

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2424-0
(06/2018)

**Методы измерения и новые технологии
спутникового контроля**

Серия SM
Управление использованием спектра



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра

Примечание. – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2424-0

Методы измерения и новые технологии спутникового контроля

(2018 год)

1 Введение

Справочник МСЭ по контролю за использованием спектра содержит подробную информацию об измерении параметров сигнала и основных процедурах радиоконтроля, но в нем не хватает описания передовых методов измерения и новых технологий спутникового контроля. Цель настоящего Отчета – дать подробное описание необходимых функций станций спутникового контроля и соответствующих технических требований, предъявляемых к новым решениям по контролю, в виде систематического и интуитивно понятного руководства для тех администраций, которые желают реализовать возможности спутникового контроля.

При разработке настоящего Отчета принималась во внимание следующая документация МСЭ, касающаяся контроля за использованием спектра:

- Рекомендация МСЭ-R RA.769 – Критерии защиты, используемые для радиоастрономических измерений;
- Рекомендация МСЭ-R SM.1600 – Техническая идентификация цифровых сигналов;
- Отчет ERC 171: "Влияние нежелательных излучений спутников IRIDIUM на радиоастрономические наблюдения в полосе частот 1610,6–1613,8 МГц";
- Справочник МСЭ по контролю за использованием спектра, издание 2011 года.

Другие документы:

Reconstruction of the Satellite Orbit via Orientation Angles (Journal for Geometry and Graphics, Volume 4 (2000), by A. M. Farag and Gunter Weiss.

2 Термины и определения

8PSK	Eight state phase shift keying		8-позиционная фазовая манипуляция
16 QAM	Sixteen state quadrature amplitude modulation		16-позиционная квадратурная амплитудная модуляция
AOA	Angle of arrival		Угол прихода
BPSK	Binary phase shift keying – two state phase shift keying		Двоичная фазовая манипуляция – двухпозиционная фазовая манипуляция
CDMA	Code division multiple access		Многостанционный доступ с кодовым разделением каналов
CW	Continuous wave		Непрерывная волна
DVB-CID	DVB Carrier-Identification		Идентификация несущей DVB
e.i.r.p.	equivalent isotropic radiated power	э.и.и.м.	Эквивалентная изотропная излучаемая мощность
EVM	Error vector magnitude		Амплитуда вектора ошибок
FDMA	Frequency division multiple access		Многостанционный доступ с частотным разделением каналов
FDOA	Frequency difference of arrival		Разница частоты прихода
LDPC	Low density parity check – a linear error correcting code		Контроль четности с низкой плотностью – линейный код коррекции ошибок
pdf	Power flux density, dBW/m ² in the applicable bandwidth	п.п.м.	Плотность потока мощности в применимой полосе пропускания, дБВт/м ²
POA	Power of arrival		Мощность прихода
RS	Reed Solomon coding		Кодирование Рида – Соломона

SDMA	Space-division multiple access		Многостанционный доступ с пространственным разделением каналов
SOA	Service oriented architecture		Сервисно-ориентированная архитектура
spfd	Spectral power flux density, dBW/m ² /Hz	с.п.п.м.	Спектральная плотность потока мощности, дБВт/м ² /Гц
TCA	Time of closest approach		Время наибольшего приближения
TDMA	Time division multiple access		Многостанционный доступ с временным разделением
TDOA	Time difference of arrival		Разница во времени прихода сигнала
Turbo	High-performance forward error correction codes		Коды с высокоэффективной упреждающей коррекцией ошибок
QPSK	Quadrature phase shift keying – four state phase shift keying		Квадратурная фазовая манипуляция – 4-позиционная фазовая манипуляция

3 Задачи спутникового контроля

Цель управления использованием спектра заключается в достижении максимальной эффективности использования спектра, минимизации помех и исключении несанкционированного и ненадлежащего использования спектра. Процесс управления использованием спектра поддерживается контролем за использованием спектра. Для контроля космических радиослужб требуются иные подходы и методы, чем для наземного радиоконтроля. По этой причине администрациям важно создать полнофункциональные станции спутникового контроля.

Спутниковый контроль решает две основные задачи.

– Задача 1: оценка использования ресурсов спутника:

- уровень несущей и ретранслятора;
- занятость орбитальной позиции;
- занятость частоты;
- орбитальная позиция и присвоение частот (при длительном использовании);
- соответствие плотности потока мощности (п.п.м.) и других технических параметров;
- покрытие луча.

– Задача 2: обнаружение помех и разрешение проблемы помех:

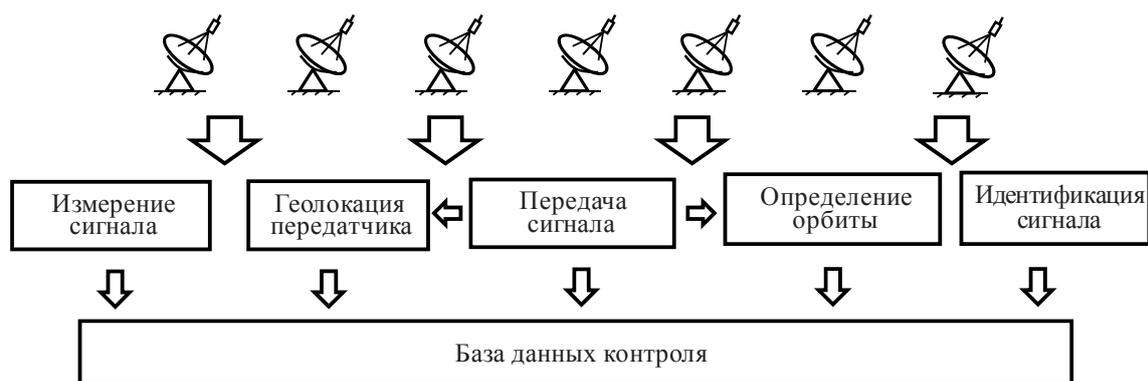
- геолокация мешающих передатчиков на поверхности Земли;
- определение того, является ли мешающий передатчик передатчиком подвижной или фиксированной службы;
- обнаружение и технический анализ мешающих сетей спутниковой связи;
- определение точного положения земных источников помех;
- исследование параметров излучения и их проверка по условиям лицензии;
- устранение помех.

4 Функции систем контроля

В этом разделе описываются основные функции станции спутникового контроля. Структура типичной стационарной станции контроля показана на рисунке 1.

РИСУНОК 1

Структура типичной стационарной станции контроля



Report SM.2424-01

4.1 Прием сигналов

Для контроля сигналов спутников чаще всего используется параболическая антенна, поскольку ее можно направить на нужный спутник и использовать для слежения за спутниками. От размера антенны зависит ее коэффициент усиления, поэтому она должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить качественный прием сигнала. Для схем модуляции более высокого порядка требуются более высокие значения отношения C/N . Орбитальную позицию спутника можно приблизительно рассчитать по азимутальному углу и углу места антенны. Спектр принимаемого сигнала отображается анализатором спектра, подключенным к антенне.

Фазированные антенные решетки изменяют форму своей диаграммы направленности, регулируя фазу сигнала, поступающего на излучающие элементы решетки. Это позволяет почти одновременно сканировать несколько спутников в пределах большой пространственной дуги. Следовательно, фазированные антенные решетки могут быть удачным выбором для контроля сигналов нескольких спутников ГСО.

Более подробное описание требований, предъявляемых к антенным системам, используемым как для ГСО, так и для НГСО, содержится в пунктах 5.1.3.3–5.1.3.6, а примеры использования антенны – в пункте 5.1.6.1.1 Справочника МСЭ-R по контролю за использованием спектра.

Диапазоны частот спутников ГСО, которые обычно контролируют станции спутникового контроля, – это диапазоны УВЧ, L, S, C, X, Ku и Ka. Диапазоны частот спутников НГСО, которые обычно контролируют станции спутникового контроля, – это диапазоны УВЧ, L, S, X, Ku и Ka. С расширением использования широкополосной спутниковой связи для обеспечения доступа в интернет спрос на частоты продолжает расти, и контроль за полосами частот будет расширен до диапазона Q и выше.

4.2 Измерение сигнала

Современные приемные системы должны выполнять измерение в режиме реального времени, в автономном режиме (данные анализируются позже; так называемая постобработка) и в установленном время. Ширина полосы измерения системы должна превышать диапазон типичных измеряемых несущих спутника. Однако система должна как минимум поддерживать ширину полосы измерения, превышающую 100 МГц. Система также должна записывать данные IQ по всей ширине полосы передачи сигнала. Записи данных IQ используются для последующей обработки и анализа сигнала.

Следующие параметры радиочастоты должны измеряться приемной системой в режиме реального времени:

- центральная частота;
- доплеровская частота;
- п.п.м. в эталонной полосе частот и общая п.п.м.;

- эквивалентная изотропная излучаемая мощность (э.и.и.м.);
- отношение несущей к шуму, C/N_0 ;
- ширина полосы пропускания ретранслятора и ширина полосы несущей;
- внеполосный спектр;
- отношение принимаемого сигнала к шуму.

4.3 Идентификация сигнала

Как указано выше, данные IQ из приемной системы могут поддерживать последующую обработку и анализ параметров сигнала. При надлежащем механизме запуска приемная система может начинать регистрацию сигнала, как только он обнаружен, чтобы сохранить характеристики сигнала для последующего анализа. См. Рекомендацию МСЭ-R SM.1600 – Техническая идентификация цифровых сигналов, чтобы ознакомиться с процессом создания и анализа записей данных IQ. Приемная система должна определять следующие свойства сигнала:

- скорость кодирования и скорость передачи символов;
- тип модуляции – QPSK, 8PSK, BPSK, 16QAM;
- тип кодирования источника и канала (RS, Turbo, LDPC);
- тип многостанционного доступа – TDMA, FDMA, SDMA, CDMA;
- идентификация несущей DVB (DVB-CID). DVB-CID – это уникальный идентификатор владельца спутникового сигнала согласно ETSI TS 103 129.

Для идентификации системы связи можно использовать следующие дополнительные параметры:

- тип протокола связи – IP, DCME;
- система связи – SNG, DVB-S, DVB-S2, COMTECH;
- тип сети связи – SkyWAN, iDirect, LinkWay/LinkStar.

4.4 Контроль сигнала и предупредительная сигнализация

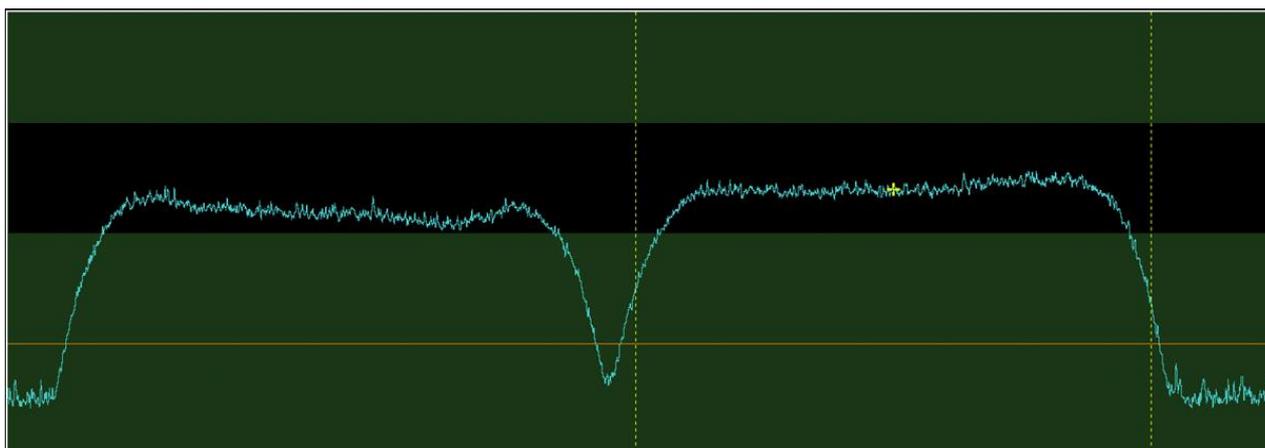
Для обнаружения несанкционированных передатчиков и выявления аномалий в ретрансляторе или в заданной полосе пропускания необходимо контролировать сигнал. Следует на постоянной основе определять отклонение измеренных параметров от номинальных (ожидаемых).

