

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R RA.1513-2
(03/2015)

**Уровни потери данных при
радиоастрономических наблюдениях и
критерии процента времени потерь,
обусловленных ухудшением из-за помех,
для полос частот, которые распределены
радиоастрономической службе
на первичной основе**

Серия RA
Радиоастрономия



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 Приложении 1 к 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
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
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, 2017 г.

© ITU 2017

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.1513-2*

Уровни потери данных при радиоастрономических наблюдениях и критерии процента времени потерь, обусловленных ухудшением из-за помех, для полос частот, которые распределены радиоастрономической службе на первичной основе

(2001-2003-2015)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации рассматриваются уровни потери данных при радиоастрономических наблюдениях и критерии процента времени потерь, обусловленных ухудшением из-за помех, для полос частот, которые распределены радиоастрономической службе на первичной основе. В нее включены исследования ситуаций совместного использования частот для наземных применений и применений космического базирования, а также большой раздел, посвященный измерению потери данных по причине слабых импульсных помех.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a)* что научные исследования в области радиоастрономии в огромной мере зависят от возможности проводить наблюдения на самых пределах чувствительности и/или точности, и что возрастающее использование радиочастотного спектра увеличивает вероятность помех, недопустимых для радиоастрономической службы (РАС);
- b)* что для некоторых радиоастрономических наблюдений, таких как наблюдения прохождения комет, покрытия звезд Луной или взрыва сверхновой звезды, требуется высокая вероятность их успешного проведения, поскольку их трудно или невозможно повторить;
- c)* что помехи радиоастрономической службе могут быть обусловлены нежелательными излучениями служб в соседних, близлежащих или гармонически связанных полосах, и поэтому помехи от нескольких служб могут возникать в любой отдельно взятой полосе радиоастрономической службы;
- d)* что может потребоваться распределение нагрузки по совместному использованию частот для обеспечения эффективного использования радиочастотного спектра;
- e)* что распределение нагрузки по совместному использованию частот включает методы ослабления влияния помех, а для будущего внедрения разрабатываются более современные методы, которые обеспечат возможность более эффективного использования радиочастотного спектра;
- f)* что в Рекомендации МСЭ-R RA.769 приведены пороговые уровни помех, недопустимых для РАС (при условии, что усиление антенны равно 0 дБи), для времени интегрирования в 2000 с, однако не установлен приемлемый процент времени для помех от служб, передачи которых случайным образом распределены во времени, и которые либо совместно используют полосу частот с РАС, либо создают нежелательные излучения, попадающие в полосу радиоастрономической службы;
- g)* что администрациям могут потребоваться критерии оценки помех между РАС и другими службами в совместно используемых, соседних, близлежащих или гармонически связанных полосах;
- h)* что разработаны методы (например, метод Монте-Карло) для определения надлежащего расстояния разноса между местами расположения радиоастрономических станций и скоплением подвижных земных станций, и что эти методы требуют определения приемлемого процента времени,

* В 2017 году 7-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла редакционные поправки в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

в течение которого суммарный уровень мощности помех превышает пороговые уровни, недопустимые для РАС;

i) что на основе исследования сценариев совместного использования частот и опыта, приобретенного в ходе продолжительной практической деятельности, получены значения допустимой потери времени, обусловленной ухудшением чувствительности, в масштабе времени одного наблюдения, которые более подробно разъясняются в Приложении 1,

рекомендует,

1 чтобы для оценки помех РАС использовался критерий суммарной потери данных по причине помех от всех сетей, равный 5%, в любой полосе частот, распределенной РАС на первичной основе, с учетом того, что необходимо провести дополнительные исследования распределения доли потерь между различными сетями;

2 чтобы для оценки помех РАС использовался критерий потери данных по причине помех от любой отдельно взятой сети, равный 2%, в любой полосе частот, распределенной РАС на первичной основе;

