрономической единице. В эти годы также наблюдался существенный интерес к разработке методов наблюдений и приборов. Описание ранних наблюдений и разработки приборов можно найти в [Evans and Hagfors, 1968], а обзор начальной истории радиолокационной астрономии приведен в [Butrica, 1996].

Второй этап радиолокационной астрономии наступил в начале 1970-х годов при существенном увеличении чувствительности используемых систем в связи с монтажом радиолокатора на частоте 2,38 ГГц на появившемся тогда телескопе Аресибо с обновленной поверхностью зеркала диаметром 305 м и с модернизацией системы на 8,5 ГГц на принадлежавшем тогда NASA/JPL телескопе Goldstone диаметром 64 м. Одновременно перестали работать системы планетных радиолокаторов Jodrell Bank в Соединенном Королевстве и Haystack в США, оставив две антенны в Соединенных Штатах Америки и одну в бывшем Советском Союзе (теперь Республика Украина) в качестве единственных передающих станций для радиолокационной астрономии, и такое положение сохраняется по сегодняшний день, как показано в Таблице 11.1.

В течение двадцати лет с 1972 по 1992 год радиолокационная астрономия внесла многое в наши знания о солнечной системе (см. обзор [Ostro, 2002]). Было обнаружено, что частицы в кольцах Сатурна имеют размер в сантиметры и более, были открыты необычные характеристики рассеяния ледяных спутников Галилея планеты Юпитер, было получено изображение 40% поверхности Венеры с разрешением 2 км, на полюсах Меркурия были найдены отложения льда, были измерены характеристики отражения радиоволн для десятков астероидов в основном поясе и вблизи Земли, а также ряда комет, и по доплеровской задержке были получены изображения с высоким разрешением для двух приближающихся к Земле астероидов. В области разработки приборов была введена радиолокационная интерферометрия для разрешения северо-южной неопределенности, свойственной изображениям по доплеровской задержке, были разработаны системы с разнесенными антеннами, в частности между антенной в Голдстоуне (передающей) и VLA в Нью-Мексико (приемной), и были использованы псевдобесконечные схемы кодирования для решения проблемы разброса при получении изображения быстро вращающихся объектов.

В середине 1990-х годов была заменена оптика телескопа Аресибо для использования системы двойного субрефлектора системы Грегори в целях введения поправки на сферическую абберацию телескопа. Был также построен экран высотой 15 м по всему периметру первичного отражателя диаметром в 305 м, чтобы экранировать приемники от излучения Земли. Эти модификации привели к заметному увеличению чувствительности телескопа на частотах выше 1,0 ГГц и снижению температуры системы. В сочетании с удвоением мощности передатчика в диапазоне S до 1 МВт эти усовершенствования привели к повышению чувствительности радиолокационной системы Аресибо в диапазоне S в 10 раз для зенита и больше чем в 20 раз для максимального зенитного угла телескопа в 20° . Почти в то же время улучшенные клистроны обеспечили небольшое увеличение чувствительности радиолокационной системы Голдстоун в диапазоне X . Передатчик планетного радиолокатора Голдстоун в диапазоне S был выведен из эксплуатации в 2001 году.

В течение нескольких последних лет модернизированные системы Аресибо и Голдстоун интенсивно использовались для изучения как околоземных астероидов (NEA), так и астероидов основного пояса, что привело к открытию двойных NEA. Система Аресибо использовалась для изучения поверхности спутников Сатурна – Титана и Яфета и для получения изображения колец Сатурна. Были получены изображения с более высоким разрешением отложений льда на полюсах Меркурия, были проведены альтиметрические наблюдения полярных районов Луны и поверхностных отложений на Венере, изученных с помощью анализа поляризаационных характеристик отраженных сигналов.

ТАБЛИЦА 11.1
Установки радиолокационной астрономии

Радиолокационные системы							Основные вспомогательные приемные антенны	
Место-положение	Широта	Восточная долгота	Частота (ГГц)	Тип и мощность передатчика (кВт)	Усиление антенны	Температура системы (К)	Местоположение	Тип антенны
Аресибо ⁽¹⁾ , Пуэрто-Рико	18°21'	-66°45'	0,430	Импульсный средняя 150 пиковая 2 500	61	55		
Аресибо ⁽¹⁾ , Пуэрто-Рико	18°21'	-66°45'	2,380	CW 1000	73,4	26	Грин Бэнк, Западная Вирджиния, США	Зеркало 100 м
Голдстоун, Калифорния, США	35°23'	-116°51'	8,560	CW 470	73	14	Голдстоун, Калифорния, США Сан-Круа, Гавайи, США	Зеркала 70 м и 34 м VLBA (зеркала 10 × 25 м)
Евпатория, Крым, Украина	45°11'	33°11'	5,01	CW 150	69	45	Сокорро, Нью-Мексико, США Грин Бэнк, Западная Вирджиния ⁽²⁾ , США	VLA (зеркала 27 × 25 м) Зеркало 100 м
							Эффельберг, Германия Медичина, Италия	Зеркало 100 м Зеркало 32 м

⁽¹⁾ Телескоп Аресибо можно ориентировать на 20° от вертикали. Параметры приведены для ориентации на зенит.

⁽²⁾ Предполагается достаточно интенсивное использование.