Система контроля может генерировать предупредительный сигнал, уведомляя оператора о превышении заданного порога. На рисунке 2 показаны примеры предупреждений о низком и высоком уровне мощности сигналов. Современные системы спутникового контроля позволяют устанавливать пороги высокого и низкого уровня мощности. Когда происходит нарушение уровня, программное обеспечение автоматически принимает меры, предоставляя полезную информацию для управления спутником. На рисунке показаны два сигнала на фоне соответствующих высоких и низких уровней мощности (затенены).

Аналогичные ограничения могут быть установлены для разных параметрических измерений с предоставлением оператору в режиме реального времени оповещений об изменении условий работы.

РИСУНОК 2

Пример предупредительной сигнализации при низком уровне мощности сигнала



Report SM.2424-02

Это можно делать вручную (только для нескольких несущих) или автоматически (для множества несущих), обеспечивая круглосуточный контроль. Решение таких задач, как запись данных IQ, классификация модуляции и уведомление оператора контроля, можно инициировать автоматически, чтобы упростить выявление аномалий. Кроме того, систему геолокации можно настроить и запускать во всех случаях, когда обнаружено возникновение помех или несанкционированное излучение.

Для обнаружения аномалий и несанкционированной передачи и установки предупредительной сигнализации могут использоваться следующие параметры:

- центральная частота;
- ширина полосы;
- э.и.и.м.;
- отношение S/N ;
- изменение уровня шума в защитной полосе;
- характеристики модуляции (скорость передачи символов, EVM);
- спектрограммы, которые оператор может использовать для визуализации кратковременных помех, быстрого смещения временных интервалов и сигналов с качанием частоты.

4.5 Геолокация передатчиков на Земле

Геолокация передатчиков на Земле выполняется с помощью алгоритмов кросс-корреляции с использованием одного, двух или трех спутников.

Ввиду ограничений алгоритмов и многочисленных факторов, влияющих на точность определения географического местоположения, результат геолокации – это не точное местоположение мешающего передатчика, а область, где он с наибольшей вероятностью расположен.

Результат обычно представляется в виде области со следующими параметрами:

- долгота и широта центральной точки области;
- точность геолокации, которая может быть представлена эллипсом с большой осью, малой осью и азимутом области;
- тип передатчика – стационарный или движущийся.

4.6 Передача сигнала

Система передачи сигнала станции контроля космической радиосвязи используется в основном для передачи опорного сигнала из известного удаленного местоположения для повышения точности геолокации. Опорный сигнал обычно представляет собой сигнал с расширением спектра. Спектральные характеристики сигнала с расширением спектра таковы, что его трудно обнаружить и он не создает помех для сигналов на спутниковом ретрансляторе.

4.7 Определение орбиты

Точность геолокации в значительной мере зависит от точности эфемерид спутника. Настоятельно рекомендуется использовать для геолокации эфемериды спутника с погрешностью менее 5 км.

Существует три способа получить эфемериды спутника. Первый способ – получить их от интернет-операторов или операторов спутниковой связи. У операторов имеются актуальные и точные эфемериды. Второй способ – измерение эфемерид спутника активными методами. Третий способ – измерение эфемерид спутника пассивными методами.

Активные методы определения эфемерид с использованием радиоизмерений обычно основаны на доплеровском сдвиге, интерферометрии или радиолокации и, как правило, требуют, чтобы несколько передатчиков, расположенных в разных местах, непрерывно излучали сигнал на спутник и принимали тот же сигнал от спутника синхронно в течение нескольких часов; затем вычисляются параметры орбиты спутника, а также его эфемериды. Также можно использовать оптическое определение орбиты.

Однако, в отличие от активных методов определения эфемерид спутника, пассивный метод не требует передачи сигналов на спутник, в связи с чем уменьшается вероятность создания помех для спутника самими сигналами. При этом методе используются линии разницы во времени прихода сигнала (TDOA) по меньшей мере на три разнесенные приемные станции. Приемные станции организуются в треугольник со сторонами в сотни километров и точно синхронизируются по сигналу GPS. Значения TDOA вычисляются путем выполнения регрессионного анализа орбитальной модели с объединением значений TDOA во времени.

4.8 Поиск источника сигнала путем наведения

Для поиска источника сигнала путем наведения используются подвижные станции контроля, определяющие местоположение и оператора наземного передатчика или другого источника помех для санкционированных сигналов спутниковой связи. Обычно для исследования помех применяются методы, использующие угол прихода (AOA), мощность прихода (POA) и алгоритмы кросс-корреляции TDOA. Поиск источника сигнала начинается с результатов определения географического местоположения спутника, которые обозначают область, откуда с наибольшей вероятностью исходят помехи. Итеративный процесс с использованием подвижных ресурсов приводит к успешному определению местоположения наземного передатчика. Результатами наземного поиска и подтверждения являются:

- долгота и широта целевого передатчика (местоположение);
- оператор целевого передатчика (идентификация).

4.9 Документирование и база данных

Процедуры и результаты контроля могут автоматически регистрироваться в базе данных для поддержки долгосрочного анализа тенденций и документирования влияния запланированных изменений и помех. База данных содержит записи данных, полученных в результате разных операций, выполняемых разными средствами на станциях контроля в различных регионах или по всей стране. Кроме того, база данных может поддерживать создание регулярных (ежедневных, еженедельных) отчетов для обеспечения функционирования в штатном режиме и технического обслуживания. Могут регистрироваться следующие основные параметры:

- данные спектрограмм, данные I/Q;
- данные измерений сигналов;

- данные идентификации сигналов;
- данные геолокации;
- данные исследования помех;
- аудио- и видеоданные;
- параметры конфигурации оборудования во время контроля;
- рабочая документация;
- рабочий журнал.

4.10 Визуализация данных контроля

Для понимания работы спутниковой системы в течение длительного периода времени базу данных контроля можно визуализировать путем отображения данных в разных форматах, включая традиционный анализ спектра, спектрограммы, каскадные диаграммы, диаграммы сигнальных созвездий (для демодулированных сигналов), а также цифровые карты с данными, привязанными к местоположению. Периодические измерения показывают изменения параметров в течение коротких или длительных периодов времени и обеспечивают понимание тенденций и влияния других факторов, связанных с характеристиками системы (погода, местные события, замена оборудования и т. д.).

Данные контроля можно наблюдать в следующих форматах:

- звук и видеоизображение (для ранее декодированных данных);
- графическое отображение данных сигнала в пространственной области, временной области, частотной области и области модуляции – спектрограмма, каскадная диаграмма и диаграмма сигнального созвездия;
- карты, построенные по результатам геолокации;
- изображение маршрута движения передвижных средств контроля.

4.11 Статистика и анализ

Для управления использованием спектра спутников и земных станций применяется высокоинтегрированная база данных для сравнения данных измерений, перечисленных в пунктах 4.2 и 4.3, с историческими данными в целях изучения как нормальной работы, так и происхождения аномальных передач. Например, эти данные позволяют анализировать:

- источники несанкционированных излучений и аномалий;
- источники помех и несанкционированные сети спутниковой связи (например, VSAT), включая частоты помех, типы модуляции, количество помех, географическое распределение источников помех;
- положение орбит спутников;
- занятость частот.

4.12 Управление оборудованием

Автоматизированное оборудование контроля способно выполнять множество функций автоматизированных измерений и облегчает создание базы данных. Оно также помогает операторам выполнять ручные операции и проверять и поддерживать функционирование станции. Аналогичные технические возможности может обеспечить дистанционное управление станцией. Кроме того, может быть установлена связь между передвижными и фиксированными средствами контроля в режиме реального времени посредством аудио- или видеосвязи через территориально-распределенную сеть. Она также может обеспечить сбор данных контроля от удаленных/подвижных станций на стационарных объектах.

Ввиду широкого разнообразия устройств контроля и изготовителей таких устройств существуют различные стандарты интерфейсов прикладного программирования (API) и форматов данных. По этой причине автоматическое и интеллектуальное управление устройствами может оказаться

невозможным. Для решения этих проблем спутниковый контроль можно классифицировать по функциям, а не по устройствам. У устройств с одинаковыми функциями должен быть один и тот же API. Чтобы облегчить эффективное использование функций контроля, администрациям следует рассмотреть возможность использования в контрольном программном обеспечении сервисно-ориентированной архитектуры (SOA).

SOA – это компонентная модель, которая связывает различные функциональные блоки устройств контроля (называемых службами) посредством четко определенных интерфейсов между ними. Интерфейс не должен зависеть от аппаратной платформы, операционной системы и языков программирования, на которых реализованы службы. Это позволяет службам, основанным на различных системах, взаимодействовать единым и универсальным способом.

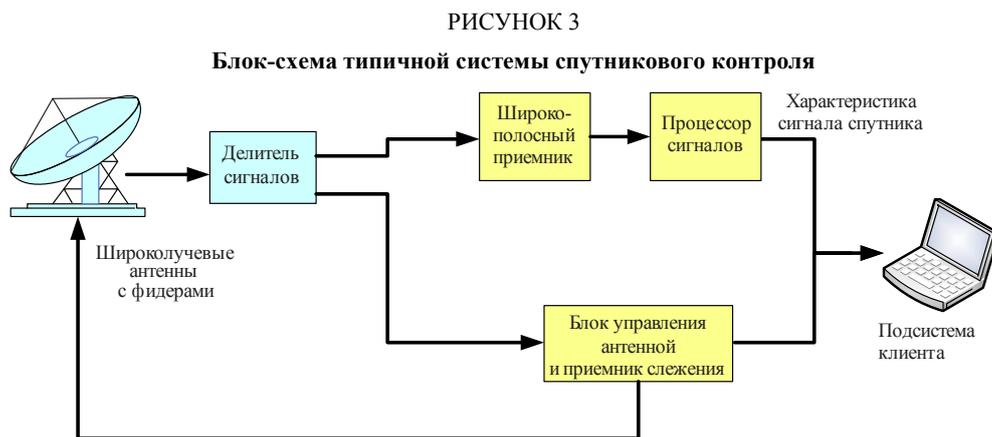
5 Оценка использования ресурсов спутника

Количество орбитальных позиций спутника ГСО ограничено. Важно проверить, правильно ли используются орбитальные позиции спутников и частоты, а также соответствуют ли фактические параметры контроля своим номинальным значениям, чтобы поддерживать выбор новых орбитальных позиций спутников и координацию между спутниками.

