

Международный союз электросвязи

**МСЭ-R**

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R RA.769-2**

**(03/2020)**

**Критерии защиты, используемые для  
радиоастрономических измерений**

**Серия RA**

**Радиоастрономия**



Международный  
союз  
электросвязи

## 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 Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/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
<b>RA</b>	<b>Радиоастрономия</b>
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
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

*Примечание.* – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2020 г.

© ITU 2020

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.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RA.769-2

**Критерии защиты, используемые для радиоастрономических измерений**

(Вопрос МСЭ-R 145/7)

(1992-1995-2003)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что многие из наиболее фундаментальных астрономических достижений за последние пять десятилетий (открытие радиогалактик, квазаров и пульсаров, прямое измерение излучения нейтрального водорода, прямое измерение расстояний до некоторых внешних галактик, установление позиционной системы координат с точностью до ~20 угловых микросекунд и т.п.) были сделаны с помощью радиоастрономии и что радиоастрономические наблюдения, по-видимому, и впредь будут вносить фундаментальный вклад в наше понимание Вселенной, оставаясь единственным способом исследования некоторых космических явлений;
- b) что развитие радиоастрономии привело также к значительным техническим достижениям, особенно в отношении методов приема и получения изображений, а также к уточнению знаний о фундаментальных ограничениях радишума, чрезвычайно важных для радиосвязи, и обещает еще более значимые результаты;
- c) что радиоастрономы провели полезные астрономические наблюдения с поверхности Земли во всех доступных атмосферных окнах в диапазоне от 2 МГц до 1000 ГГц и выше;
- d) что методы космической радиоастрономии, включающие использование радиотелескопов с космических платформ, обеспечивают доступ к полному спектру радиочастот выше примерно 10 кГц, включая части спектра, не доступные с Земли из-за поглощения в атмосфере;
- e) что защита от помех имеет существенное значение для развития радиоастрономии и связанных с ней измерений;
- f) что радиоастрономические наблюдения в основном выполняются с использованием антенн или антенных решеток с высоким усилением, для того чтобы обеспечить максимально возможное угловое разрешение, и, следовательно, в большинстве ситуаций помехи при связи через основной луч учитываться не должны, за исключением случаев, когда существует вероятность повреждения приемника;
- g) что значительная часть помех, приводящих к ухудшению качества астрономических данных, поступает через дальние боковые лепестки телескопа;
- h) что чувствительность приемного радиоастрономического оборудования, которая продолжает неуклонно увеличиваться, особенно в области миллиметровых волн, значительно превышает чувствительность средств связи и радиолокационного оборудования;
- j) что для типовых радиоастрономических наблюдений требуется время интегрирования от нескольких минут до часов, но для точных наблюдений, особенно для наблюдения спектральных линий, могут потребоваться более длительные периоды записи, иногда до нескольких суток;
- k) что некоторые передачи с космических аппаратов могут создавать помехи для радиоастрономии и их невозможно избежать путем подбора места расположения обсерватории или применения местных средств защиты;
- l) что помехи для радиоастрономии могут быть вызваны наземными передачами, отражаемыми Луной, воздушными судами и, возможно, искусственными спутниками;
- m) что для некоторых типов интерферометрических наблюдений с высоким пространственным разрешением требуется одновременный прием на одной и той же радиочастоте широко разнесенными приемными системами, которые могут быть расположены в разных странах, на разных континентах или на космических платформах;
- n) что условия распространения на частотах ниже примерно 40 МГц таковы, что передатчик, работающий в любом месте на Земле, может создавать помехи, недопустимые для радиоастрономии;

о) что определенной степени защиты можно достичь с помощью соответствующих частотных присвоений на национальной, а не международной основе;

р) что ВКР улучшили распределение для радиоастрономии, в частности на частотах выше 71 ГГц, но во многих полосах, особенно в полосах, используемых совместно с другими радиослужбами, все еще требуется тщательное планирование защиты;

q) что разработаны технические критерии помех, недопустимых для радиоастрономической службы (РАС), которые приведены в таблицах 1, 2 и 3,