11.2 Вопросы чувствительности

Для решения поставленных задач изучения крупных и малых тел в нашей солнечной системе радиолокационная астрономия требует больших антенн, передатчиков высокой мощности и усилителей входных каскадов с очень низким шумом. Эти потребности определяются обратной зависимостью напряженности поля принимаемого сигнала от расстояния в четвертой степени. Для антенны с коэффициентом усиления G , оборудованной передатчиком СВ с мощностью несущей P_T (за исключением системы Аресибо на 430 МГц, передатчики всех планетных радиолокаторов относятся к типу СВ, поскольку практически для всех изученных объектов общая чувствительность зависит от средней переданной мощности), мощность P , получаемая антенной с эффективной площадью сбора A после отражения от цели с поперечным сечением σ на расстоянии R от радиолокатора, определяется как

$$P = \frac{P_T G \sigma A}{(4 \pi R^2)^2}. \quad (11.1)$$

Если, как это бывает обычно, одна и та же антенна используется и для передачи, и для приема на длине волны λ , то

$$P = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (11.2)$$

Общая чувствительность радиолокационной системы зависит от отношения мощности принятого сигнала к среднеквадратичным флуктуациям мощности шума, возникающим из складывающихся вкладов от небосвода (микроволновой фон и на более низких частотах нетепловое излучение от нашей Галактики), излучения атмосферы, земли, входных усилителей и, конечно, помех. Сумма этих мощностей шума обычно описывается температурой системы T_s , которая связана с мощностью шума P_N соотношением $P_N = k T_s B$, где k – постоянная Больцмана, а B – ширина соответствующей полосы частот, обычно с доплеровским расширением. Среднеквадратичные флуктуации шума определяются соотношением $P_N (\tau B)^{-1/2}$, где τ – время интеграции.

Если пренебречь свойствами цели и другими постоянными,

$$\text{Чувствительность} \propto \frac{P_T G A}{T_s} (\tau/B)^{1/2} \quad (11.3)$$

или при использовании одной и той же антенны для передачи и приема

$$\text{Чувствительность} \propto \frac{P_T G^2 \lambda^2}{T_s} (\tau/B)^{1/2}. \quad (11.4)$$

Итак, требования радиолокационной астрономии очень близки к требованиям радиоастрономии (большие антенны, малошумящие входные усилители и отсутствие мешающих сигналов), но сочетаются с очень мощными передатчиками. Поскольку усиление G обратно пропорционально λ^2 , уравнения (11.1) и (11.2) показывают, что с увеличением частоты возрастает и чувствительность.

11.3 Требования к рабочим режимам и ширине полосы

В радиолокационной астрономии используются как сигналы СВ, так и модулированные сигналы, причем их выбор зависит от природы целевого объекта и задач эксперимента. В экспериментах с СВ при передаче монохроматического сигнала отраженный сигнал получает доплеровское расширение за счет угловой скорости вращения целевого объекта (Ω рад/с), при этом расширение имеет вид

$$\Delta v = \frac{4a\Omega v_0}{c} \sin \theta, \quad (11.5)$$

где:

a – радиус объекта;

ν_0 – частота передачи;

c – скорость света;

θ – угол между осью вращения и направлением прямой видимости от радара.

Обычно передаются волны с круговой поляризацией, и спектры отраженного сигнала с двумя направлениями принятой круговой поляризации дают информацию об отражательной способности радиолокатора, неровностях поверхности в масштабе длины волны, периоде вращения и т. д. Хотя для повышения возможностей обнаружения принимаемого сигнала можно использовать переключение частоты передаваемого сигнала каждые несколько секунд, общая ширина полосы, используемая для передачи и приема, в случае CW редко превосходит несколько десятков килогерц.

Двухмерное (доплеровская задержка) изображение используется для картографии свойств отражения радиоволн на поверхностях планет земной группы, астероидов, а в будущем, можно надеяться, и комет. Необходимую модуляцию передаваемого сигнала можно получить с помощью импульсной модуляции. Некоторые ранние системы были импульсными, но все недавние устройства относятся к типу CW, поскольку чувствительность обычно зависит от средней переданной мощности, а высокую среднюю мощность легче и дешевле получать с помощью передатчиков CW. Поэтому в современных системах используют фазовую модуляцию сигнала CW на основе двухфазной модуляции, основанной на повторяющихся кодах максимальной длины со сдвигом регистра. Свойства функции автокорреляции для таких кодов делают их идеальными для использования в планетной радиолокации. В настоящее время самый короткий базовый интервал, который обычно используется для переключения фаз между двумя состояниями, отличающимися на 180° , составляет 0,1 мкс, что отвечает разрешению по дальности в 15 м. Требуемая ширина полосы приемника при использовании интервала переключения в 0,1 мкс составляет около 20 МГц, и эта ширина полосы определяет текущие требования радиолокационной астрономии. Доплеровский сдвиг за счет относительного движения целевого объекта и Земли может сместить полосу приема относительно частоты передатчика на величину до нескольких мегагерц. Конечно, сильные помехи непосредственно за краями этой полосы могут привести к существенному ухудшению эксплуатационных характеристик приемника.

11.4 Установки радиолокационной астрономии

В качестве активной службы с жесткими требованиями к свободным от помех полосам в радиоспектре радиолокационная астрономия ставит те же требования, как и радиоастрономия, но без доступа к защищенным полосам частот. До настоящего времени выбранные частоты определялись такими соображениями, как наличие мощных клистронов, как в случае установки Голдстоун на 8,5 ГГц, потребностью в передатчиках высокой мощности для других целей, таких как связь с космическими аппаратами.

В Таблице 11.1 указаны системы, используемые в настоящее время для планетной радиолокационной астрономии. Две наиболее чувствительные системы – это система на 8,5 ГГц в сети для дальнего космоса NASA с антенной диаметром 70 м в Голдстоуне, Калифорния, и система на 2,4 ГГц на радиотелескопе с радиолокатором в Аресибо диаметром 305 м, расположенная в Пуэрто-Рико, обслуживаемая SRI International, USRA и UMET, по соглашению о сотрудничестве с Национальным научным фондом США (NSF) при поддержке программы исследования планет NASA.

ССЫЛКИ

BUTRICA, A. J. [1996] *To See the Unseen: A History of Planetary Radar Astronomy*. NASA SP-4218, NASA History Office.

EVANS, J. V. and HAGFORS, T., Ed. [1968] *Radar Astronomy*, McGraw-Hill.