Кроме того, в силу все более интенсивного использования микроспутников растет вероятность возникновения помех между спутниками НГСО и наземным оборудованием. Важно контролировать параметры спутников НГСО, чтобы поддерживать нормальное использование как спутниковой, так и наземной связи.

5.1 Состав системы

На рисунке 3 показана блок-схема типичной системы спутникового контроля.



Report SM.2424-03

5.2 Методика измерения при контроле спутников ГСО

5.2.1 Измерение точности положения спутника

Согласно статье 22 раздела III и Приложению 30 Регламента радиосвязи (PP), космические станции на борту спутников ГСО, использующие любую полосу частот, распределенную фиксированной спутниковой службе или радиовещательной спутниковой службе, должны быть способны удерживать свою позицию в пределах $\pm 0,1^\circ$ относительно долготы их номинальных позиций. Однако космические станции радиовещательной спутниковой службы на геостационарных спутниках, работающие в полосе частот 11,7–12,7 ГГц, должны удерживать свою позицию в пределах $\pm 0,5^\circ$ относительно долготы их номинальных позиций.

Поэтому необходимо измерять текущую орбитальную позицию как минимум в течение 12 часов и сравнивать ее с номинальной орбитальной позицией спутника. Отклонения, превышающие указанные значения, регистрируются.

5.2.2 Измерение занятости спектра

Занятость спектра указывает фактическое использование ретранслятора или заданной полосы частот. Необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- навести антенну на спутник ГСО или орбитальную позицию;
- выполнить измерение сигнала в заданной полосе частот (см. пункт 4.2). Измерение сигналов выполняется автоматически системами контроля спутников ГСО;
- занести результат измерения в базу данных;
- при обращении к базе данных по мере необходимости можно рассчитывать занятость спектра в различных полосах частот в различные интервалы времени. Кроме того, если занятость спектра для какого-либо местоположения на орбите длительное время остается близкой к нулю, то это местоположение на орбите можно идентифицировать как незанятую орбитальную позицию, которую можно использовать для подачи заявки на регистрацию в МСЭ.

Если несколько спутников совместно используют одну и ту же орбитальную позицию, то бывает трудно отличить спектр одного спутника от спектра другого, за исключением случаев, когда известна поляризация и схема ретрансляторов каждого из них.

5.2.3 Обнаружение несанкционированных излучений

Для обнаружения несанкционированных и аномальных излучений на ретрансляторе или в заданной полосе частот производится автоматическое измерение параметров сигнала (как описано в пункте 4.2), которые непрерывно сравниваются с номинальными (ожидаемыми) параметрами.

В случае обнаружения несанкционированных излучений необходимо принять меры для определения характеристик внутренних параметров сигнала (см. пункт 4.3).

Кроме того, согласно статье 21 раздела V РР, измеренная п.п.м. ненадлежащего излучения сравнивается с пределом, установленным МСЭ, и номинальным пределом п.п.м., применяемым оператором спутника.

5.3 Методика измерения при контроле спутников НГСО

5.3.1 Идентификация спутников НГСО

Идентификация спутников НГСО необходима при измерении занятости полосы частот, осуществлении предпускового контроля и в целях подавления помех.

Существуют различные методы идентификации для разных условий. Возможны следующие сценарии:

- Известно время появления помех. Одним из признаков спутников НГСО служит доплеровский сдвиг; другой признак – повторное появление в одно и то же время суток. Пример: у клиента есть протокол случаев помех. Необходимо учитывать диаграмму направленности/излучения антенны, которая принимает помехи.
- Станция контроля может отслеживать неизвестный спутник и регистрировать время, азимутальный угол и угол места.
- Станция контроля может регистрировать нужную полосу частот с помощью всенаправленной антенны.

Методы идентификации

Следует учесть, что спутник не обязательно передает сигнал непрерывно.

Метод А. Параметры орбиты известны

- Предварительное условие: имеется полный набор параметров орбиты всех спутников.
- Программное обеспечение прогнозирует видимость (и углы наблюдения) в режиме реального времени.
- Сравнение с наблюдаемым объектом.

- Сокращение количества возможных спутников в результате повторения измерений.
- Использование параметров орбиты для управления антенной при дальнейших измерениях.

Метод В. Параметры орбиты определяются по углам наблюдения

- Предварительное условие: антенна находится в режиме автоматического отслеживания соответствующего сигнала.
- Регистрация углов азимута и места.
- Вычисление параметров орбиты (см. литературу).
- Прогнозирование пролетов спутника для дальнейших измерений.

Метод С. Сравнение времени наблюдения

- Предварительное условие: регистрация спектра с помощью всенаправленной антенны.
- Измерение разницы между моментами времени наибольшего приближения (ТСА).
- Нахождение совпадающего периода в базе данных.
- Получение значений TLE спутников с этим периодом.
- Расчет показателей видимости и сравнение времени видимости с временем наблюдения.
- Использование параметров орбиты для управления антенной при дальнейших измерениях.

Некоторые замечания по методу С

Спутники НГСО опоясывают земной шар, пока Земля вращается вокруг своей оси. Таким образом, наблюдатель (если только он не расположен вблизи оси вращения Земли) дважды проходит под орбитой спутника, причем один раз спутник приближается с севера, а второй раз – с юга. Чтобы получить более точное измерение, рекомендуется определить разницу между моментами времени пролета, которая составляет приблизительно 24 (48, 72...) часа, и разделить ее на число оборотов. Наилучший результат достигается, когда спутник движется в одном и том же направлении (север/юг) и обнаруживается под одинаковыми углами наблюдения.

Поскольку большинство спутников НГСО имеют низкую орбиту высотой от 160 до 2000 км (низкая околоземная орбита (LEO)), их период обращения составляет от 84 до 127 минут. Поэтому они видны много раз, когда наблюдатель проходит под орбитой. Это дает серию пролетов. В зависимости от широты, на которой находится наблюдатель, обе серии наблюдений (когда спутник приближается с севера и когда спутник приближается с юга) происходят через равные (если наблюдатель близок к экватору) или разные временные интервалы. Изменение временного интервала указывает на наклонение орбиты спутника. Например, если наблюдатель находится в Северном полушарии, а временной интервал при серии пролетов сначала уменьшается, а затем увеличивается, то наклонение орбиты спутника превышает 90 градусов.

Некоторые частоты используются совместно несколькими спутниками, обычно входящими в одну и ту же группировку. Пролеты должны соотноситься с одним спутником. Этого можно достичь путем идентификации групп пролетов с близкими интервалами времени.

Некоторые определения

Пролет: один проход спутника над приемной станцией от горизонта до горизонта.

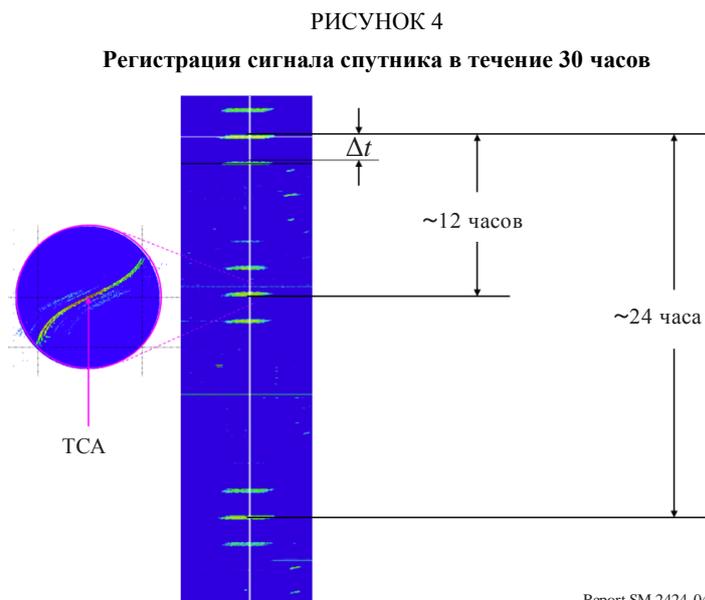
Серия пролетов: последовательные наблюдаемые обороты (орбиты) спутника.

Время наибольшего приближения (ТСА): доплеровский сдвиг делает видимые пролеты зигзагообразными кривыми. В момент наибольшего приближения скорость спутника относительно станции контроля равна нулю. Это точка перегиба кривой. В это время частота приема соответствует частоте передачи.

Δt : разница во времени между двумя пролетами.

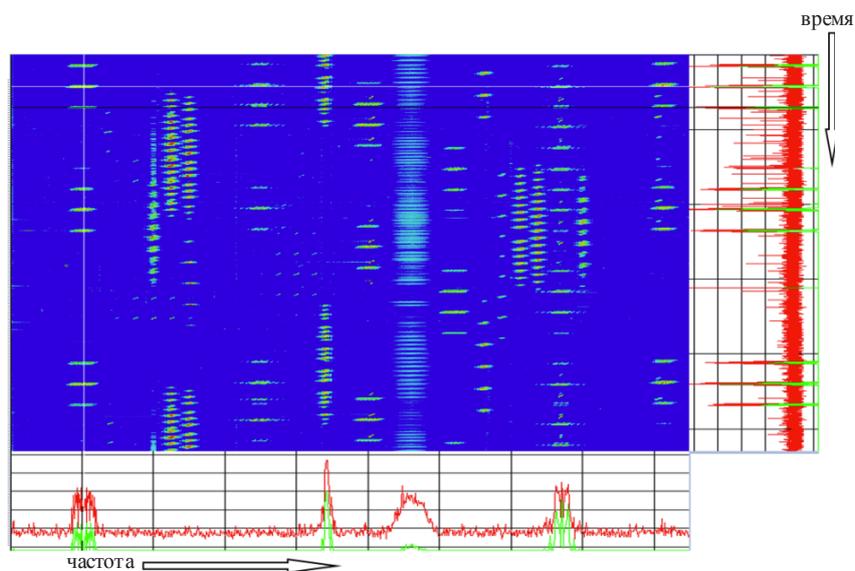
Через ~ 12 часов после серии пролетов спутник проходит над наблюдателем в противоположном направлении (север/юг).

Через ~ 24 часа после серии пролетов спутник проходит над наблюдателем в том же направлении (север/юг).



Регистрация спектра (регистрация полосы частот): система регистрации, позволяющая отображать спектр в течение продолжительного периода времени (спектрограмма или каскадная диаграмма) с временем хранения не менее 48 часов, временным разрешением порядка секунд и частотным разрешением, достаточным для обнаружения ТСА в доплеровских кривых.

РИСУНОК 5
Пример регистрации спектра



5.3.2 Определение орбитальной позиции

Траектория движения спутника НГСО рассчитывается и отображается в географических координатах (подспутниковая точка и высота – также может определяться в координатах хуз с началом в центре Земли) или на астрономической сетке. Это может быть выполнено посредством моноимпульсного отслеживания в течение 24-часового периода или с использованием оптических средств.

5.3.3 Измерение кривой п.п.м. несущей

Время приема сигнала спутника НГСО можно предсказать с помощью эфемерид спутника. По этим данным антенна земной станции может отслеживать спутник и автоматически измерять кривую п.п.м. Результаты измерений сохраняются в базе данных и отображаются графически.