*рекомендует*

**1** радиоастрономам выбирать места расположения, максимально свободные от помех;

**2** администрациям обеспечивать всю практически возможную защиту частот и мест, используемых радиоастрономами в их собственных и соседних странах, а при планировании глобальных систем должным образом учитывать уровни помех, указанные в Приложении 1;

**3** администрациям при обеспечении защиты конкретных радиоастрономических наблюдений принимать все практические меры для уменьшения до абсолютного минимума любых нежелательных излучений, попадающих в полосу частот, подлежащую защите для радиоастрономии (в частности, излучений от воздушных судов, станций на высотной платформе, космических аппаратов и воздушных шаров);

**4** администрациям при распределении частот принимать во внимание, что РАС чрезвычайно трудно использовать частоты совместно с любыми другими службами, в которых задействованы тракты на линии прямой видимости от передатчиков до обсерваторий. Может быть осуществимо совместное использование частот выше примерно 40 МГц со службами, передатчики которых не находятся на линии прямой видимости обсерваторий, но может потребоваться координация, в особенности если речь идет о передатчиках большой мощности.

## Приложение 1

### Чувствительность радиоастрономических систем

#### 1 Общие соображения и предположения, используемые при расчете уровней помех

##### 1.1 Критерий определения недопустимого уровня помех

Чувствительность радиоастрономического наблюдения можно определить как наименьшее изменение  $\Delta P$  уровня мощности  $P$  на входе радиометра, которое можно обнаружить и измерить. Уравнение для чувствительности:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 t}}, \quad (1)$$

где

$P$  и  $\Delta P$ : спектральная плотность мощности шума;

$\Delta f_0$ : ширина полосы;

$t$ : время интегрирования;  $P$  и  $\Delta P$  в уравнении (1) можно выразить в единицах температуры через постоянную Больцмана  $k$ :

$$\Delta P = k \Delta T; \quad \text{также} \quad P = k T. \quad (2)$$

Таким образом, уравнение для чувствительности можно представить в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f_0 t}}, \quad (3)$$

где

$$T = T_A + T_R.$$

Этот результат относится к одной поляризации радиотелескопа.  $T$  – это сумма значений  $T_A$  (шумовой температуры антенны, обусловленной космическим излучением, излучением атмосферы Земли и излучением Земли) и  $T_R$  (шумовой температуры приемника). Уравнение (1) или (3) можно использовать для оценки чувствительности и уровней помех для радиоастрономических наблюдений. Результаты приведены в таблицах 1 и 2. Предполагается, что время наблюдения (или интегрирования)  $t$  составляет 2000 с, а пороговые уровни помех  $\Delta P_H$ , приведенные в таблицах 1 и 2, выражаются как мощность помех в полосе шириной  $\Delta f$ , вносящая в измерение  $\Delta P$  (или  $\Delta T$ ) ошибку в 10%, то есть

$$\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f. \quad (4)$$

Таким образом, соответствующие столбцы в таблицах 1 и 2 можно рассчитать следующими методами:

- $\Delta T$  с помощью уравнения (3);
- $\Delta P$  с помощью уравнения (2);
- $\Delta P_H$  с помощью уравнения (4).

Помехи также можно выразить в единицах плотности потока мощности (п.п.м.), падающего на антенну, для всей ширины полосы или в единицах спектральной п.п.м.  $S_H$  в расчете на 1 Гц ширины полосы. Указанные 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). В качестве общего репрезентативного значения уровня боковых лепестков используется усиление изотропного излучателя 0 дБи, о чем говорится в пункте 1.3.

Значения  $S_H \Delta f$  (дБ(Вт/м<sup>2</sup>)) получаются из  $\Delta P_H$  путем добавления величины

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

где  $f$  выражена в герцах. Затем получают значение  $S_H$  путем вычитания  $10 \log \Delta f$  (Гц) для учета ширины полосы.