OSTRO, S. J. [2002] *Planetary radar astronomy*. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Vol. 12, p. 295-327, Academic Press.

ДОБАВЛЕНИЕ 1

Таблица полос частот, распределенных радиоастрономической службе

Столбец 1 указывает границы полос частот.

Столбец 2 указывает, является ли распределение первичным (P) или вторичным (s). Полосы для пассивных служб отмечены как (Pas); в этих полосах запрещены любые передачи с некоторыми исключениями в отдельных странах. Другие распределенные полосы используются совместно с активными (передающими) службами.

Столбец 3 указывает случаи, когда распределение ограничено определенными районами, но в нем не приведены все данные об исключениях на национальном уровне и т. д. Полные данные см. в последнем издании Регламента радиосвязи. Указаны также некоторые из наиболее важных спектральных линий.

Однако следует отметить, что известно более 10 000 линий (см. п. 2.4.1), и на частотах выше 40 ГГц во всех полосах частот имеется множество линий.

Диапазон частот (МГц) (1)	Статус (2)	Замечания (3)
13,36–13,41	P	
25,55–25,67	P (Pas)	
37,50–38,25	s	
73,00–74,60	P	Район 2
150,05–153,00	P	Район 1, Австралия, Индия
225,00–235,00	s	Китай (п. 5.250 PP)
322,00–328,60	P	Линия дейтерия
406,10–410,00	P	
606,00–608,00	P	Китай и Африканская зона радиовещания
608,00–614,00	P s	Район 2, Китай, Индия и Африканская зона радиовещания Районы 1 (за исключением Африканской зоны радиовещания) и 3
1 400,00–1 427,00	P (Pas)	Линия водорода
1 610,60–1 613,80	P	Линия OH
1 660,00–1 670,00	P	Линии OH
1 718,80–1 722,20	s	Линия OH
2 655,00–2 690,00	s	
2 690,00–2 700,00	P (Pas)	
4 800,00–4 990,00	s	Линия H ₂ CO; 4825–4835 МГц и 4950–4990 МГц распределены на первичной основе в Австралии, Аргентине и Канаде (п. 5.443 PP)
4 990,00–5 000,00	P	

Диапазон частот (ГГц) (1)	Статус (2)	Замечания (3)
10,60–10,68	P	
10,68–10,70	P (Pas)	
14,47–14,50	s	Линии H ₂ CO
15,35–15,40	P (Pas)	
22,21–22,50	P	Линии H ₂ O
23,60–24,00	P (Pas)	Линии NH ₃
31,30–31,50	P (Pas)	
31,50–31,80	P	Пассивн. (Pas) в Районе 2
42,50–43,50	P	Линии SiO
48,94–49,04	P	Линия CS
76,00–77,50	P	
77,50–79,00	s	
79,00–86,00	P	
86,00–92,00	P (Pas)	Линии SiO
92,00–94,00	P	Линия N ₂ H ⁺
94,00–94,10	s	
94,10–100,00	P	Линия CS
100,00–102,00	P (Pas)	
102,00–109,50	P	
109,50–111,80	P (Pas)	Линии CO
111,80–114,25	P	Линия CO
114,25–116,00	P (Pas)	Линия CO
123,00–130,00	s P	Корея (128–130 ГГц, линии SiO) п. 5.562D PP
130,00–134,00	P	
134,00–136,00		
136,00–148,50	P	Линия CS
148,50–151,50	P (Pas)	
151,50–158,50	P	
164,00–167,00	P (Pas)	
171,00–171,60, 172,20–172,80 173,30–174,00	P	Корея п. 5.562D PP
182,00–185,00	P (Pas)	Линия H ₂ O
200,00–209,00	P (Pas)	
209,00–226,00	P	Линии CO
226,00–231,50	P (Pas)	Линия CO
241,00–248,00	P	Линии CS
248,00–250,00	s	
250,00–252,00	P (Pas)	
252,00–275,00	P	Линии HCN, HCO ⁺

В дополнение к этим распределениям в п. 5.149 РР содержится призыв к администрации принимать все практически возможные меры для защиты радиоастрономической службы от вредных помех в следующих полосах:

13 360–13 410 кГц	4 950–4 990 МГц	102–109,5 ГГц
25 550–25 670 кГц	4 990–5 000 МГц	111,8–114,25 ГГц
37,5–38,25 МГц	6 650–6 675,2 МГц	128,33–128,59 ГГц
73–74,6 МГц в Районах 1 и 3	10,6–10,68 ГГц	129,23–129,49 ГГц
150,05–153 МГц в Районе 1	14,47–14,5 ГГц	130–134 ГГц
322–328,6 МГц	22,01–22,21 ГГц	136–148,5 ГГц
406,1–410 МГц	22,21–22,5 ГГц	151,5–158,5 ГГц
608–614 МГц в Районах 1 и 3	22,81–22,86 ГГц	168,59–168,93 ГГц
1 330–1 400 МГц	23,07–23,12 ГГц	171,11–171,45 ГГц
1 610,6–1 613,8 МГц	31,2–31,3 ГГц	172,31–172,65 ГГц
1 660–1 670 МГц	31,5–31,8 ГГц в Районах 1 и 3	173,52–173,85 ГГц
1 718,8–1 722,2 МГц	36,43–36,5 ГГц	195,75–196,15 ГГц
2 655–2 690 МГц	42,5–43,5 ГГц	209–226 ГГц
3 260–3 267 МГц	48,94–49,04 ГГц	241–250 ГГц
3 332–3 339 МГц	76–86 ГГц	252–275 ГГц
3 345,8–3 352,5 МГц	92–94 ГГц	
4 825–4 835 МГц	94,1–100 ГГц	

На частотах свыше 275 ГГц отсутствуют распределения полос частот для МСЭ-R. Однако ВКР-2012 утвердила следующее положение посредством п. 5.565 РР.