3 чтобы процент потери данных в полосах частот, распределенных РАС на первичной основе, определялся с использованием одного из следующих вариантов, в зависимости от того, какой является уместным: (1) Рекомендации МСЭ-R S.1586; (2) Рекомендации МСЭ-R M.1583, или (3) процента периодов интегрирования по 2000 с, в которые средняя спектральная плотность потока мощности (п.п.м.) в радиотелескопе превышает уровни, определенные в Рекомендации МСЭ-R RA.769 (при условии, что усиление антенны равно 0 дБи);

4 чтобы критерии, описанные в п. 3.3.2 Приложения 1, использовались для оценки помех от нежелательных излучений, создаваемых любой спутниковой системой НГСО в местах расположения радиоастрономических станций, в любой полосе частот, распределенной РАС на первичной основе.

Приложение 1

Потеря данных вследствие помех

1	Введение.....	3
2	Потеря данных и перекрытие небесной сферы	4
3	Ситуации совместного использования частот.....	5
3.1	Помехи, вызванные меняющимися условиями распространения	6
3.1.1	Наземные применения	6
3.1.2	Применения космического базирования	7
3.2	Совместное использование частот внутри полосы в случае изменения времени и места передачи.....	7
3.2.1	Наземные применения	7
3.2.2	Применения космического базирования	7
3.2.3	Радиоастрономические применения космического базирования	7
3.3	Нежелательные излучения в полосе частот радиоастрономической службы в случае изменения времени передачи и/или направления прихода передаваемого сигнала.....	7
3.3.1	Наземные применения	7

3.3.2	Применения космического базирования	8
3.4	Измерение потерь данных от слабых, импульсных помех	9
3.4.1	Метод	10
3.4.2	Влияние регулярных импульсов	11
3.4.3	Импульсы большой длительности	12
3.4.4	Методы ослабления помех	12
3.4.5	Эквивалентность коротких импульсов и непрерывного излучения	13
3.4.6	Итог	13
4	Выводы	13

1 Введение

Одним из важных параметров для всех служб радиосвязи является процент времени потерь на помехи. Администрациям могут понадобиться количественные критерии, касающиеся работы радиоастрономической службы вместе с активными службами, действующими в тех же самым, соседних, близлежащих или гармонически связанных полосах. Например, в Рекомендации МСЭ-R М.1316 данный процент времени потерь на помехи используется при расчете расстояния разноса по умолчанию между станциями, работающими в ПСС (Земля-космос), и радиоастрономической обсерваторией с помощью метода Монте-Карло.

Для сравнения в таблице 1 приведены существующие пределы суммарных потерь времени, допустимых для других разных "научных" служб.

ТАБЛИЦА 1

Пример использования критериев суммарного процента времени потери данных для других научных служб

Спутниковая служба исследования Земли (ССИЗ) (пассивные датчики) (%) (Рекомендация МСЭ-R SA.1029-2): – Трехмерное зондирование атмосферы – Все остальные датчики	0,01 1,0–5,0
Системы управления и системы передачи данных, работающие в спутниковой службе исследования Земли и метеорологической спутниковой службе (%) (Рекомендация МСЭ-R SA.514-3)	0,1–1,0
Службы ССИЗ и МетСат, использующие космический аппарат на геостационарной орбите (%) (Рекомендация МСЭ-R SA.1161-1)	0,0025–0,1
Системы космической эксплуатации, отношение $S/N > 20$ дБ для $> 99\%$ времени (%) (Рекомендация МСЭ-R SA.363-5)	1,0

Радиотелескопы предназначены для непрерывной работы согласно расписанию программ наблюдения, запрашиваемому астрономами. Как правило, существует большая конкуренция за доступ к радиотелескопам, при этом предложения о проведении исследований нередко в 2–3 раза превышают доступное время, в течение которого телескоп используется для наблюдений. Практически все радиоастрономические комплексы работают за счет государственного финансирования и должны использоваться весьма эффективно. Вместе с тем неизбежна некоторая

потеря времени наблюдения, вызванная техническим обслуживанием или обновлением аппаратного или программного обеспечения. Опыт, полученный одной администрацией за долгие годы эксплуатации крупнейших астрономических инструментов, показывает, что эти потери не должны превышать 5% времени, например, один 8-часовой день в неделю. Рассмотрение общей эффективности и стоимости эксплуатации показывает, что дополнительную суммарную потерю времени по причине помех следует ограничить такой же величиной, то есть 5%.