## 1.2 Время интегрирования

Расчетные значения чувствительности и уровней помех, представленные в таблицах 1 и 2, основаны на предполагаемом времени интегрирования 2000 с. Время интегрирования, фактически используемое в астрономических наблюдениях, образует широкий диапазон значений. Наблюдения непрерывного спектра, выполняемые с помощью телескопов с одной антенной (в отличие от интерферометрических решеток), хорошо представляются временем интегрирования 2000 с, типичным для высококачественных наблюдений. С другой стороны, для наблюдений спектральных линий время 2000 с менее характерно. Улучшение стабильности приемников и более широкое использование корреляционных спектрометров позволили чаще использовать более длительное время интегрирования, необходимое для наблюдения слабых спектральных линий, и довольно распространенными стали наблюдения спектральных линий, продолжающиеся в течение нескольких часов. Более репрезентативное время интегрирования для этих наблюдений составляет 10 ч. Для 10-часового интегрирования пороговый уровень помех на 6 дБ строже значений, приведенных в таблице 2. Проводятся также некоторые наблюдения меняющихся со временем явлений, например наблюдения пульсаров, звездных и солнечных вспышек, а также межпланетных мерцаний, для которых требуются намного более короткие периоды времени.

## 1.3 Характеристики направленности антенны

Помехи для радиоастрономии почти всегда принимаются через боковые лепестки диаграммы направленности антенны, поэтому отсутствует необходимость учитывать влияние на помехи характеристики основного луча.

Хорошим приближением характеристики многих радиоастрономических антенн служит модель боковых лепестков больших параболических антенн в диапазоне частот от 2 до 30 ГГц, приведенная в Рекомендации МСЭ-R SA.509, и в настоящей Рекомендации она принята в качестве эталонной радиоастрономической антенны. В этой модели уровень боковых лепестков уменьшается с угловым расстоянием (в градусах) от оси основного луча и составляет  $32 - 25 \log \phi$  (дБи) при  $1^\circ < \phi < 48^\circ$ . Влияние мешающего сигнала четко зависит от угла падения относительно оси основного луча антенны, поскольку усиление боковых лепестков, как представлено моделью, варьируется от 32 до –10 дБи в зависимости от этого угла. Однако полезно рассчитать пороговые уровни мощности помех для конкретного значения усиления боковых лепестков, которое выбрано равным 0 дБи и используется в таблицах 1–3. Согласно модели, этот уровень боковых лепестков соответствует углу  $19,05^\circ$  от оси основного луча. Таким образом, сигнал с пороговым недопустимым уровнем помех, определенным для усиления боковых лепестков 0 дБи, превышает критерий недопустимого уровня помех на входе приемника, если падает на антенну под углом менее  $19,05^\circ$ . Телесный угол конуса с угловым радиусом  $19,05^\circ$  составляет 0,344 ср, что соответствует 5,5% небесной сферы над уровнем горизонта с телесным углом  $2\pi$  ср, которые можно наблюдать с помощью радиотелескопа в любой момент времени. Таким образом, если вероятность угла падения помехи равномерно распределена по небосводу, то в пределы угла  $19,05^\circ$  от оси основного луча антенны, направленной в небо, будет попадать около 5,5% мешающих сигналов. Отметим также, что показатель 5,5% соответствует рекомендованным уровням потери данных для радиоастрономических наблюдений в процентах времени, указанным в Рекомендации МСЭ-R RA.1513.

Частный случай спутников НГСО представляет собой динамическую ситуацию, то есть положение спутников относительно луча радиоастрономической антенны демонстрирует сильные изменения в масштабе времени интегрирования 2000 с. Для анализа помех в этом случае требуется интегрирование характеристики по меняющимся уровням боковых лепестков, например, с использованием понятия э.п.п.м., определенного в п. 22.5С Регламента радиосвязи (РР). Кроме того, обычно приходится объединять характеристики для нескольких спутников в конкретной системе. До тех пор пока не будет создана специальная модель для радиоастрономических антенн, в таких расчетах для представления радиоастрономической антенны предлагается использовать диаграмму направленности антенны диаметром более  $100 \lambda$  из Рекомендации МСЭ-R S.1428; см. дальнейшее обсуждение в пункте 2.2.