5.565 Следующие полосы частот в диапазоне 275–1000 ГГц определены для использования администрациями для применений пассивных служб:

- радиоастрономическая служба: 275–323 ГГц, 327–371 ГГц, 388–424 ГГц, 426–442 ГГц, 453–510 ГГц, 623–711 ГГц, 795–909 ГГц и 926–945 ГГц;
- спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная): 275–286 ГГц, 296–306 ГГц, 313–356 ГГц, 361–365 ГГц, 369–392 ГГц, 397–399 ГГц, 409–411 ГГц, 416–434 ГГц, 439–467 ГГц, 477–502 ГГц, 523–527 ГГц, 538–581 ГГц, 611–630 ГГц, 634–654 ГГц, 657–692 ГГц, 713–718 ГГц, 729–733 ГГц, 750–754 ГГц, 771–776 ГГц, 823–846 ГГц, 850–854 ГГц, 857–862 ГГц, 866–882 ГГц, 905–928 ГГц, 951–956 ГГц, 968–973 ГГц и 985–990 ГГц.

Использование частот в диапазоне 275–1000 ГГц пассивными службами не исключает использование этого диапазона активными службами. Администрациям, желающим предоставить частоты в диапазоне 275–1000 ГГц для применений активных служб, настоятельно предлагается принимать все практически возможные меры для защиты этих пассивных служб от вредных помех до даты принятия Таблицы распределения частот в вышеупомянутом диапазоне частот 275–1000 ГГц.

Все частоты в диапазоне 1000–3000 ГГц могут быть использованы как активными, так и пассивными службами. (ВКР-2012)

ДОБАВЛЕНИЕ 2

Регистрация астрономических станций

Для администраций, эксплуатирующих радиоастрономические станции, важным пунктом является их регистрация в Бюро радиосвязи (БР) Международного союза электросвязи (МСЭ).

Регистрация предоставляет ряд преимуществ:

- защиту от помех в совмещенном канале, когда наблюдения проводятся в полосах частот совместного использования, распределенных службе РАС на первичной основе, особенно когда важна защита за границей;
- несколько примечаний в Регламенте радиосвязи предоставляют защиту радиоастрономическим станциям от нежелательных излучений со спутников. Например, в примечании п. **5.511A** РР указано:

"...Для защиты радиоастрономической службы в полосе 15,35–15,4 ГГц суммарная плотность потока мощности, излучаемой в полосе 15,35–15,4 ГГц всеми космическими станциями в пределах фидерных линий негеостационарной системы подвижной спутниковой службы (космос-Земля), работающей в полосе 15,43–15,63 ГГц, не должна превышать уровень –156 дБ(Вт/м²) в полосе шириной 50 МГц для любого местоположения радиоастрономической обсерватории в течение более 2% времени".

При проверке спутниковой системы на соответствие этому примечанию Бюро радиосвязи учитывает только зарегистрированные радиоастрономические станции. Регистрация

- дает возможность радиоастрономической станции быть учтенной при планировании установки новых передатчиков в ее окрестностях. Международная регистрация особенно важна, когда станция находится вблизи границы государства, и необходима или желательна двусторонняя или многосторонняя координация;
- устанавливает хронологический приоритет для зарегистрированной станции. После регистрации радиоастрономические станции, проводящие наблюдения в определенных полосах (например, в полосе 15,35–15,4 ГГц), могут требовать защиты от нежелательных излучений со спутниковых систем, работа которых в соседних или близлежащих полосах зарегистрирована позднее.

Регистрация радиоастрономических станций должна проводиться через органы электросвязи национальных администраций. Характеристики радиоастрономической станции, которые необходимо предоставить, описываются в Дополнении 2 к Приложению 4 Регламента радиосвязи.

Положения Регламента радиосвязи, в том числе параметры, требуемые для регистрации радиоастрономической станции, могут изменяться на каждой ВКР. Например, на ВКР-2003 к параметрам, требуемым для регистрации радиоастрономической станции, было добавлено несколько новых (таких как минимальный угол места, при котором радиотелескоп позволяет проводить наблюдения, что необходимо для расчета суммарной плотности потока мощности космических станций негеостационарной спутниковой системы, как указано в примечании п. **5.511A** РР). Перед регистрацией каждой станции следует обращаться к последней редакции Регламента радиосвязи.

Большинство радиоастрономических станций ведут наблюдения в диапазонах спектра, ширина которых превышает полосы частот, распределенные радиоастрономической службе. При проведении регистрации радиоастрономических станций необходимо позаботиться о том, чтобы в диапазонах частот наблюдения были выделены участки, распределенные радиоастрономической службе на первичной основе, а также участки, не распределенные на такой основе, поскольку защита станции распространяется только на первичные радиоастрономические полосы частот. Например, если на станции работает приемник, охватывающий диапазон 15–16 ГГц, то станция должна быть зарегистрирована в трех полосах частот:

- 15,00–15,35 ГГц, на которую не распространяется никакая защита;

- 15,35–15,40 ГГц, на которую распространяется примечание в п. **5.511А** РР; и
- 15,40–16,00 ГГц, на которую не распространяется никакая защита.

Если полоса 15,00–16,00 ГГц зарегистрирована как единое целое, ни одной из ее частей защита предоставлена не будет. Регистрация диапазонов спектра, не обеспеченных защитой, может все же иметь смысл в целях планирования и координации.

ДОБАВЛЕНИЕ 3

Единицы измерения в радиоастрономии

Некоторые единицы и определения, применяемые в радиоастрономии, отличаются от тех, которые используются в большинстве других служб. Целью настоящего дополнения является перевод жаргона, используемого радиоастрономами, на язык других служб, особенно в отношении мощности сигнала и усиления антенны.