6 Разрешение проблемы помех

Прозрачные спутниковые ретрансляторы восприимчивы к преднамеренным и непреднамеренным источникам помех на линиях вверх и вниз. Непреднамеренные помехи обычно вызваны одной из следующих причин:

- ненадлежащее использование лицензированной спутниковой службы:
 - ошибка оператора;
 - неисправность оборудования;
 - кросс-поляризационные помехи;
- помехи от соседних спутников.

Преднамеренные помехи могут быть вызваны преднамеренной перегрузкой в политических или преступных целях, а также нелегальными земными станциями, незаконно занявшими неиспользуемые спутниковые частоты, что вызывает ухудшение качества или прерывание предоставления лицензированных услуг. Поэтому геолокация и исследование спутниковых помех чрезвычайно важны.

6.1 Типы помех

Для помех каждого типа имеются свои предпочтительные методы измерения, обусловленные различными характеристиками сигнала. В связи с этим система геолокации спутников должна работать с мешающими сигналами различных типов:

- непрерывная волна (CW);
- цифровой модулированный сигнал;
- аналоговый модулированный сигнал;
- TDMA/FDMA/CDMA;
- сигнал пакетного типа;
- импульсный сигнал;
- сигнал с качанием частоты;
- сигнал с расширением спектра;
- импульсный сигнал РЛС.

Например, для геолокации по сигналу CW необходимы только измерения FDOA. Однако в случае помех TDMA необходимо выполнить дополнительные параметрические измерения, чтобы определить количество работающих станций и временной интервал работы каждой станции заранее, до начала геолокации.

6.2 Принципы геолокации

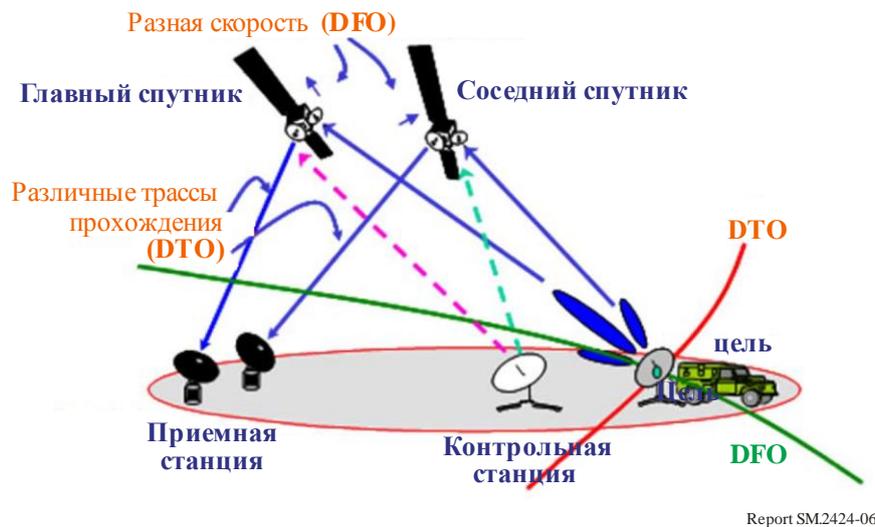
6.2.1 Геолокация земных передатчиков с использованием двух спутников ГСО

6.2.1.1 Принцип измерения

Наиболее широко распространенный метод геолокации земных передатчиков основан на измерениях TDOA и FDOA с помощью двух спутников ГСО. Суть этого метода представлена на рисунке 6.

РИСУНОК 6

Угловой разнос между главным и соседним спутниками в зависимости от полосы частот линии вверх и размера антенны



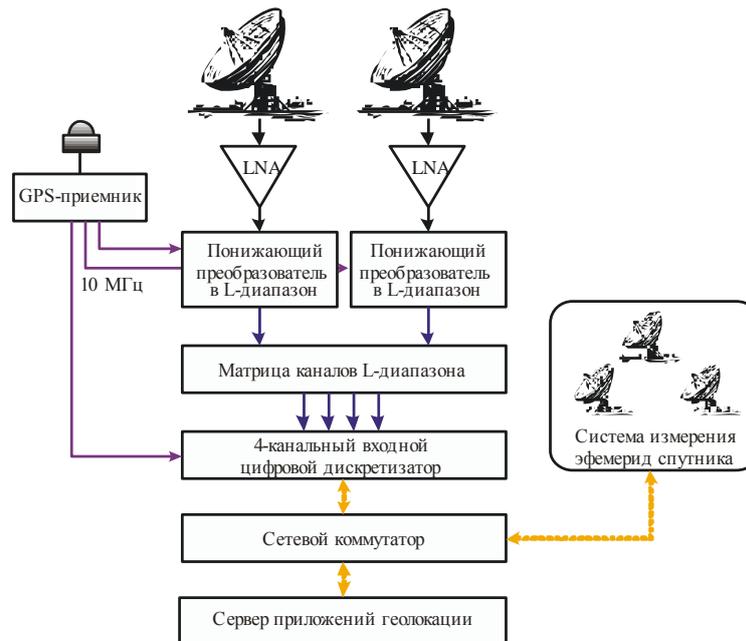
В этом примере главный спутник является спутником, подвергающимся воздействию помех (испытывающим помехи). Соседний спутник расположен вблизи главного спутника, так что его ретрансляторы можно использовать для измерения помех от боковых лепестков. Измерение TDOA дает разницу во времени между мешающим сигналом, поступающим на два наземных приемника, осуществляющих мониторинг с помощью главного спутника и соседнего спутника. Измерение FDOA дает разность частот мешающего сигнала, поступающего на два приемника отдельно через эти два спутника. Пересечение линий TDOA и FDOA обычно представляется эллиптической областью, которая соответствует области вероятного местонахождения несанкционированного передатчика.

6.2.1.2 Типичная геолокационная система с использованием двух спутников ГСО

Типичная конфигурация геолокационной системы с использованием двух спутников ГСО состоит из двух приемных РЧ-цепей, цифровых дискретизаторов сигналов и сервера приложений геолокации. В РЧ-цепи может использоваться малошумящий усилитель (LNA) + понижающий преобразователь или малошумящий блок понижающего преобразователя (LNB), как показано на рисунке 7.

РИСУНОК 7

Пример схемы геолокационной системы с двумя спутниками



Report SM.2424-07

6.2.2 Геолокация земных передатчиков с использованием трех спутников ГСО

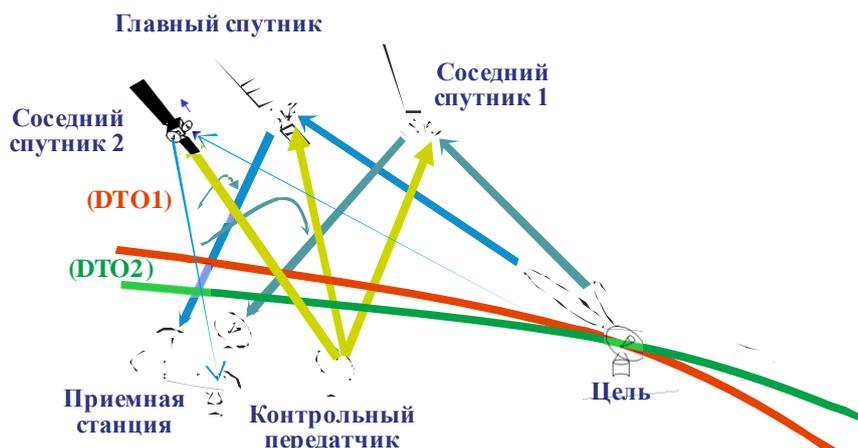
6.2.2.1 Описание задачи

Одним из недостатков метода геолокации с использованием двух спутников ГСО является неопределенность линии FDOA, которая может флуктуировать вверх и вниз, особенно в случае неточных эфемерид. Такая флуктуация приводит к низкой точности. Использование данных измерений нескольких известных опорных станций уменьшит влияние неточных эфемерид, однако не может устранить его полностью.

Для достижения более точного результата был разработан метод геолокации с использованием трех спутников ГСО на основе измерений TDOA. Однако на практике могут возникнуть трудности, связанные с поиском двух подходящих соседних спутников для реализации этого метода. Суть этого метода представлена на рисунке 8.

РИСУНОК 8

Концепция систем геолокации по трем спутникам с использованием алгоритма TDOA/TDOA



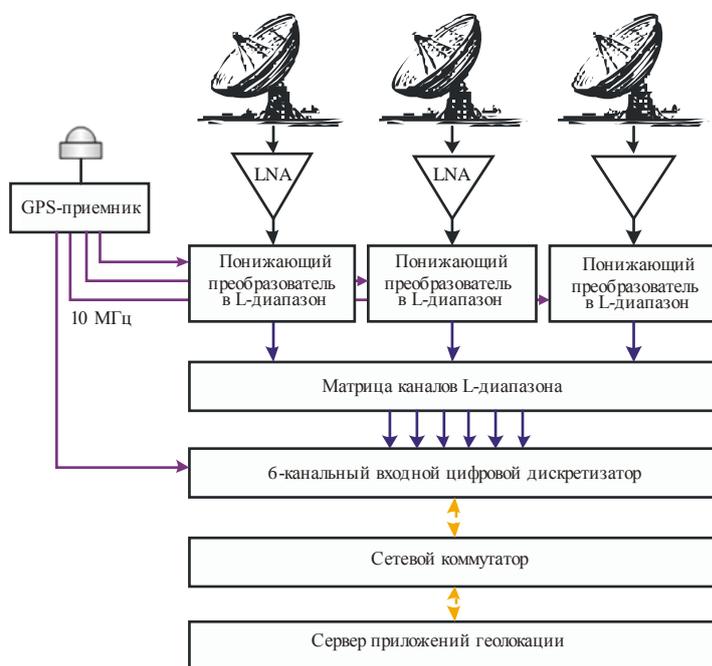
Report SM.2424-08

6.2.2.2 Типичная геолокационная система с использованием трех спутников ГСО

Типичная конфигурация геолокационной системы с использованием трех спутников ГСО весьма похожа на геолокационную систему с использованием двух спутников ГСО. Эта система состоит из трех приемных РЧ-цепей, цифровых дискретизаторов сигналов и сервера приложений геолокации. В РЧ-цепи может использоваться малошумящий усилитель (LNA) + понижающий преобразователь или малошумящий блок понижающего преобразователя (LNB), как показано на рисунке 9.

РИСУНОК 9

Пример схемы геолокационной системы с тремя спутниками



Report SM.2424-09

6.2.3 Геолокация земных передатчиков с использованием одного спутника ГСО

6.2.3.1 Описание задачи

Как уже было сказано в пунктах 6.2.1 и 6.2.2, в настоящее время существуют коммерческие геолокационные системы разных производителей. Основным недостатком их принципов геолокации является необходимость иметь по меньшей мере один соседний спутник достаточно близко, чтобы получить достаточную энергию перекрестных помех для выполнения расчетов.

Несмотря на наличие у основных операторов нескольких сотен спутников ГСО, некоторые из них все еще "изолированы", то есть ближайший соседний спутник отстоит более чем на 10 градусов. В этом случае перекрестные помехи могут оказаться слишком малы для измерения.

Даже если соседний спутник имеется, он может оказаться бесполезным для геолокации, если недоступны его точные эфемериды. Один из основных параметров, которые должны быть известны геолокационной системе, – точное положение и скорость как главного, так и соседнего спутника. Качество этих параметров оказывает значительное влияние на точность геолокационных систем. Кроме того, если соседний спутник находится под управлением другого спутникового оператора, то данные эфемерид часто неизвестны или известны лишь с грубой точностью, что обесценивает результат геолокации.