#### 1.4 Ширина полосы

Уравнение (1) показывает, что для достижения максимальной чувствительности наблюдений радиоастрономы должны использовать самую широкую из возможных полос. Следовательно, в таблице 1 (наблюдение непрерывного спектра) для частот до 71 ГГц предполагается, что  $\Delta f$  равна ширине полос, выделенных радиоастрономической службе. На частотах выше 71 ГГц используется значение 8 ГГц, представляющее собой типичную ширину полосы, обычно используемую радиоастрономическими приемниками в этом диапазоне. В таблице 2 (наблюдение спектральных линий) для входных сигналов с частотой ниже 71 ГГц используется канал шириной  $\Delta f$ , равной доплеровскому сдвигу, соответствующему скорости 3 км/с. Это значение представляет собой компромисс между желаемым высоким спектральным разрешением и чувствительностью. На частотах выше 71 ГГц очень много важных для астрофизики линий, как указано в Рекомендации МСЭ-R RA.314, и в таблице 2 приведены лишь несколько репрезентативных значений недопустимых уровней в диапазоне 71–275 ГГц. Ширина канала, используемая для вычисления недопустимых уровней на частотах выше 71 ГГц, во всех случаях составляет 1000 кГц (1 МГц). Это значение выбрано по практическим соображениям. Оно несколько превышает ширину спектрального канала, обычного для радиоастрономических приемников на этих частотах, но используется в качестве стандартной эталонной ширины полосы для космических служб, работающих на частотах выше 15 ГГц.

#### 1.5 Шумовая температура приемника и температура антенны

Шумовые температуры приемника, приведенные в таблицах 1 и 2, характерны для систем, используемых в радиоастрономии. Для частот выше 1 ГГц – это усилители или смесители с криогенным охлаждением. Квантовый эффект налагает на шумовую температуру таких устройств теоретический нижний предел  $hf/k$ , где  $h$  и  $k$  – соответственно, постоянные Планка и Больцмана. Этот предел становится важным на частотах выше 100 ГГц, где он равен 4,8 К. Практически применяемые смесители и усилители для частот 100 ГГц и выше обеспечивают шумовые температуры, превышающие  $hf/k$  примерно в четыре раза. Таким образом, для частот выше 100 ГГц в таблицах 1 и 2 используются шумовые температуры, равные  $4hf/k$ .

Шумовые температуры антенны, приведенные в таблицах, также характерны для практических систем, применяемых в радиоастрономии. Они учитывают воздействие ионосферы или нейтральной атмосферы, искажения в боковых лепестках из-за избыточного излучения или рассеяния, омические потери и космическое микроволновое фоновое излучение. На частотах выше 100 ГГц очень важное значение приобретают атмосферные потери из-за водяного пара в нейтральной атмосфере. Приведенные для этих частот значения типичны для наземных мест, в которых расположены крупные радиоастрономические системы, работающие в диапазоне миллиметровых волн, таких как Мауна-Кеа, Гавайи, или Льяно-де-Чайнантор на высоте 5000 м в Чили – место, выбранное для большой международной радиоастрономической установки, работающей в диапазоне частот от 30 ГГц до 1 ТГц.

## 2 Особые случаи

Уровни, приведенные в таблицах 1 и 2, применимы к наземным источникам мешающих сигналов. В случаях недопустимых п.п.м. и спектральных п.п.м., указанных в таблицах 1 и 2, предполагается, что помехи принимаются через боковой лепесток 0 дБи, и их следует рассматривать как общие критерии помех для радиоастрономических наблюдений с высокой чувствительностью, когда помехи не проникают в ближние боковые лепестки.

### 2.1 Помехи от спутников ГСО

Помехи от спутников ГСО имеют особенное значение. Уровни мощности, приведенные в таблицах 1 и 2, рассчитаны исходя из усиления антенны 0 дБи, поэтому недопустимые для радиоастрономии помехи возникают тогда, когда эталонная антенна, в частности описанная в Рекомендации МСЭ-R SA.509, направлена в пределах  $19,05^\circ$  от спутника, излучающего на уровнях, соответствующих приведенным в таблицах. Ряд таких передатчиков, расположенных на ГСО, будут препятствовать высокочувствительным радиоастрономическим наблюдениям в полосе небосвода шириной  $38,1^\circ$  и центром на орбите. Потеря такой большой области небосвода накладывает жесткие ограничения на радиоастрономические наблюдения.