Чтобы добиться величин, приведенных в таблице 1, следует обеспечить соблюдение долей этих величин, приходящих на отдельные службы, за счет соответствующего проектирования их систем и управления их работой. Консервативный подход требует выделения отдельным системам только некоторой доли бюджета помех, зависящей от факторов, которые имеют отношение к реальной ситуации с распределением частот, таких как совместное использование полосы и потенциал помех, обусловленных нежелательными излучениями других служб.

Следует отметить, что принцип суммарной потери данных в настоящее время разработан не полностью. Инструмент моделирования, например, тот, который описан в Рекомендации МСЭ-R M.1316, позволяет рассматривать случаи помех, вызванных какой-либо отдельной системой. Сегодня разрабатываются и другие методики, предназначенные для отдельных систем. На данном этапе отсутствует аналогичный инструмент для случая суммарной потери данных, вызванной несколькими системами. Разработка метода, в котором учитываются характеристики нескольких систем, может быть сопряжена с трудностями. Особенно сложно распределить доли суммарной потери данных по разным системам. Необходимо дополнительно исследовать эти проблемы.

Появление радиослужб, использующих космические станции и станции на высотной платформе, требует переоценки мер, с помощью которых обеспечивается защита РАС от помех. Как правило, совместное использование частот с этими службами невозможно, однако потенциально негативное влияние, оказываемое этими службами на РАС в близлежащих полосах, связано с двумя факторами:

- a) нежелательными излучениями, которые попадают в полосы, распределенные РАС;
- b) взаимной модуляцией и отклонением от линейной зависимости, которые возникают в радиотелескопических системах под воздействием сильных сигналов в соседних полосах.

Предполагается, что спутниковые операторы будут использовать все практические средства для сведения к минимуму нежелательных излучений, а радиоастрономы – все практические методы для максимального снижения чувствительности к сигналам в соседних или близлежащих полосах. Тем не менее следует уделять большое внимание пункту b) при работе систем в полосах, которые примыкают к полосам, распределенным РАС, или близки к ним.

2 Потеря данных и перекрытие небесной сферы

Всякий раз, когда в настоящей Рекомендации упоминается потеря данных, речь идет о данных, которые должны быть отброшены, поскольку они испорчены суммарными помехами от одного или нескольких источников, уровни которых превышают приведенные в Рекомендации МСЭ-R RA.769, при указанных в ней допущениях. Термин "перекрытие" используется в настоящей Рекомендации для указания направлений антенны, в которых уровень принимаемых помех превышает уровни, приведенные в Рекомендации МСЭ-R RA.769 для недопустимых помех. В присутствии этих помех, как правило, невозможно получить полезные данные для исследований на границе человеческих знаний. Потеря данных может быть вызвана потерей части полосы наблюдения, части времени наблюдения или перекрытием части небесной сферы. Все эти причины можно назвать потерей фактического времени наблюдения.