Мощность сигнала

В радиоастрономии мощность сигнала измеряется в единицах под названием "янский" (сокращенно Ян). Единица измерения названа в честь Карла Янски – первооткрывателя космических радиосигналов. Ян – это единица мощности на единицу площади на единицу полосы пропускания (т. е. спектральная плотность потока мощности):

$$1 \text{ Ян} \equiv 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2/\text{Гц}).$$

Существует несколько причин, по которым радиоастрономы выражают мощность сигнала в янских.

- Радиоастрономические сигналы очень слабы, следовательно, значения в янских невелики.
- В радиоастрономии используется множество различных антенн с разной площадью сбора. Для того чтобы иметь возможность сравнения измеренных величин мощности сигнала различных антенн, мощность сигнала в янских выражается на единицу площади поверхности сбора антенны. Нормируя значения на единицу площади и на единицу полосы пропускания, при помощи единицы янский можно напрямую сравнивать измеренные значения мощности сигнала различных радиотелескопов.
- Многие радиоастрономические сигналы являются широкополосными (например, тепловое излучение горячих газов), а мощность принимаемого сигнала зависит от общей полосы пропускания приемника. В единице янский это учтено путем выражения мощности сигнала на единицу полосы пропускания.

Многие службы радиосвязи выражают мощность сигнала только в единицах мощности. Наиболее распространенной единицей является дБм или децибелы по отношению к 1 мВт. Единица дБм – это логарифмическая единица измерения, что очень удобно, так как диапазон мощности сигнала, который может быть получен на основе наземных радиосигналов, составляет несколько порядков, особенно с учетом того, что единица дБм может использоваться для выражения как передаваемой, так и получаемой мощности. При этом диапазон значений может составлять свыше 200 дБ. Для сравнения, значения мощности сигнала в радиоастрономии не изменяются в столь большом диапазоне. Источник в 1 Ян считается очень мощным, а стандартный диапазон чувствительности радиотелескопа составляет несколько микроянских (мкЯн) или примерно 60 дБ от полного диапазона измерений.

Поскольку янский (спектральная плотность потока мощности) и дБм (мощность) – это две разные единицы, они могут сравниваться, если заданы некоторые номинальные допущения. Янский преобразуется в мощность путем умножения на полосу пропускания приемника и эффективную площадь сбора антенны. В нижеследующей таблице эти две единицы сравниваются при заданной полосе пропускания, относящейся к некоторым распространенным наземным сигналам, и при условии, что площадь сбора антенны соответствует площади сбора изотропной антенны, $\lambda^2/4\pi$:

$$\text{Мощность (мВт)} = \text{Спектральная плотность потока мощности (Ян)} * 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц}) * 1000 \text{ мВт}/\text{Вт} * \\ * \text{Полоса пропускания (Гц)} * [\text{Длина волны (м)}]^2 \div 4\pi;$$

$$\text{Мощность (дБм)} = 10 * \log_{10}[\text{Мощность (мВт)}].$$

Примеры значений мощности принимаемого сигнала в дБм, соответствующей сигналу в 1 Ян, принимаемому изотропной антенной в определенной полосе пропускания, для некоторых распространенных сигналов

Тип сигнала	Полоса пропускания	Частота/ длина волны	Уровни в дБм, соответствующие 1 Ян
Сухопутная подвижная служба	12,5 кГц	450 МГц/0,67 м	1 Ян = –204 дБм
GSM	200 кГц	1 800 МГц/0,17 м	1 Ян = –204 дБм
DVB-T	8 МГц	500 МГц/0,6 м	1 Ян = –176 дБм
LTE	10 МГц	2 655 МГц/0,11 м	1 Ян = –190 дБм
Wi-Fi	40 МГц	5 300 МГц/0,06 м	1 Ян = –190 дБм

Для оценки этих чисел на перспективу в качестве эталона использовался телефон GSM, чувствительность которого равна –111 дБм (по спецификациям GSM), следовательно, сигнал в 1 Ян на 93 дБ ниже предельного уровня чувствительности GSM, а сигнал в 1 мкЯн примерно на 153 дБ ниже предельного уровня чувствительности GSM. Чувствительность радиотелескопа может более чем на 15 порядков превышать чувствительность приемника GSM.

Радиоастроном, пытающийся преобразовать мощность наземного сигнала в эквивалентное значение в янских, может порой сталкиваться с тем, что значения мощности сигнала выражаются в микровольтах на метр (мкВ/м) или, эквивалентно, в децибелах, дБ(мкВ/м)¹². Это просто мера измерения амплитуды электрического поля E . Для преобразования E в эквивалентную мощность можно воспользоваться законом Ома: P (Вт/м²) = E^2/Z_0 , где $Z_0 = 377$ Ом – сопротивление свободного пространства. Значения амплитуды электрического поля (вместо мощности) часто встречаются в документах, относящихся к электромагнитной совместимости (ЕМС), например в правилах для нелицензированных устройств Федеральной комиссии по связи США. При помощи алгебраических вычислений выполняем следующие преобразования:

$$P \text{ (мВт)} = 1,9 \times 10^{-8} * [E \text{ (мкВ/м)}]^2 * [f \text{ (МГц)}]^{-2};$$

$$P \text{ (дБм)} = -77,2 + E \text{ [дБ (мкВ/м)]} - 20 * \log_{10}[f \text{ (МГц)}].$$

Это преобразование также приводится в Отчете МСЭ-R RA.2131, в котором указаны пороговые значения защиты для наблюдений РАС в единицах, эквивалентных величине электрического поля.