Эфемериды спутника можно рассчитать с помощью системы определения орбиты. При этом одним из предварительных условий успешного измерения является наличие опорных станций. Для расчета эфемерид с достаточной точностью необходимы по меньшей мере три-четыре опорные станции. Это кажется легко достижимым, однако на самом деле во многих случаях геолокация не может быть выполнена, поскольку операторы часто не знают, какой опорный сигнал излучает та или иная станция.

Если же оба условия выполнены, то следующее препятствие связано с сигналом перекрестных помех на соседнем спутнике. Сигнал перекрестных помех должен находиться в том же диапазоне частот и иметь ту же поляризацию, что и мешающий сигнал на главном спутнике (испытываемом помехи). Принимая во внимание все три условия, получим множество сценариев, в которых успешная геолокация с использованием имеющихся в настоящее время инструментов и алгоритмов невозможна. Поэтому метод геолокации с использованием мешающего сигнала и опорного сигнала от одного спутника дал бы большое преимущество.

6.2.3.2 Метод геолокации с использованием одного спутника ГСО и обратного доплеровского смещения

В разделе 5.1.2.8 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра (издание 2011 года) описан возможный метод геолокации несанкционированного земного передатчика с использованием одного спутника ГСО. Недостатком этого подхода является присущая ему чувствительность к колебаниям частоты, вызванным самим оборудованием станции контроля линии вверх (например, источниками частот и оборудованием с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), подверженными влиянию изменения температуры, и т. п.), которые могут достигать или превышать типичный диапазон доплеровского смещения для спутников ГСО.

Опыт эксплуатации коммерческих геолокационных систем, использующих этот метод, показал, что наилучшая достижимая точность геолокации не превышает 100 км, так что он фактически непригоден для идентификации станции несанкционированного передатчика на линии вверх. Этот метод может работать с приемлемой точностью, когда мешающий сигнал поступает через спутник с наклонной орбитой, который показывает лучшую динамику по сравнению с обычными спутниками ГСО, что приводит к большему доплеровскому смещению.

6.2.3.3 Метод геолокации с использованием одного спутника ГСО и корреляции с известными земными передатчиками

Этот метод основан на том, что мощность сигнала спутника, который передается на спутник с определенной земной станции на линии вверх, а затем на приемную станцию, изменяется со временем под действием ряда факторов, как показано на рисунке 10. Эти факторы включают:

- движение спутника;
- атмосферные и погодные условия (на линии вверх и линии вниз);
- изменения коэффициента усиления мощности и выравнивания антенны станции на линии вверх.

РИСУНОК 10

Концепция системы геолокации с одним спутником и использованием корреляции с известными передатчиками



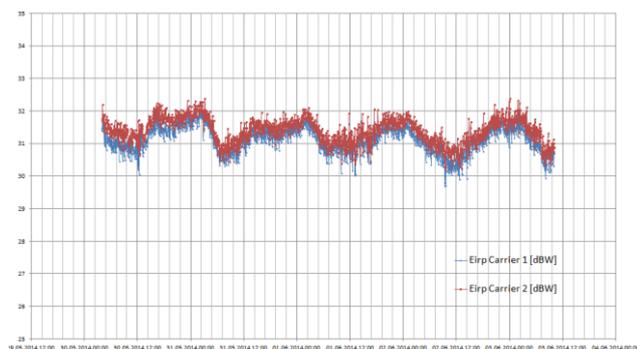
Report SM.2424-10

Можно предположить, что сигналы, передаваемые с одной и той же станции линии вверх или из одной и той же географической области, будут демонстрировать одни и те же изменения мощности в течение

одного и того же временного интервала, тогда как сигналы, передаваемые из разных географических областей, будут демонстрировать разные изменения мощности в течение того же интервала времени.

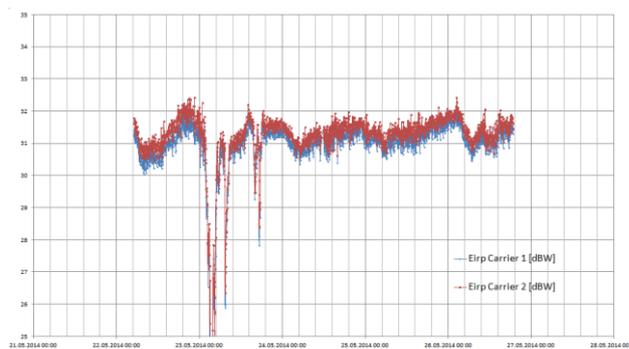
На рисунке 11 показаны колебания мощности двух сигналов (показаны красным и синим цветами), передаваемых с одной и той же станции линии вверх в течение четырех дней. Можно четко идентифицировать колебания с 24-часовым циклом, возникающие в результате движения спутника. На рисунке 12 показаны изменения мощности, вызванные погодными условиями (большие всплески в данных). В обоих случаях изменения мощности почти идентичны, поскольку оба сигнала передаются одной и той же антенной на линии вверх.

РИСУНОК 11

24-часовые колебания мощности, вызванные движением спутника

Report SM.2424-11

РИСУНОК 12

Колебания мощности, вызванные влиянием погодных условий

Report SM.2424-12

Для того чтобы локализовать мешающий сигнал с помощью этого метода, необходимо выявить сходство между мешающим сигналом и другими известными сигналами. Обычно это делается в частотной области по корреляции сигналов или их частей. Поэтому с точки зрения точности, эффективности и успеха геолокации с использованием этого метода наиболее важную роль играет алгоритм корреляции.

Эта концепция применима, когда с одной и той же станции линии вверх или в той же географической области, где находится источник помех, передается много разных сигналов. Все сигналы из этой области (включая мешающий) можно контролировать в течение длительного времени с помощью системы контроля несущей, а измеренные колебания мешающего сигнала по мощности, частоте или полосе пропускания (например, вызванные воздействием погодных условий) можно сопоставить с сигналами других (предполагаемых) локальных передатчиков. В случае положительной корреляции можно определить, что местоположение передатчика – источника помех на линии вверх идентично или близко к местоположению коррелирующего передатчика.

Суть этого метода заключается в корреляционном подходе и стратегии контроля, поскольку измерения, как правило, не выполняются точно в одно и то же время (например, синхронно, а не циклически). Это существенно влияет на возможность получения значимых результатов корреляции, для которых требуются более синхронные параметрические измерения. Для определения корреляции несинхронных измерений необходимо исследовать влияние взвешивания в зависимости от смещения по времени, проверки правдоподобия, смягчения негативных последствий неточностей и т. д. Кроме того, этот метод можно улучшить, рассматривая такие факторы, как информация, относящаяся к оборудованию известных передающих станций, информация о погоде из независимых источников и т. д. Например, информацию о погоде можно использовать для дополнительного смягчения негативных последствий неточностей путем выявления и устранения случаев, противоречащих определенным погодным условиям.

6.3 Требования к системе геолокации

6.3.1 Спутник

При методах геолокации с использованием нескольких спутников главный и соседние спутники не должны располагаться слишком близко (что затруднит измерение TDOA) и слишком далеко (чтобы

сигнал на соседнем спутнике не был слишком слабым для обнаружения), а сигнал перекрестных помех у соседнего спутника должен находиться в том же диапазоне частот при той же поляризации, что и мешающий сигнал у главного спутника. Для точной геолокации необходимы данные эфемерид этих спутников. Рекомендуемый угловой разнос между главным и соседним спутниками показан в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Угловой разнос между главным и соседним спутниками в зависимости от диапазона частот линии вверх и размера антенны

Размер антенны (м)	Диапазон С 6 ГГц	Диапазон X 8 ГГц	Диапазон Ku 14 ГГц	Диапазон Ka 27,5 ГГц	Диапазон Ka 31 ГГц
1,2	<15°	<15°	<15°	<10°	<9°
3	<15°	<15°	<15°	<10°	<8°
4,5	<13°	<13°	<12°	<8°	<7°
7,3	<12°	<11°	<10°	<7°	<5°
9	<10°	<10°	<10°	<6°	<3°
16	<10°	<9°	<8°	<3°	
32	<10°	<7°	<3°		

При отсутствии эфемерид высокой точности главный и соседний спутники не должны находиться на одной и той же орбите.

6.3.2 Приемная станция

Покрывание лучей ретрансляторов главного спутника и соседних спутников должно одновременно охватывать как передающую, так и приемную станции. Кроме того, геолокационная система должна иметь достаточно высокие характеристики пропускной способности РЧ-тракта, системы сбора данных, программного обеспечения и т. д.

6.3.3 Эталонный передатчик

Эталонный передатчик линии вверх используется для излучения опорного сигнала в известном положении (точные значения широты, долготы и высоты), а также с известными параметрами (частота, полоса пропускания, поляризация) в направлении главного и соседних спутников. Опорный сигнал обычно представляет собой модулированный сигнал, но предпочтительно, чтобы это был сигнал с расширением спектра.

Опорный сигнал можно использовать для устранения собственной погрешности при измерении TDOA и FDOA, такой как погрешность дрейфа локального генератора ретранслятора или погрешность эфемерид спутников. Если эфемериды спутников недостаточно точны (загружены из интернета), то для получения точного результата геолокации рекомендуется использовать от трех до пяти опорных сигналов.

6.4 Методы геолокации передатчика на Земле

Для того чтобы выполнять трудные сценарии проведения измерений, рекомендуется улучшить характеристики геолокационной системы и использовать описанные ниже методы.

6.4.1 Метод исключения несущей

В некоторых случаях сильный сигнал на соседнем спутнике может подавлять помехи от боковых лепестков, так что измерения геолокации могут оказаться неудачными или может быть получен неправильный результат геолокации. Технология исключения несущей позволяет устранить влияние таких сильных сигналов на соседнем спутнике. Эта технология применяется следующим образом:

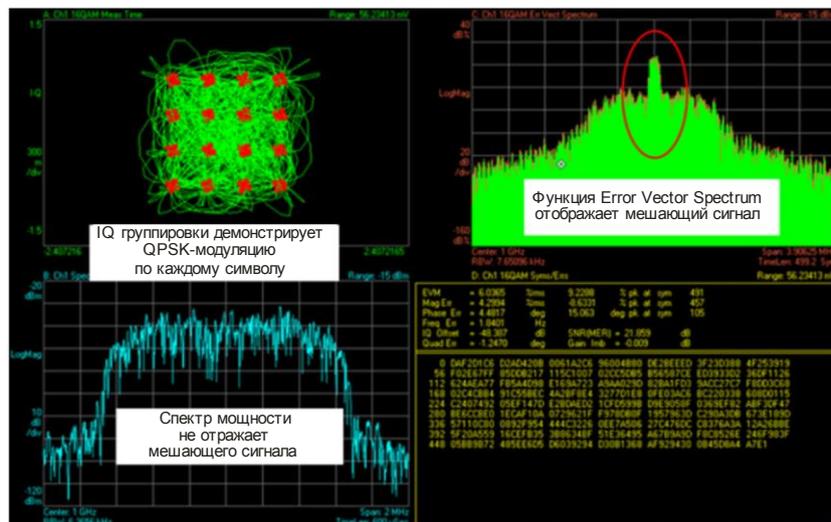
- измеряются и анализируются параметры исходной несущей на соседнем спутнике: частота, полоса пропускания, тип модуляции, скорость передачи символов и т. п;

- воссоздается несущая, аналогичная исходной;
- исходная несущая вычитается из воссозданной, а затем в максимально возможной степени исключается из данных выборки.