В Рекомендации МСЭ-R RA.1031 указано, что многие типы радиоастрономических измерений могут осуществляться при уровнях помех со стороны служб, использующих те же полосы частот, которые превышают приведенные в Рекомендации МСЭ-R RA.769 пороговые уровни в течение 2% времени. Следует отметить, что наблюдения, которые могут осуществляться при повышенных уровнях погрешности измерения, представляют собой такие наблюдения, как контроль радиовспышек на Солнце. К наблюдениям, имеющим важное значение в радиоастрономии, относятся наблюдения, приводящие к появлению новых знаний об астрономических явлениях. Для этого требуется либо проводить наблюдения ранее неизученных объектов, либо наблюдать известные объекты с

повышенной точностью. В обоих случаях наблюдения требуется проводить при максимально достижимом уровне чувствительности. В связи с развитием радиоастрономии полезность данных, имеющих ограниченную точность из-за наличия помех, уменьшилась, и у астрономов принято удалять данные, имеющие любые признаки помех. То есть реалии таковы, что возникновение помех с любым различимым уровнем приводит к потере испорченных данных.

Контур 0 дБи диаграммы направленности больших антенн в диапазоне между 2 ГГц и приблизительно 30 ГГц, определенный в Рекомендации МСЭ-R SA.509, имеет радиус 19° . Если радиотелескоп направлен под углом меньше 19° к передатчику, излучающему в полосе радиоастрономической службы с недопустимым уровнем, определенным в Рекомендации МСЭ-R RA.769, возникают помехи. Это создает реальное препятствие для радиоастрономического наблюдения в области небесной сферы с угловым радиусом 19° . Частичное перекрытие небесной сферы – это отношение определенной выше области перекрытия небесной сферы (над горизонтом) к телесному углу видимой полусферы.

На рисунке 1 показано влияние гипотетического передатчика, находящегося у горизонта в исходной точке шкалы азимута, спектральная п.п.м. которого в месте расположения радиоастрономической станции в точности соответствует уровню, указанному в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Контуры на рисунке показывают уровень в децибелах, на который мощность сигнала, принимаемого от передатчика, превышает уровень, недопустимый для радиоастрономической службы, в зависимости от угла наведения антенны радиоастрономической станции. Принимаемая передача создает недопустимые помехи, если ее прием осуществляется боковыми лепестками антенны радиоастрономической станции с усилением, превышающим 0 дБи. В таблице 2 показана доля небесной сферы, подверженная этим недопустимым помехам, для углов наведения антенны при углах места выше 5° . Антенны радиоастрономических станций редко бывают направлены под углом ниже 5° , и поэтому этот угол места является наименьшим учитываемым углом. Источник помех, находящийся под углом места выше 19° (например, передатчик на борту воздушного судна или космического аппарата), спектральная п.п.м. которого в месте расположения радиоастрономической станции в точности соответствует уровню, указанному в Рекомендации МСЭ-R RA.769, перекрывает для радиоастрономического наблюдения с полезными уровнями чувствительности круговую область небесной сферы с радиусом 19° и центром в источнике помех. Эта область стягивает телесный угол 0,344 ср, который составляет 5,5% от небесной сферы над уровнем горизонта с телесным углом 2π ср.

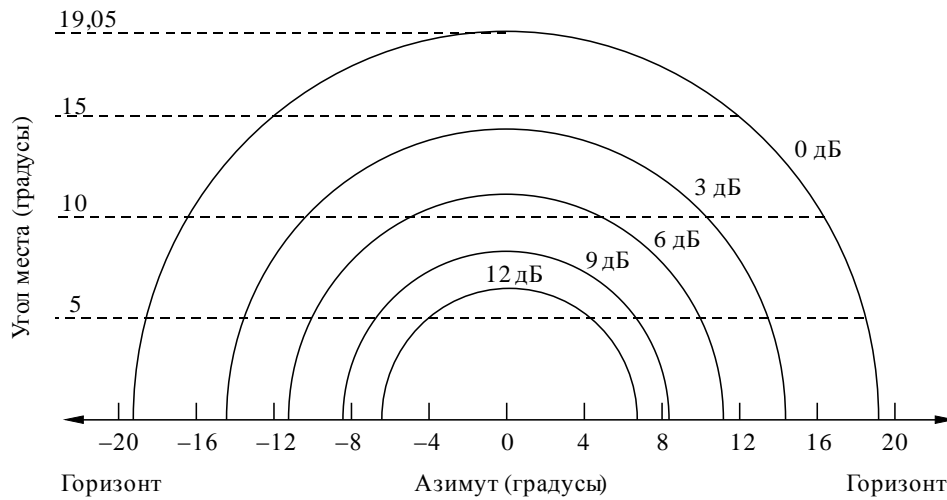
Применение принципа перекрытия небесной сферы в нестационарных условиях (например, к спутниковым системам НГСО или подвижным станциям) требует дальнейшего исследования.