Антенны

В радиоастрономии плотность потока мощности или спектральная плотность потока мощности (обе величины обозначают мощность или спектральную плотность мощности на единицу площади), как правило, преобразуются в суммарную мощность. Следовательно, эффективная площадь сбора антенны является величиной, более точно отражающей характеристики антенны, чем усиление антенны. Эффективная площадь сбора антенны A_e – это комбинация геометрической площади сбора A_g (если она определена) и коэффициента использования поверхности антенны η_a : $A_e = \eta_a A_g$. В общем случае усиление радиоастрономической антенны выражается как увеличение температуры приемника (в Кельвинах), отнесенное к сбору энергии в одном направлении поляризации от источника, суммарная плотность потока F которого составляет 1 Ян. Эта величина называется усилением антенны G в К/Ян. Преобразование между A_e и G :

$$\frac{1}{2} F A_e = k_B \Delta T_K;$$

$$A_e \text{ (м}^2\text{)} = \frac{2 k_B \Delta T_K}{10^{-26} F_{Jy}} = 2760 G \text{ (К/Ян)},$$

где k_B – постоянная Больцмана.

¹² Следует отметить, что дБ(мкВ/м) равен $20 * \log_{10}(\text{мкВ/м})$, а не $10 * \log_{10}(\text{мкВ/м})$, так как эта величина представляет электрическое поле, а не мощность.

Службы радиосвязи, как правило, определяют основные характеристики антенн другим выражением усиления антенны: величина, на которую возрастает (или снижается) мощность сигнала на выходе антенны относительно мощности сигнала, которая была бы получена на выходе стандартной эталонной антенны, при условии, что сигнал направлен вдоль главного луча эталонной антенны. Наиболее распространенной эталонной антенной является изотропная антенна. Эффективная площадь сбора A_e изотропной антенны равна $\lambda^2/4\pi = 7162/[f \text{ (МГц)}]^2$, следовательно, эффективная площадь сбора антенны с линейным усилением G (относительно изотропной), равна $A_e = G \text{ (изотроп.)} * 7162/[f \text{ (МГц)}]^2$. Уравнивание эффективной площади, основанной на G (К/Ян), с площадью, основанной на линейном усилении относительно изотропной антенны:

$$G \text{ (изотроп.)} \frac{7162}{f_{\text{МГц}}^2} = 2760 G \text{ (К/Ян)};$$

$$G \text{ (изотроп.)} = 0,4 f_{\text{МГц}}^2 G \text{ (К/Ян)}.$$

В логарифмических единицах:

$$G \text{ (дБи)} = -4 + 20\log_{10}(f_{\text{МГц}}) + 10\log_{10}[G \text{ (К/Ян)}].$$

И наоборот:

$$G \text{ (К/Ян)} = 2,5 f_{\text{МГц}}^{-2} 10^{\frac{G \text{ (дБи)}}{10}}.$$

В следующей таблице представлено несколько примеров усиления антенны, выраженного в обеих единицах.

Антенна	Частота (МГц)	G (К/Ян)	Усиление (дБи)	A_e (м ²)
Базовая станция сотовой связи	1 800	$2,5 \times 10^{-5}$	15	0,07
Обсерватория Медицина, Италия	1 400	0,12	50	331
Обсерватория Аресибо, Пуэрто-Рико	1 400	11	69	30 360

ДОБАВЛЕНИЕ 4

Практическое использование шкалы децибелов

Децибел (дБ) – это логарифмическая единица, обозначающая отношение физической величины (как правило, мощности или интенсивности) относительно заданного или предполагаемого эталонного уровня. Отношение в децибелах – это десятикратный логарифм по основанию 10 отношения двух уровней мощности (определение IEEE). Децибел – это одна десятая часть бела – редко используемой единицы, названной в честь Александра Грэма Белла.

Децибел используется при самых разнообразных измерениях в науке и технике, чаще всего в акустике, электронике и теории управления. В электронике часто выражаются в децибелах коэффициенты усиления усилителей, затухание сигналов и отношения сигнал/шум. Децибел предоставляет ряд преимуществ, в частности возможность представления в удобной форме очень больших или очень малых величин, а также возможность произвести умножение коэффициентов или отклонений при помощи простых операций сложения и вычитания.

(Вышеприведенный текст взят из обширной статьи в Википедии, к которой можно обратиться, например, для получения информации по таким единицам, как дБм и дБВт, коэффициентов в милливаттах и ваттах.)

Использование дБ с точностью 1%

Большинству из нас знакома логарифмическая шкала децибелов.

Множитель	дБ
1/1000	–30
1/100	–20
1/10	–10
1	0
10	10
100	20
1000	30
и т. д.	

Но немногие знают, что 11 дБ – это 4π , а 14 дБ – множитель 25, точность обеих величин – 1%.

Пара числовых совпадений, $3 \text{ дБ} \approx 2$ и $5 \text{ дБ} \approx \pi$, составляет следующую таблицу с точностью до 1%.

Множитель	дБ	Ошибка
1	0	0
1,25	1	0,7%
$\pi/2$	2	0,9%
2	3	-0,2%
2,5	4	0,5%
π	5	0,7%
4	6	-0,5%
5	7	0,2%
2π	8	0,4%
8	9	-0,7%
10	10	0
4π	11	0,2%
16	12	0,95%
20	13	-0,2%
25	14	0,5%
и т. д.		

При помощи этих таблиц, которые легко запомнить, можно производить быстрые вычисления с точностью 1%.

Другие логарифмические шкалы

Непер, альтернативная логарифмическая единица отношения, использует натуральный логарифм (основание e).

Децибелы и неперы – это не первые логарифмические шкалы. С древних времен астрономы используют "звездные величины" для определения малейшей разницы в яркости звезд, легко различимой визуально. В настоящее время она определяется таким образом, что разнице в +5 звездных величин соответствует снижение яркости в 100 раз. Таким образом, +1 звездная величина равна в точности -4 дБ.