Этот процесс также можно реализовать с помощью программного обеспечения Vector Signal Analysis и его функции вычисления временной характеристики Error Vector Magnitude с использованием записи данных IQ сильного сигнала в соседнем канале. Запись загружается в программное обеспечение VSA; вводятся параметры модуляции сильного сигнала, включая формат модуляции, скорость передачи символов и тип фильтра, как показано на рисунке 13. Затем можно использовать спектр EVM для просмотра спектра мешающего сигнала и формы волны EVM во временной области, используемой для воссоздания сигнала.

РИСУНОК 13

Программное обеспечение, использующее метод исключения несущей



Report SM.2424-13

6.4.2 Метод обработки с большим коэффициентом усиления

Если соседний спутник находится далеко от главного, то энергия перекрестных помех будет слишком слабой для обнаружения, что приведет к ошибке геолокации. Решением в этой ситуации служит повышение коэффициента усиления системы и, следовательно, улучшение ее способности к извлечению слабых сигналов и увеличение расстояния между главным и соседним спутниками.

Этот метод реализуется путем увеличения времени интегрирования и ширины полосы измерения геолокационной системы.

6.4.3 Метод определения подвижности

Линия TDOA связана с расстоянием от передатчика до главного спутника и соседнего спутника. Когда передатчик перемещается по земной поверхности, линия TDOA существенно изменяется. Если передатчик неподвижен, то линия TDOA изменяется лишь в пределах нескольких километров. Таким образом, линию TDOA можно использовать для оценки подвижности передатчиков, наблюдая за ней в течение длительного времени.

6.5 Факторы, влияющие на точность геолокации

Точность результата геолокации в значительной мере зависит от следующих факторов.

- Точность эфемерид спутника
Трехмерные данные о местоположении и скорости спутника считаются известными параметрами в алгоритмах геолокации и соответствующих уравнениях. Погрешность эфемерид спутника непосредственно влияет на точность определения местоположения и является основным фактором, вызывающим ошибку.

- Точность определения местоположения опорных станций
Опорные станции играют важную роль в исправлении ошибок эфемерид и собственных ошибок системы; точность определения положения опорной станции в значительной степени влияет на точность результата геолокации.
- Расположение опорных станций
Географическая конфигурация опорных станций также влияет на исправление ошибок эфемерид и собственных ошибок системы. Одна из опорных станций, как правило, должна располагаться вблизи несанкционированного передатчика, а остальные размещаются вокруг нее с широким разнесом.
- Время геолокации
Из-за возмущений положения спутника трудно точно измерить небольшую разницу радиальных скоростей спутников по отношению к каждой станции линии вверх, поэтому в течение двух периодов за сутки точность определения местоположения будет низкой.
- Задержка
Поскольку сигнал спутника проходит через тропосферу, ионосферу, приемный канал и оборудование, на точность результата геолокации влияют отклонения коррекции задержки.

7 Выявление несанкционированных передатчиков

Геолокационные измерения с использованием спутников дают оценку местоположения излучателя в области, которая может охватывать от десятков до сотен квадратных километров. Для выявления и определения местоположения несанкционированного передатчика в этой области необходимо развернуть подвижные станции контроля. В этом разделе описываются такие подвижные системы и способы выявления и подавления помех.

7.1 Состав подвижной системы контроля

Для выявления и определения местоположения несанкционированных передатчиков с использованием подвижных систем контроля необходимо следующее передвижное оборудование:

- платформы контроля:
 - наземная платформа контроля, такая как передвижное средство контроля;
 - воздушная платформа контроля, такая как БПЛА, дирижабль, привязной и свободный аэростат;
- портативный анализатор спектра;
- направленная и всенаправленная антенны;
- LNA, LNB, соответствующие полосовые фильтры;
- РЧ-кабели с низким коэффициентом потерь;
- GPS-приемник, компас;
- устройство передачи данных и устройство дистанционного управления, если требуется передача данных.

7.2 Методы наземного поиска

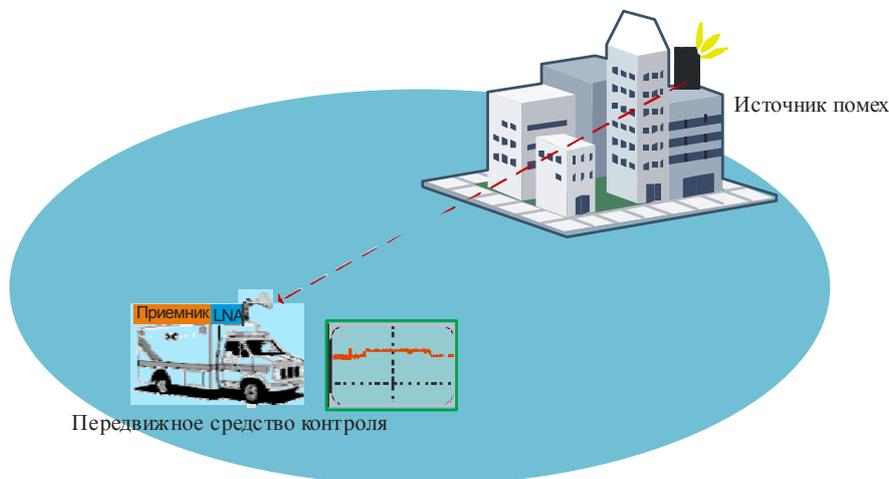
7.2.1 Традиционные подходы, основанные на сравнении амплитуды

Традиционный подход к поиску наземных передатчиков начинается с области, определенной системой геолокации, и включает в себя наведение на сигнал путем нескольких измерений POA с разных точек с постепенным сужением области до тех пор, пока несанкционированный передатчик не будет обнаружен. Недостатком этого метода является то, что путь распространения радиоволн в большой мере зависит от сложной электромагнитной обстановки, так что может потребоваться дополнительное время для нахождения лучших мест, позволяющих получить линию прямой

видимости в целях поиска источника сигнала. Кроме того, определение местоположения несанкционированных передатчиков значительно усложняется при использовании более высоких полос частот. Этот вопрос рассматривается в пункте 5.4.5.3.2 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра (издание 2011 года). Традиционный подход, основанный на сравнении амплитуды, иллюстрируется на рисунке 14.

РИСУНОК 14

Метод поиска источника помех на основе сравнения амплитуды



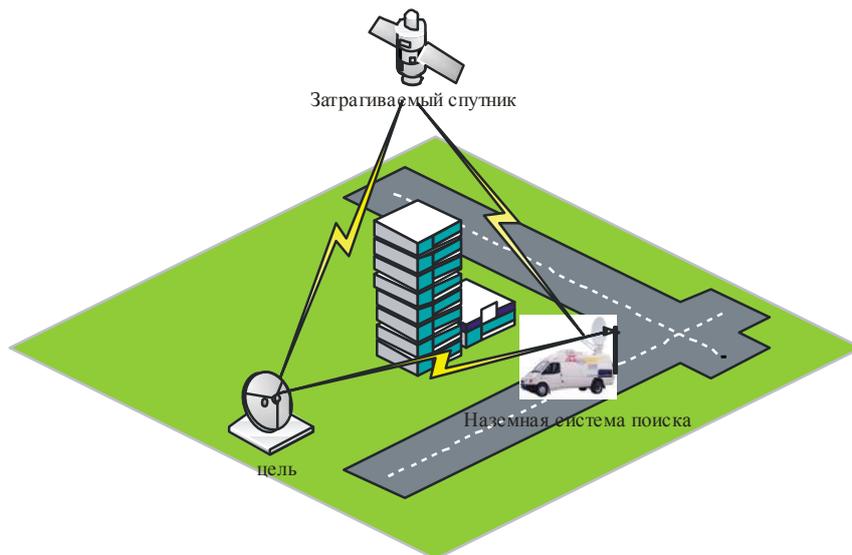
Report SM2424-14

7.2.2 Использование алгоритмов кросс-корреляции для повышения чувствительности системы

Метод определения местоположения на основе совместного приема сигналов со спутников и с наземных станций с использованием алгоритмов кросс-корреляции иллюстрируется на рисунке 15. Приемная антенна, фиксированная или смонтированная на транспортном средстве и направленная на спутник, испытывающий помехи, установлена так, чтобы принимать главный лепесток диаграммы направленности мешающего излучения на частоте линии вниз. В то же время передвижная или установленная на транспортном средстве направленная антенна принимает боковой лепесток диаграммы направленности мешающего излучения на частоте линии вверх. Эти два сигнала собираются и синхронно передаются по беспроводной сети для измерения кросс-корреляции на основе функции взаимной неопределенности. Если в результате имеет место пик корреляции, это означает, что целевой излучатель расположен относительно близко, а максимальный пик указывает направление на источник помех. Этот вопрос изложен в пункте 5.4.5.3.3 Справочника МСЭ по контролю за использованием спектра (издание 2011 года).

РИСУНОК 15

Наземный поиск в объединенной системе определения местоположения спутников и наземных станций с использованием алгоритмов кросс-корреляции



Report SM2424-15

7.3.3 Использование подхода на основе воздушного контроля для быстрого обнаружения помех

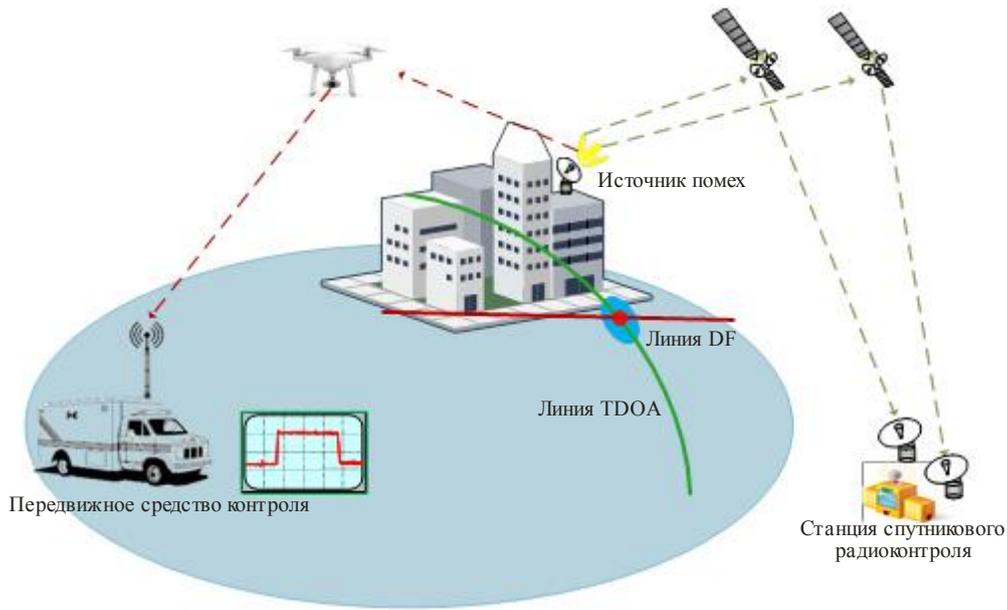
Передающая антенна направлена на спутник, а приемник сигнала расположен на земной поверхности, так что боковой лепесток диаграммы направленности сигнала довольно слабый и обнаружить его трудно. Кроме того, большинство источников помех находятся в городской местности и сигнал, вероятно, будет заблокирован зданиями. Поэтому наземный поиск с применением методов, описанных в пунктах 7.3.1 и 7.3.2, занимает много времени.