3 Ситуации совместного использования частот

При оценке помех важно различать передачи наземного происхождения, в частности случаи отсутствия трасс прямой видимости, и передачи в пределах прямой видимости затронутого радиотелескопа, ведущиеся передатчиками на борту воздушных судов, высотных платформ и передатчиками космического базирования. В отношении процента потерянного времени наблюдения следует различать помехи от удаленных передатчиков, вызванные меняющимися условиями распространения (т.е. не поддающимися контролю со стороны человека), и помехи от активных применений, когда излучение носит действительно случайный характер в том что касается его уровня мощности в месте расположения радиотелескопа и угла прихода на радиотелескоп (см. п. 3.1).

РИСУНОК 1

Влияние источника помех с недопустимым для РАС уровнем, находящегося у горизонта и имеющего нулевой азимут



RA.1513-01

Кривые показывают уровень в децибелах, на который помехи, принимаемые приемником радиоастрономической станции, превышают недопустимый уровень, при разных углах наведения антенны радиоастрономической станции. Следует отметить, что радиоастрономические наблюдения, как правило, проводятся с углами наведения, превышающими 5° по углу места.

ТАБЛИЦА 2

Доля небесной сферы, в которой наблюдениям с высоким уровнем чувствительности мешают помехи от изображенного на рисунке 1 источника, принимаемые с уровнем выше недопустимого, в зависимости от угла места направления наведения радиотелескопа

Минимальный угол места (градусы)	Перекрытие (%)
5	2,0
10	1,3
15	0,6
20	0

3.1 Помехи, вызванные меняющимися условиями распространения

3.1.1 Наземные применения

В случаях, когда напряженность поля мешающего сигнала меняется под действием меняющихся во времени условий распространения, для расчета распространения должен быть определен процент времени. В Рекомендации МСЭ-R RA.1031 приведено значение, равное 2%. Однако это значение не дает автоматически 2% потери данных для радиоастрономических наблюдений. Условия распространения меняются случайным образом, как правило, через несколько дней. В связи с этим следует отметить, что если взять непрерывный промежуток времени в нескольких недель, то интервал, в течение которого данные будут испорчены помехами, может составлять лишь несколько дней. Эти эффекты наблюдаются, главным образом, при большей длине волны, то есть на частотах ниже примерно 1 ГГц. Интервалы потери данных можно сократить путем динамического изменения графика радиоастрономических наблюдений.

3.1.2 Применения космического базирования

При наличии прямой видимости нет необходимости учитывать меняющиеся во времени условия тропосферного распространения.

3.2 Совместное использование частот внутри полосы в случае изменения времени и места передачи

3.2.1 Наземные применения

Для обеспечения максимальной эффективности использования радиотелескопов следует не допускать потери времени наблюдений по причине помех, создаваемых другими пользователями спектра. Вместе с тем небольшие потери могут быть неизбежными. Одним из примеров являются нежелательные излучения подвижных (земных) станций ПСС. Приемлемый на практике уровень потери данных из-за таких систем составляет 2%. В Рекомендации МСЭ-R М.1316 приведен пример осуществления координации между РАС и ПСС (Земля-космос). В этой Рекомендации процент потерянного времени наблюдения используется при расчете расстояния разноса по умолчанию между подвижными земными станциями ПСС (Земля-космос) и радиоастрономической станцией с помощью метода Монте-Карло.