В общем случае нецелесообразно подавлять нежелательные излучения от спутников до уровня ниже недопустимого, когда основной луч радиотелескопа направлен прямо на спутник. В качестве практического решения предлагается наблюдение за проекцией ГСО в небесных координатах с широт ряда основных радиоастрономических обсерваторий (см. Рекомендацию МСЭ-R RA.517). Если можно направить радиотелескоп на область в пределах  $5^\circ$  от ГСО без возникновения недопустимых помех, то для высокочувствительных наблюдений с помощью этого телескопа будет недоступна полоса небосвода шириной  $10^\circ$ . Это станет серьезной потерей для конкретной обсерватории. Однако для группы радиотелескопов, расположенных на южных и северных широтах и работающих на одинаковых частотах, останется доступным весь небосвод. Поэтому величину  $5^\circ$  можно считать необходимым минимальным угловым расстоянием между основным лучом радиоастрономической антенны и ГСО.

В характеристике модели антенны из Рекомендации МСЭ-R SA.509 уровень боковых лепестков под углом  $5^\circ$  к основному лучу составляет 15 дБи. Таким образом, чтобы избежать недопустимых помех для радиотелескопа, соответствующего характеристикам боковых лепестков антенны из Рекомендации МСЭ-R SA.509, направленной в пределах  $5^\circ$  от передатчика, желательно, чтобы мощность излучения спутника была на 15 дБ ниже значений п.п.м., приведенных в таблицах 1 и 2. Когда спутники разнесены вдоль ГСО с интервалами всего в несколько градусов, уровни излучения, связанные с отдельными передатчиками, должны быть еще ниже, чтобы выполнялось требование, что суммарная мощность всех принимаемых мешающих сигналов должна быть на 15 дБ ниже значений  $\Delta P_H$  из таблиц 1 и 2.

Признано, что на практике указанные выше ограничения на излучение, позволяющие обеспечить совместное использование одной и той же полосы частот радиоастрономической службой и системой передачи со спутников на линии вниз, недостижимы. Однако эти ограничения применимы к нежелательному излучению от спутниковых передатчиков, попадающих в полосы радиоастрономической службы, перечисленные в таблицах 1 и 2. Влияние, которое эти ограничения на излучение оказывают на ответственные за помехи космические службы, требует тщательной оценки. Кроме того, при проектировании новых радиоастрономических антенн следует стремиться минимизировать уровень усиления боковых лепестков вблизи основного луча в качестве важного средства уменьшения помех от передатчиков на ГСО.

## 2.2 Помехи от спутников НГСО

В случае спутников НГСО, в частности спутников на низких околоземных орбитах, системы обычно включают группировки из множества отдельных спутников. Таким образом, для определения уровней помех требуется анализ совокупного воздействия множества сигналов, большинство из которых принимаются через дальние боковые лепестки радиоастрономической антенны. Поэтому желательно иметь более подробную модель боковых лепестков, чем та, что приведена в Рекомендации МСЭ-R SA.509, и до появления более репрезентативной модели радиоастрономических антенн предлагается использовать модель из Рекомендации МСЭ-R S.1428. При использовании этой предложенной модели антенны диаметром более  $100 \lambda$ , как правило, подходят для радиоастрономических применений. Следует отметить, что Примечание 1 к Рекомендации МСЭ-R S.1428, которое позволяет игнорировать компоненты, обусловленные кросс-поляризацией, неприменимо, поскольку радиоастрономические антенны обычно принимают сигналы в двух ортогональных поляризациях одновременно. Ввиду движения спутников НГСО по небосводу в течение периода интегрирования, равного 2000 с, требуется усреднение уровня помех за этот период, то есть характеристика антенны по отношению к каждому спутнику должна интегрироваться по мере движения спутника по диаграмме боковых лепестков. Одна из систем анализа, отвечающих этим требованиям, – метод э.п.п.м., описанный в п. 22.5С РР. Значения э.п.п.м. представляют собой п.п.м. сигнала, поступающего в антенну по центру основного луча и создающего уровень мощности, эквивалентный помехам. Поскольку пороговые уровни недопустимых помех, приведенные в таблицах 1 и 2, соответствуют п.п.м., принимаемой при усилении антенны 0 дБи, необходимо сравнивать их со значениями (э.п.п.м. +  $G_{mb}$ ), где  $G_{mb}$  – усиление основного луча, чтобы определить, не превышен ли недопустимый уровень. На основе использования метода э.п.п.м. недавно была разработана Рекомендация МСЭ-R S.1586 для расчета помех между радиоастрономическими телескопами и спутниковыми системами НГСО ФСС. Аналогичная Рекомендация МСЭ-R M.1583 была разработана для расчетов помех между радиоастрономическими телескопами и ПСС и спутниковыми системами НГСО радионавигационной спутниковой службы. В Рекомендации МСЭ-R RA.1513 рассматривается применимость критериев защиты, приведенных в таблицах 1 и 2.