Для решения проблемы поиска на "последней миле" предлагается поиск источников помех для спутника с применением БПЛА, когда преимущество высоты БПЛА используется для увеличения видимого горизонта, устранения препятствий или зданий на пути сигнала и повышения принимаемой мощности (приемная антенна близка к главному лепестку диаграммы направленности мешающего сигнала) и, следовательно, повышения вероятности успешной радиопеленгации. Комбинация результатов геолокации и радиопеленгации может быть эффективным и практичным способом приближения к источнику помех, как показано на рисунке 16.

Результат геолокации можно использовать в качестве априорной информации. Можно провести линию TDOA, так как она достаточно стабильна и точна. БПЛА осуществляет радиопеленгацию мешающего сигнала посредством механического сканирования, что дает линию DF. Пересечение линий TDOA и DF указывает положение источника помех. Аппаратура БПЛА выполняет радиопеленгацию путем сравнения амплитуды с использованием направленной антенны.

РИСУНОК 16

Метод поиска источника помех с помощью БПЛА по линиям TDOA и DF



Report SM2424-16

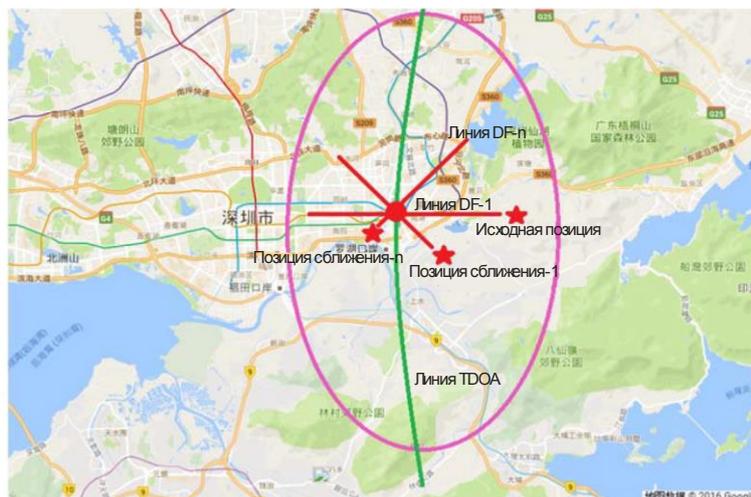
Основываясь на том, что линия TDOA является точной и направлена с севера на юг, а большой угол между линией TDOA и линией DF обеспечивает более высокую точность определения местоположения, можно разработать следующую процедуру поиска.

По завершении геолокации следует прибыть в область, указанную в результате геолокации, и развернуть там БПЛА к востоку или западу от линии TDOA. Выполнить радиопеленгацию и получить возможное положение источника помех на пересечении линий DF и TDOA. Затем отрегулировать положение БПЛА, так чтобы получить другую линию DF, с меньшей погрешностью радиопеленгации. После этого несколько раз отрегулировать положение БПЛА, постепенно приближаясь к фактическому положению источника помех.

Процедура поиска иллюстрируется на рисунке 17. Эллипсом обведен результат геолокации, указывающий область, в которой может находиться источник помех; зеленая линия – линия TDOA, проведенная в соответствии с результатом геолокации; красные звездочки – позиции БПЛА; красные линии – результаты построения линий DF по данным, полученным от БПЛА; красная точка в центре – положение источника помех.

РИСУНОК 17

Процедура поиска источника помех



Report SM.2424-17

Приложение 1

Категории станций спутникового контроля

При рассмотрении различных сценариев контроля следует учитывать гибкую эксплуатацию и развертывание систем контроля разного типа.

Фиксированные системы контроля жизненно важны для станций контроля, особенно для контроля спутников с глобальным и региональным лучом и для геолокации передатчиков на Земле. Нефиксированные системы контроля необходимы для контроля спутников со сфокусированным лучом, радиопеленгации и проверки электромагнитной обстановки, а также служат вспомогательным средством геолокационной системы.

A1.1 Фиксированная станция контроля

Фиксированная система контроля играет важную роль в обеспечении того, чтобы станции спутникового контроля удовлетворяли требованиям к проведению измерений Регламента радиосвязи. Фиксированную систему контроля рекомендуется устанавливать в месте, соответствующем требованиям "чистой" электромагнитной среды, чтобы обеспечить оптимальные рабочие характеристики при приеме спутникового сигнала, а также при проведении дальнейших измерений и анализа.

От размера антенны зависит ее коэффициент усиления, поэтому она должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить качественный прием сигнала. Для схем модуляции более высокого порядка требуются более высокие значения отношения C/N . Чтобы обеспечить согласованность результатов измерений в долгосрочной перспективе, следует регулярно проверять потери при передаче, поскольку это является одной из важнейших задач по обслуживанию системы.

A1.2 Передвижная станция контроля

Передвижная система контроля дополняет фиксированную систему. Она монтируется на передвижных средствах контроля или временно устанавливается за пределами охвата луча фиксированной системы контроля. Эта система обычно используется для измерения спутникового сигнала вдоль национальных границ, вблизи гаваней и вокруг важных районов во время проведения крупных мероприятий.

Кроме того, спутники со сфокусированным лучом имеют малый охват луча (всего сотни километров), так что передвижная система контроля будет незаменимой.

A1.3 Подвижная станция контроля

Подвижная система контроля устанавливается и эксплуатируется на передвижных средствах контроля, находящихся в движении или в расположенных в фиксированных местах. Она используется для контроля спектра, поиска источника сигнала путем наведения и радиопеленгации источников помех и других передатчиков, представляющих интерес, а также для проверки электромагнитной обстановки в определенных местах во время проведения крупных мероприятий.

A1.4 Воздушная станция контроля

Воздушная система контроля дополняет подвижную систему контроля и используется для быстрого контроля спектра и радиопеленгации с использованием БПЛА или аэростата. Система позволяет легко исключить нежелательные потери при распространении, вызванные наземными препятствиями, и иметь дело только с потерями распространения по линии прямой видимости. Тем не менее неправильная эксплуатация БПЛА может вызвать проблемы, связанные с обеспечением безопасности летающих объектов, таких как самолеты, поэтому настоятельно рекомендуется соблюдать соответствующие законы и положения по эксплуатации БПЛА.

A1.5 Портативная станция контроля

Портативная система контроля удобна и полезна при радиопеленгации источников помех или передатчиков, представляющих интерес, в процессе контроля на "последней миле". Система состоит как минимум из всенаправленной антенны, направленной антенны, LNA (или LNB) и анализатора спектра.

Приложение 2

Форматы данных эфемерид спутников

A2.1 Формат TLE

Формат TLE представляет собой набор из двух строк данных, в которых перечислены элементы орбиты, указывающие время, координацию, положение и скорость объекта на земной орбите с шестью элементами Кеплера. Представление данных TLE относится к упрощенным моделям возмущений (SGP, SGP4, SDP4, SGP8 и SDP8), поэтому любой алгоритм, использующий TLE в качестве источника данных, должен реализовывать одну из упрощенных моделей возмущений, чтобы правильно вычислять состояние объекта в нужный момент времени.

Сеть станций наблюдения за космическим пространством Соединенных Штатов отслеживает все обнаруживаемые объекты на земной орбите и создает соответствующий TLE для каждого объекта, делая TLE несекретных объектов общедоступными на спонсируемом веб-сайте Space Track. Формат TLE является стандартом де-факто распределения орбитальных элементов объектов, находящихся на земной орбите.

Набор TLE может содержать строку заголовка, предшествующую элементам данных. Заголовок не обязателен, поскольку каждая строка данных содержит уникальный код идентификатора объекта.

Формат TLE выглядит следующим образом:

ISS (ZARYA)

1 25544U98067A 08264,51782528 -0,00002182 00000-0 -11606-4 0 2927

2 25544 51,6416 247,4627 0006703 130,5360 325,0288 15,72125391563537

ТАБЛИЦА A2-1

Описание TLE

Номер п/п	Номер символа	Описание	Пример
Строка 1			
1-1	1	Номер строки элемента данных	1
1-2	2	Пробел	
1-3	3~7	Номер спутника	25544
1-4	8	Секретность (U = несекретный)	U
1-5	9	Пробел	
1-6	10~11	Международный указатель (последние две цифры года запуска)	98
1-7	12~14	Международный указатель (номер запуска в указанный год)	067
1-8	15~17	Международный указатель (блок запуска)	A
1-9	18	Пробел	

ТАБЛИЦА А2-1 (окончание)

Номер п/п	Номер символа	Описание	Пример
1-10	19~20	Год эпохи (последние две цифры года)	08
1-11	21~32	Эпоха (день года и дробная часть суток)	264,51782528
1-12	33	Пробел	
1-13	34~43	Первая производная по времени среднего движения, деленная на два	-0,00002182
1-14	44	Пробел	
1-15	45~52	Вторая производная по времени среднего движения, деленная на шесть (подразумевается, что число начинается с десятичной точки)	00000-0
1-16	53	Пробел	
1-17	54~61	BSTAR коэффициент торможения (подразумевается, что число начинается с десятичной точки)	-11606-4
1-18	62	Пробел	
1-19	63	Число 0 (первоначально предполагался "тип эфемерид")	0
1-20	64	Пробел	
1-21	65~68	Номер набора элементов. Нарастивается при создании нового набора TLE для этого объекта	292
1-22	69	Контрольная сумма (по модулю 10) (буквы, пробелы, точки, знаки плюс = 0, знаки минус = 1)	7
Строка 2			
2-1	1	Номер строки	2
2-2	2	Пробел	
2-3	3~7	Номер спутника	25544
2-4	8	Пробел	
2-5	9~16	Наклонение (в градусах)	51,6416
2-6	17	Пробел	
2-7	18~25	Прямое восхождение восходящего узла (в градусах)	247,4627
2-8	26	Пробел	
2-9	27~33	Эксцентриситет (подразумевается, что число начинается с десятичной точки)	0006703
2-10	34	Пробел	
2-11	35~42	Аргумент перигея (в градусах)	130,5360
2-12	43	Пробел	
2-13	44~51	Средняя аномалия (в градусах)	325,0288
2-14	52	Пробел	
2-15	53~63	Среднее движение [оборотов в сутки]	15,72125391
2-16	64~68	Число оборотов на момент эпохи [оборотов]	56353
2-17	69	Контрольная сумма (по модулю 10)	7

Приложение 3

Контроль помех, создаваемых спутниками в полосах частот, распределенных радиоастрономической службе на первичной основе

А3.1 Введение

Для того чтобы антенну можно было использовать для измерения помех после запуска, предусматривается наличие возможности слежения за спутником, достаточного усиления (обычно 40 дБи) и приемников с относительно низким уровнем шума. Поскольку в Рекомендации МСЭ-R RA.769 указаны пороговые значения для бокового лепестка с усилением 0 дБи, а не для главного луча, система контроля с этими параметрами может обеспечить быстрое обнаружение мешающих сигналов с адекватным отношением помеха/шум. Во избежание появления нежелательных артефактов траасса сигнала приемника должна быть высоколинейной.