3.2.2 Применения космического базирования

Совместное использование частот со спутниковыми линиями вниз невозможно в полосах, в которых РАС имеет первичное распределение.

3.2.3 Радиоастрономические применения космического базирования

Радиоастрономия космического базирования требует отдельного анализа, соответствующего конкретному применению.

3.3 Нежелательные излучения в полосе частот радиоастрономической службы в случае изменения времени передачи и/или направления прихода передаваемого сигнала

3.3.1 Наземные применения

Разделение времени между наземными применениями и радиоастрономией, как правило, считается неосуществимым в процессе эксплуатации. Фильтрация передатчика и географическое разнесение используются для того, чтобы понизить уровни нежелательных излучений в полосе радиоастрономической службы до уровней ниже пороговых значений, предусмотренных в Рекомендации МСЭ-R RA.769, в месте расположения радиотелескопа. Существует потенциальная возможность помех в тех случаях, когда луч радиоастрономической станции направлен под углом менее 19° по отношению к наземному источнику (см. рис. 1). Уровни в Рекомендации МСЭ-R RA.769 основаны на допущении, что источник помех кроется в изотропном контуре. Как показано на рис. 1, наземный источник на горизонте (угол места = 0°) может создавать недопустимые помехи под углом до 2% по отношению к видимой полусфере для телескопа, который может быть направлен под углом в пределах 5° по отношению к горизонту. Однако, радиотелескопы направлены под углом в пределах 5° по отношению к горизонту, как правило, в течение только какой-то части от их общего времени наблюдений. Некоторые источники помех известны и их можно избежать. На практике уровень потерь данных до 2% от одной мешающей системы можно считать допустимым. Следует отметить, что, поскольку радиотелескоп направлен при очень небольших углах места, то шум системы увеличивается, что уменьшает чувствительность. Это не было учтено в Рекомендации МСЭ-R RA.769, поскольку обычный предел угла места в 5° – 10° имеет результатом очень незначительное время, которое тратится в районе понизившейся чувствительности.

Методика, описываемая в Рекомендации МСЭ-R М.1316, может использоваться также для оценки влияния нежелательных излучений от наземных применений в направлении полосы частот радиоастрономической службы.

3.3.2 Применения космического базирования

Защита радиоастрономии в присутствии спутников ГСО охвачена в Рекомендации МСЭ-R RA.769.

Чтобы решить вопрос совместимости группировок НГСО и станций РАС МСЭ-R разработал две Рекомендации:

Рекомендацию МСЭ-R S.1586 – Расчет уровней нежелательных излучений, создаваемых негеостационарными спутниковыми системами фиксированной спутниковой службы на радиоастрономических станциях.

Рекомендацию МСЭ-R M.1583 – Расчет помех между негеостационарными системами подвижной спутниковой или радионавигационной спутниковой служб и местами расположения радиоастрономических телескопов.

В этих Рекомендациях содержится методика оценки уровней нежелательных излучений, создаваемых группировками НГСО и некоторыми другими системами в местах расположения радиоастрономических станций до их ввода в действие. В частности, в этих Рекомендациях представлены методы определения совместимости между радиоастрономическими станциями и спутниковыми системами во время конструирования и до запуска последних в ответ на пункты 1 и 2 раздела *решает* Резолюции **739 (Пересм. ВКР-07)**.