ДОБАВЛЕНИЕ 5

Перечень сокращений

A/D	Analogue-to-Digital	Аналогово-цифровой
AIPS	Astronomical Image Processing System	Система обработки астрономических изображений
ALMA	Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array	Большая миллиметровая/ субмиллиметровая антенная решетка в Атакаме
ANC	Adaptive Noise Cancellation	Адаптивное шумоподавление
ASTRO	Antarctic Sub-millimetre Telescope and Remote Observatory	Антарктический субмиллиметровый телескоп и обсерватория с дистанционным управлением
ATA	Allen Telescope Array	Антенная решетка Аллена
BIMA	Berkeley-Illinois-Maryland Association	Ассоциация Беркли – Иллинойс – Мериленд
BNetzA	Bundesnetzagentur	Федеральное сетевое агентство
BPL	Broadband over Powerlines	Широкополосная связь по линиям электропередачи
BPSK	Binary Phase-Shift Keying	Двоичная фазовая манипуляция
BR	Radiocommunication Bureau	Бюро радиосвязи (БР)
BSS	Broadcasting Satellite Service	Радиовещательная спутниковая служба (РСС)
CARA	Center for Astrophysical Research in Antarctica	Центр астрофизических исследований в Антарктике
CARMA	Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy	Комбинированная решетка для астрономических исследований на миллиметровых волнах
CCIR	the International Consultative Committee on Radio	Международный консультативный комитет по радиосвязи (МККР)
CCV	the Coordinating Committee for Vocabulary	Координационный комитет по терминологии (ККТ)
CISPR	the International Special Committee on Radio Interference	Международный специальный комитет по радиопомехам (СИСПр)
CMB	the Cosmic Microwave Background	Космическое микроволновое фоновое излучение
CME	Coronal Mass Ejection	Корональный выброс масс
CORF	the Committee on Radio Frequencies of the National Academy of Sciences	Комитет по радиочастотам Национальной академии наук
COSPAR	the Committee on Space Research	Комитет по космическим исследованиям (КОСПАР)
CPM	Conference Preparatory Meeting	Подготовительное собрание к конференции (ПСК)
CRAF	the Committee on Radio Astronomy Frequencies	Комитет по частотам для радиоастрономии
CRF	the Celestial Reference Frame	Небесная система координат
CT	Computed Tomography	Компьютерная томография (КТ)

CW	Continuous Wave	Незатухающая волна
dB	Decibel	Децибел
DNA	Deoxyribonucleic Acid	Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК)
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial	Наземное цифровое телевизионное радиовещание
EESS	Earth Exploration-Satellite Service	Спутниковая служба исследования Земли (ССИЗ)
e.i.r.p.	Effective Isotropic Radiated Power or Equivalent Isotropic Radiated Power	Эффективная изотропно излучаемая мощность или эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.)
EMC	Electromagnetic Compatibility	Электромагнитная совместимость (ЭМС)
EOP	Earth Orientation Parameter	Параметр ориентации Земли
epfd	Equivalent Power Flux Density	Эквивалентная плотность потока мощности (э.п.п.м.)
ESA	European Space Agency	Европейское космическое агентство (ЕКА)
EU	European Union	Европейский союз (ЕС)
FET	Field Effect Transistor	Полевой транзистор
FFT	Fast Fourier Transform	Быстрое преобразование Фурье (БПФ)
FPA	Focal plane array	Антенная решетка в фокальной плоскости
FSS	Fixed Satellite Service	Фиксированная спутниковая служба (ФСС)
FX	Fourier Transform before multiplication	Преобразование Фурье перед умножением
GaAs FET	Gallium Arsenide Field Effect Transistors	Арсенид-галлиевые полевые транзисторы
GBT	Green Bank Telescope	Телескоп Грин Бэнк
GHz	GigaHertz (= 1 000 000 000 Hertz)	Гигагерц (= 1 000 000 000 Герц) (ГГц)
GMRT	Giant Metrewave Radio Telescope	Большой радиотелескоп, работающий в метровом диапазоне
GMSK	Gaussian-filtered Minimum Shift Keying	Гауссовская манипуляция с минимальным частотным сдвигом
GNSS	Global Navigation Satellite System	Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС)
GPS	Global Positioning System	Глобальная система определения местоположения
GSM	Global System for Mobile Communications	Глобальная система подвижной связи
GSO	Geo-Stationary Orbit	Геостационарная орбита (ГСО)
HI	Neutral Hydrogen	Нейтральный водород
HI	Ionised Hydrogen	Ионизированный водород
HEMT	High Electron Mobility Transistor	Транзистор с высокой подвижностью электронов
HF	High Frequency	Высокая частота (ВЧ)

IAU	the International Astronomical Union	Международный астрономический союз (МАС)
ICSU	the International Council of Scientific Unions	Международный совет научных союзов (МЧС)
IEEE	the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.	Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике
IF	Intermediate Frequency	Промежуточная частота (ПЧ)
INR	Interference to Noise Ratio	Отношение помеха/шум
ISAS	the Institute of Space and Astronautical Science	Институт космических наук и астронавтики
ISM	Industrial, Scientific and Medical	Устройства промышленного, научного и медицинского применения (ПНМ)
ITU	International Telecommunication Union	Международный союз электросвязи (МСЭ)
ITU-R	the Radiocommunication Sector of the ITU	Сектор радиосвязи МСЭ (МСЭ-R)
ITU-T	the Telecommunication Standardization Sector of the ITU	Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-T)
IUCAF	the Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science	Межсоюзная комиссия по распределению частот для радиоастрономических и космических исследований (ИЮКАФ)
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astronomy	Международная служба VLBI геодезии и астрономии
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	Японское агентство аэрокосмических исследований
JPL	Jet Propulsion Laboratory	Лаборатория реактивных двигателей
Jy	Jansky ($= 1 \times 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz} = -260 \text{ dB(W/m}^2/\text{Hz)}$)	Янский ($= 1 \times 10^{-26} \text{ Вт/м}^2/\text{Гц} = -260 \text{ дБ(Вт/м}^2/\text{Гц)}$) (Ян)
kHz	KiloHertz ($= 1\,000 \text{ Hertz}$)	Килогерц ($= 1\,000 \text{ Герц}$) (кГц)
LAN	Local Area Network	Локальная сеть
LEO	Low Earth Orbit	Низкая околоземная орбита
LOFAR	Low Frequency Array	Низкочастотная антенная решетка
LoS	Line of Sight	Линия прямой видимости
LTE	Long Term Evolution	Технология долгосрочного развития
MHz	MegaHertz ($= 1\,000\,000 \text{ Hertz}$)	Мегагерц ($= 1\,000\,000 \text{ Герц}$) (МГц)
MPIfR	Max Planck Institut für Radioastronomie	Радиоастрономический институт Марка Планка
MSS	Mobile Satellite Service	Подвижная спутниковая служба (ПСС)
MWA	Murchison Widefield Array	Широкопольная решетка в Мерчисоне
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (НАСА)
NDACC	Network for Detection of Atmospheric Composition Change	Сеть для обнаружения изменений состава атмосферы
NEA	Near Earth Asteroid	Околоземный астероид
NEO	Near Earth Object	Околоземный объект
NIR	Near Infrared	Ближняя инфракрасная зона