Процесс сбора данных описан в пункте А3.2. Необходимые уровни сигнала и пороговые значения указаны в пункте А3.3. Антенна контроля должна быть хорошо откалибрована с использованием сильных небесных источников радиоизлучения с известной SPDF. Эта процедура описана в пункте А3.4. Наконец, процедура идентификации RFI описана в пункте А3.5.

А3.2 Процесс сбора данных

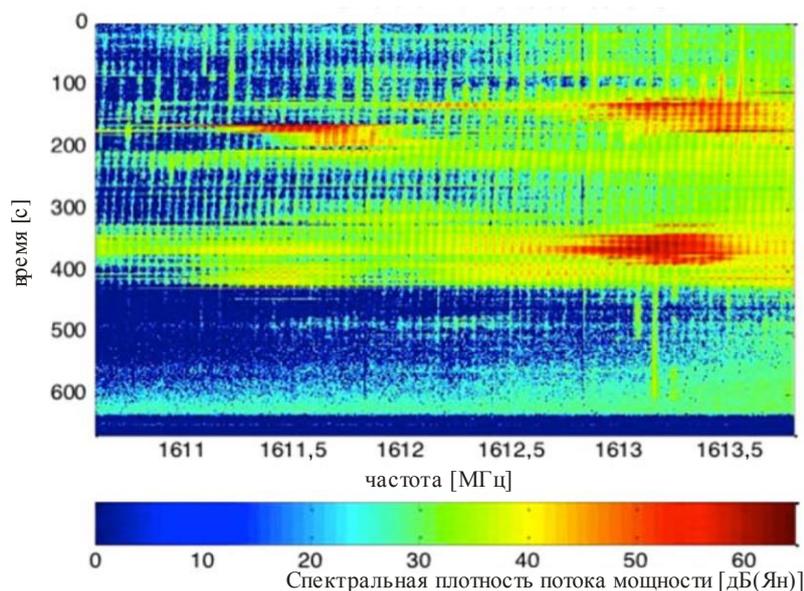
Измерения для определения потери данных выполняются как временные ряды из N измерений с временным интервалом Δt , охватывающие M частотных каналов с шириной полосы Δf .

Сбор данных лучше всего выполнять с помощью многоканального анализатора спектра, такого как банк цифровых фильтров, с сотнями или тысячами параллельных, хорошо изолированных частотных каналов. Это должно обеспечить одновременный охват всего радиоастрономического диапазона. На практике типичные скорости сбора данных составляют около одной спектральной характеристики в секунду, хотя в некоторых случаях могут потребоваться более высокие скорости, чтобы фиксировать весь диапазон помех на шкалах времени.

Типичная картина наблюдаемых данных после калибровки показана на рисунке 18 ниже. В данном случае порог вредных помех для спектральной линии, согласно Рекомендации МСЭ-R RA.769, составляет -238 дБ ($\text{Вт}/\text{м}^2/\text{Гц}$), или $+22$ дБЯн ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} (\text{Вт}/\text{м}^2/\text{Гц})$). Полоса в этом примере наблюдений в непрерывном спектре не используется.

РИСУНОК 18

Частотно-временная диаграмма занятости в полосе РАС 1610,6–1613,8 МГц



Интервал измерения составляет 1 секунду, а полоса пропускания измерительного канала – 6,1 кГц. Эта диаграмма содержит $N = 630$ записей данных и $M = 420$ спектральных каналов в диапазоне радиоастрономической службы (РАС).

Выражение признательности: эти данные получены на Станции спутникового контроля в Леайме (Германия), эксплуатируемой Федеральной сетевой службой (Bundesnetzagentur), с использованием спектрометра германского Радиоастрономического института Макса Планка.

В процессе обработки отдельные записи данных могли усредняться (накапливаться) для достижения более высокой чувствительности. Аналогичным образом, ширина спектрального канала системы контроля может быть меньше эталонной, указанной в Рекомендации МСЭ-R RA.769, которая колеблется от значения на 10 кГц ниже 1 ГГц до значения на 60 ГГц выше 1 МГц при условии, что во время анализа для определения уровня помех выполняется надлежащее преобразование полосы пропускания.

A3.3 Уровни сигналов и пороговые значения

Сигналы, принимаемые станцией контроля от источников калибровочных радиосигналов и от нежелательных излучений спутников, часто скрыты за шумом отдельных коротких наблюдений, но их можно распознать, накопив результаты нескольких наблюдений. Из-за характеристик белого шума как приемной системы, так и неба при использовании более длинных интервалов интеграции среднеквадратичный уровень шума ΔT измерения уменьшается:

$$\Delta T = T_{sys} / \sqrt{(\Delta t \Delta f)}, \quad (1)$$

где T_{sys} – шумовая температура системы, Δt – общее время усреднения отдельных наблюдений, а Δf – ширина полосы, по которой усредняются отдельные каналы спектрометра.

Количественная оценка процентной потери данных в полосах РАС основана на выявлении в записях данных сигналов помех, превышающих уровни вредных помех, указанные в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Они основаны на четко определенном эталонном интервале времени 2000 с (около 33 минут) и четко определенной ширине эталонного канала (Δf_{ref}) или эталонной непрерывной полосы пропускания (Δf_b).

Уровни плотности потока T_{spec} и T_{cont} , используемые при оценке потери данных в полосах РАС, получаются соответственно из наблюдаемых значений $spfd$ узкополосной спектральной линии (с индексом spec) или значений $spfd$ непрерывной полосы пропускания (с индексом cont). Они корректируются для приведения в соответствие с параметрами полосы пропускания и длительности, указанными в Рекомендации МСЭ-R RA.769:

$$T_{spec}(\Delta t, \Delta f) = spfd_{spec}(RA.769, \text{table 2}) + 5 \log((\Delta f_{ref}/\Delta f) (2000/\Delta t)) \quad (\text{дБ(Вт/м}^2/\text{Гц)}); \quad (2a)$$

$$T_{cont}(\Delta t, \Delta f) = spfd_{cont}(RA.769, \text{table 1}) + 5 \log((\Delta f_b/\Delta f) (2000/\Delta t)) \quad (\text{дБ(Вт/м}^2/\text{Гц)}), \quad (2b)$$

где 2000 с – эталонный интервал времени. Для наблюдений спектральной линии значение, которое должно использоваться в качестве Δf_{ref} , равно ширине полосы канала, указанной в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Эталонная ширина полосы Δf_b для наблюдений непрерывной полосы представляет собой ширину полосы, распределенную РАС, для полос до 60 ГГц и 8 ГГц для всех более высокочастотных полос (см. Рекомендацию МСЭ-R RA.769).

Пороговые уровни в Рекомендации МСЭ-R RA.769 основаны на сигналах, составляющих 10% от интегрированных шумовых колебаний в системе обнаружения с использованием коэффициента усиления 0 дБи и при температурах радиоастрономической системы, указанных в Рекомендации. Для антенны контроля с коэффициентом усиления выше 0 дБи и для отношения температур двух систем (см. формулу (1)) эти пороги обнаружения корректируются следующим образом.

Уровни приема основного луча антенны контроля для мешающего сигнала, равного пороговым уровням из Рекомендации МСЭ-R RA.769, вычисляются по формулам:

$$S_{spec}(\Delta t, \Delta f) = -(G+10) + [10 \log(T_{sys,ref}/T_{sys,mon})] + T_{spec}(\Delta t, \Delta f) \quad (\text{дБ(Вт/м}^2/\text{Гц)}); \quad (3a)$$

$$S_{cont}(\Delta t, \Delta f) = -(G+10) + [10 \log (T_{sys,ref}/T_{sys,mon})] + T_{cont}(\Delta t, \Delta f) \quad (\text{дБ(Вт/м}^2/\text{Гц)}). \quad (3b)$$

Уровни $T_{spec}(\Delta t, \Delta f)$ и $T_{cont}(\Delta t, \Delta f)$ из Рекомендации МСЭ-R RA.769 получены из формул (2а) и (2b), а прямое усиление G антенны контроля выражено в дБ. Члены формул (3а) и (3b) отражают разницу между температурой системы, приведенной в Рекомендации МСЭ-R RA.769 ($T_{sys,ref}$), и температурой системы контроля ($T_{sys,mon}$).

А3.4 Калибровка системы

Измерения антенны контроля дают данные в единицах температуры антенны (T_A). Они преобразуются в единицы спектральной плотности потока мощности $spfd$ (дБ(Вт/м²/Гц)) или в Янские (10^{-26} (Вт/м²/Гц)). Эти коэффициенты преобразования должны быть точно известны как функции частоты. Процедура калибровки заключается в следующем:

- 1) выполнение ON-наблюдений в желаемом диапазоне частот нескольких сильных небесных источников непрерывного спектра, каждый из которых имеет известную плотность потока (в Янских), таких как Центавр А, Дева А и другие сильные калибраторы; и
- 2) выполнение OFF-наблюдений для каждого калибратора на соседнем участке "чистого" неба, чтобы определить базовую линию нулевого сигнала.

Коэффициент пересчета в Янские/К получается путем деления силы источника в Янских на разность измеренных сигналов ($T_A(\text{ON}) - T_A(\text{OFF})$). Этот параметр чувствительности дает число Янских, необходимое для создания сигнала в один Кельвин на станции контроля. Как сила источника радиосигнала, так и уровни вредных помех могут быть выражены в Янских.

А3.5 Выявление радиопомех

Средний и пиковый уровни помех внутри полосы РАС должны находиться ниже уровней соответственно непрерывного и линейчатого спектров, указанных в Рекомендации МСЭ-R RA.769. В противном случае считается, что имеет место потеря данных. Отметим, что полосы РАС в настоящем Отчете помечены как только спектральные линии, только непрерывный спектр или как то и другое.

В случае использования спектральных линий все каналы с шириной полосы Δf , расположенные в диапазоне РАС, должны оцениваться независимо на наличие помех выше порога вредных помех для спектральных линий с использованием формулы (2а). Пик должен быть ниже уровня вредных помех в каждом канале. В случае использования непрерывного спектра оценивается средний уровень помех по всей полосе с использованием формулы (2b).

После калибровки записей данных и преобразования температуры антенны (К) в единицы плотности потока запись данных для каждого интервала измерения оценивается на наличие помех, превышающих соответствующие пороговые уровни для спектральной линии или непрерывного спектра (см. формулы (2а) и (2b)). Эта процедура приводит к созданию диаграммы измерений частотно-временной занятости (каскадная диаграмма) с размерностями в N записей и M спектральных каналов. На рисунке 18 показан пример такого калиброванного измерения быстро меняющихся помех во время прохождения спутника.

Широкополосные источники помех излучают сигнал малой мощности в широкой полосе частот. Для обнаружения повышенной $spfd$ измерения широкополосных помех в режимах ON-OFF должны покрывать достаточную полосу частот.

В общем случае временной интервал измерения должен быть достаточно коротким, чтобы выявлять изменчивость во времени и характеристики прерывистости мешающего сигнала. Однако если источник помех работает непрерывно с колебаниями или качанием частоты, то при коротких интервалах времени сигналы помех могут оставаться ниже порога обнаружения. В этом случае требуется интегрированное измерение с временным интервалом, охватывающим период колебаний или цикл качания.