## 2.3 Реакция интерферометров и антенных решеток на радиопомехи

Реакция на помехи ослабляется двумя эффектами. Они связаны с частотой биений, наблюдаемых при объединении выходных сигналов двух антенн, и с тем фактом, что компоненты мешающего сигнала, принимаемого разными и широко разнесенными антеннами, испытывают разные относительные временные задержки перед объединением. Анализ этих эффектов более сложен, чем в случае отдельных антенн, рассматриваемых в разделе 1. Вообще говоря, если мощность принимаемого мешающего сигнала остается постоянной, то его влияние уменьшается на коэффициент, примерно равный среднему времени одного-естественного колебания биений, деленному на время усреднения данных. Обычно это время составляет от нескольких секунд для компактной антенной решетки с наибольшим расстоянием между антеннами в проекции на плоскость  $L' \sim 10^3 \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны, до менее 1 мс для межконтинентальных решеток с  $L' \sim 10^7 \lambda$ . Таким образом, по сравнению с отдельным радиотелескопом интерферометр обладает некоторой степенью невосприимчивости к помехам, которая при разумных допущениях повышается с размером антенной решетки, выраженным в единицах длины волны.

Наибольшей невосприимчивостью к помехам обладают интерферометры и антенные решетки с достаточно большим разнесом антенн, чтобы вероятность возникновения коррелированных помех

была чрезвычайно мала (например, интерферометры со сверхдлинной базой (VLBI)). В этом случае вышеуказанные соображения неприменимы. Допустимый уровень помех для предотвращения серьезных ошибок при измерении амплитуды космических сигналов определяется требованием, чтобы уровень мощности мешающего сигнала не превышал 1% мощности шума приемника. Уровни помех для типовых наблюдений с помощью VLBI указаны в таблице 3 и основаны на значениях  $T_A$  и  $T_R$ , приведенных в таблице 1.

Следует подчеркнуть, что область применения больших интерферометров и антенных решеток обычно ограничивается исследованиями очень ярких дискретных источников с угловыми размерами не более нескольких десятых секунды дуги для VLBI. Для более общих исследований радиоисточников применимы результаты, приведенные в таблицах 1 и 2, так что они подходят для общей защиты радиоастрономической службы.

ТАБЛИЦА 1

## Пороговые уровни помех, недопустимых для радиоастрономических наблюдений непрерывного спектра

Центральная частота <sup>(1)</sup> $f_c$ (МГц)	Принятая ширина полосы $\Delta f$ (МГц)	Минимальная шумовая температура антенны $T_A$ (К)	Шумовая температура приемника $T_R$ (К)	Чувствительность системы <sup>(2)</sup> (флуктуации шума)		Пороговые уровни помех <sup>(2) (3)</sup>		
				Температура $\Delta T$ (мК)	Спектральная плотность мощности $\Delta P$ (дБ(Вт/Гц))	Входная мощность $\Delta P_H$ (дБВт)	п.п.м. $S_H \Delta f$ (дБ(Вт/м <sup>2</sup> ))	Спектральная п.п.м. $S_H$ (дБ(Вт/(м <sup>2</sup> · 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	-278	-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

<sup>(1)</sup> Расчет уровней помех основан на центральной частоте, приведенной в этом столбце, хотя не все районы имеют одинаковые распределения.

<sup>(2)</sup> Принято время интегрирования 2000 с; при использовании времени интегрирования 15 мин, 1, 2, 5 или 10 ч приведенные в таблице значения следует скорректировать соответственно на +1,7; -1,3; -2,8; -4,8 или -6,3 дБ.