NRAO	National Radio Astronomy Observatory	Национальная радиоастрономическая обсерватория
NRC	National Research Council	Национальный научно-исследовательский совет
NSF	National Science Foundation (USA)	Национальный научный фонд США
OoB	Out-of-Band	Внеполосное излучение
OVRO	Owens Valley Radio Observatory	Радиообсерватория Оуэнс-Вэлли
pc	parsec ($= 3.09 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ light year}$)	парсек ($= 3,09 \times 10^{16} \text{ м} = 3,26 \text{ световых лет}$)
PET	Positron Emission Tomography	Позитронно-эмиссионная томография
pdf	Power Flux Density	Плотность потока мощности (п.п.м.)
PLC	Power Line Communications	Связь по электрическим сетям
PLT	Power Line Telecommunications	Электросвязь по линиям электропередачи
PSK	Phase-Shift Keying	Фазовая манипуляция (ФМн)
RA	Radiocommunication Assembly	Ассамблея радиосвязи (АР)
RAFCAP	the Radio Astronomy Frequency Committee in the Asia-Pacific Region	Комитет по частотам для радиоастрономии в Азиатско-Тихоокеанском регионе
RAG	the Radiocommunication Advisory Group	Консультативная группа по радиосвязи (КГР)
RAS	Radio Astronomy Service	Радиоастрономическая служба (РАС)
RF	Radio Frequency	Радиочастота (РЧ)
RFI	Radio Frequency Interference	Радиочастотная помеха (РЧ-помеха)
RLS	Radiolocation service	Радиолокационная служба (РЛС)
rms	Root Mean Square	Среднеквадратическое значение
RNSS	Radionavigation Satellite Service	Радионавигационная спутниковая служба (РНСС)
RQZ	Radio Quiet Zone	Зона радиомолчания
RR	Radio Regulations	Регламент радиосвязи (РР)
RRB	the Radio Regulations Board	Радиорегламентарный комитет (РПК)
SCRPM	the Special Committee for Regulatory and Procedural Matters	Специальный комитет по регламентарно-процедурным вопросам (СКРПВ)
SETI	the Search for ExtraTerrestrial Intelligence	Поиск внеземных цивилизаций
SFCG	Space Frequency Coordination Group	Группа координации космических частот
SG	Study Group	Исследовательская комиссия (ИК)
SIS	Superconductor Insulator Superconductor	Сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник
SKA	Square Kilometer Array	Антенная решетка площадью в один квадратный километр
SMA	the Submillimeter Array	Субмиллиметровая антенная решетка
SNR	Signal to Noise Ratio (S/N)	Отношение сигнал/шум (С/Ш)
SNR	Supernova Remnant	Остаток сверхновой
SOS	Space Operation Service	Служба космической эксплуатации (СКЭ)

spfd	Spectral Power Flux Density	Спектральная плотность потока мощности (с.п.п.м.)
SRI	Stanford Research Institute	Стэнфордский исследовательский институт
SRS	Space Research Service	Служба космических исследований (СКИ)
THz	TeraHertz (= 1 000 000 000 000 Hertz)	Терагерц (= 1 000 000 000 000 Герц) (ТГц)
TRF	the Terrestrial Reference Frame	Наземная система координат
UHF	Ultra High Frequency	Ультравысокая частота (УВЧ)
UMET	Universidad Metropolitana	
URSI	the International Union of Radio Science	Международный научный радиосоюз
USRA	Universities Space Research Association	Ассоциация космических исследований университетов
UWB	Ultra-Wide Band	Сверхширокая полоса
VHF	Very High Frequency	Очень высокая частота (ОВЧ)
VLA	Very Large Array	Очень большая антенная решетка
VLBA	Very Long Baseline Array	Антенная решетка со сверхдлинной базой
VLBI	Very Long Baseline Interferometry	Интерферометрия со сверхдлинной базой
VSOP	VLBI Space Observatory Programme	Программа космической обсерватории для VLBI
WARC	World Administrative Radio Conference	Всемирная административная радиоконференция (ВАРК)
Wi-Fi	Wireless Fidelity	Технология беспроводного доступа
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe	Микроволновой анизотропный зонд Уилкинсона
WP	Working Party	Рабочая группа (РГ)
WRC	World Radiocommunications Conference	Всемирная конференция радиосвязи (ВКР)
WSRT	the Westerbork Synthesis Radio Telescope	Синтез-радиотелескоп в Вестерборке

Международный союз электросвязи
Отдел продаж и маркетинг
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Факс: +41 22 730 5194
Тел.: +41 22 730 6141
Эл. почта: sales@itu.int
Веб-сайт: www.itu.int/publications

ISBN 978-92-61-14484-5 SAP id



Отпечатано в Швейцарии
Женева, 2015 г.

Фотографии представлены: ATCA David Smyth