<sup>(3)</sup> Указанные уровни помех относятся к измерению общей мощности, принимаемой одной антенной. Для других типов измерений могут подходить менее жесткие уровни, как указано в пункте 2.2. Для передатчиков на ГСО желательно скорректировать уровни на -15 дБ, как указано в пункте 2.1.

ТАБЛИЦА 2\*

## Пороговые уровни помех, недопустимых для радиоастрономических наблюдений спектральных линий

Частота $f$ (МГц)	Принятая ширина канала для спектральной линии $\Delta f$ (кГц)	Минимальная шумовая температура антенны $T_A$ (К)	Шумовая температура приемника $T_R$ (К)	Чувствительность системы <sup>(2)</sup> (флуктуации шума)		Пороговые уровни помех <sup>(1) (2)</sup>		
				Температура $\Delta T$ (мК)	Спектральная плотность мощности $\Delta P$ (дБ(Вт/Гц))	Входная мощность $\Delta P_H$ (дБВт)	п.п.м. $S_H \Delta f$ (дБ(Вт/м <sup>2</sup> ))	Спектральная п.п.м. $S_H$ (дБ(Вт/(м <sup>2</sup> · 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
14 488	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

\* Эта таблица не предназначена для указания полного перечня радиоастрономических полос, в ней приведены только характерные примеры в спектре.

- (1) Принято время интегрирования 2000 с; при использовании времени интегрирования 15 мин, 1, 2, 5 или 10 ч приведенные в таблице значения следует скорректировать соответственно на +1,7; -1,3; -2,8; -4,8 или -6,3 дБ.
- (2) Указанные уровни помех относятся к измерению общей мощности, принимаемой одной антенной. Для других типов измерений могут подходить менее жесткие уровни, как указано в пункте 2.2. Для передатчиков на ГСО желательно скорректировать уровни на -15 дБ, как указано в пункте 2.1.

## ОПИСАНИЕ СТОЛБЦОВ ТАБЛИЦ 1 И 2

**Столбец**

- (1) Центральная частота полосы частот, распределенной для радиоастрономии (таблица 1), или номинальная частота спектральной линии (таблица 2).
- (2) Принятая или распределенная ширина полосы (таблица 1) или принятая типовая ширина канала, используемая для наблюдений спектральной линии (таблица 2).
- (3) Вклад в минимальную шумовую температуру антенны вносят ионосфера, атмосфера Земли и излучение Земли.
- (4) Шумовая температура приемника характерна для качественных радиометрических систем, предназначенных для радиоастрономических наблюдений с высокой чувствительностью.
- (5) Общая чувствительность системы (мК), рассчитанная по уравнению (1) с использованием сочетания шумовой температуры антенны и приемника, указанной ширины полосы и времени интегрирования 2000 с.
- (6) Совпадает с приведенным выше в (5), но выражено в спектральной плотности мощности шума с помощью уравнения  $\Delta P = k \Delta T$ , где  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  (Дж/К) (постоянная Больцмана). В таблице дано логарифмическое представление  $\Delta P$ .
- (7) Уровень мощности на входе приемника, считающийся вредным для наблюдений с высокой чувствительностью,  $\Delta P_H$ . Этот параметр выражается как уровень помех, вносящий в измерение  $\Delta P$  ошибку не более 10%;  $\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$ : значения в таблице являются логарифмическим представлением  $\Delta P_H$ .
- (8) Плотность потока мощности в канале спектральных линий, требуемая для получения уровня мощности  $\Delta P_H$  в системе приема с изотропной приемной антенной. Значения в таблице являются логарифмическим представлением  $S_H \Delta f$ .
- (9) Спектральная п.п.м., требуемая для получения уровня мощности  $\Delta P_H$  в системе приема с изотропной приемной антенной. Значения в таблице являются логарифмическим представлением  $S_H$ . Для получения надлежащих уровней мощности в эталонной полосе шириной 4 кГц или 1 МГц следует добавить соответственно 36 или 60 дБ.

ТАБЛИЦА 3

**Пороговые уровни помех для наблюдений с помощью VLBI**

Центральная частота (МГц)	Пороговый уровень (дБ(Вт/(м <sup>2</sup> · Гц)))
325,3	-217
611	-212
1 413,5	-211
2 695	-205
4 995	-200
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
86 000	-172