Первый шаг в этом подходе состоит в разделении небесной сферы на ячейки. Сначала, осуществляется случайный выбор направления наведения антенны станции РАС, которое будет располагаться в пределах конкретной ячейки небесной сферы. Затем, в произвольном порядке выбирается время начала передачи группировки. После этого рассчитывается средняя э.п.м., соответствующая данному испытанию, для выбранного направления наведения и времени начала передачи группировки с использованием следующего уравнения, чтобы определить э.п.м., соответствующую каждой временной выборке:

$$epfd_{G_r = 0\text{дБи}} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot G_r(\phi_i) \right] \quad (1)$$

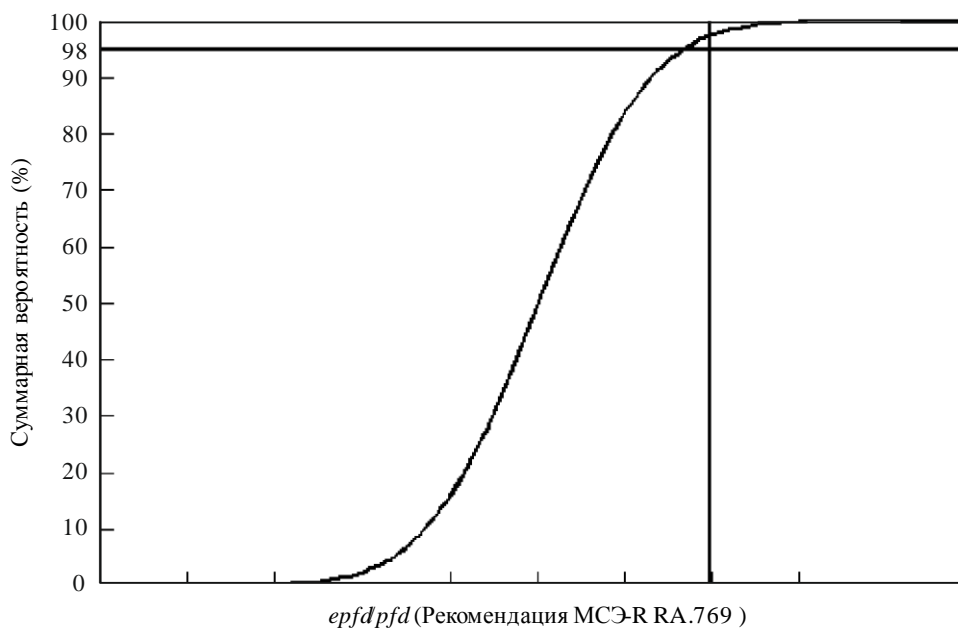
где:

- N_a : число космических станций НГСО, видимых с радиотелескопа;
- i : индекс рассматриваемой космической станции НГСО;
- P_i : РЧ мощность нежелательного излучения на входе антенны (или РЧ излучаемая мощность в случае активной антенны) рассматриваемой передающей космической станции в спутниковой системе НГСО в эталонной ширине полосы частот (дБВт);
- θ_i : внеосевой угол между опорным направлением рассматриваемой передающей космической станции спутниковой системы НГСО и направлением на радиотелескоп;
- $G_t(\theta_i)$: усиление передающей антенны (как отношение) рассматриваемой космической станции спутниковой системы НГСО в направлении на радиотелескоп;
- d_i : расстояние (в метрах) между рассматриваемой передающей станцией спутниковой системы НГСО и радиотелескопом;
- ϕ_i : внеосевой угол (в градусах) между направлением наведения радиотелескопа и направлением на рассматриваемую передающую космическую станцию спутниковой системы НГСО;
- $G_r(\phi_i)$: усиление приемной антенны (как отношение) радиотелескопа в направлении на рассматриваемую передающую космическую станцию спутниковой системы НГСО.

Для каждой из этих ячеек определяется статистическое распределение э.п.п.м. Затем, это распределение э.п.п.м. можно сравнить с уровнями п.п.м., представленными в Рекомендации МСЭ-R RA.769 (определены исходя из предположения об усилении приемной антенны в 0 дБи в направлении помехи и при заданном времени интегрирования в 2000 с), для того чтобы процент испытаний, во время которых достигнут этот критерий, можно было определить для каждой из ячеек, которые были определены.

РИСУНОК 2

Сравнение между уровнями п.п.м., содержащимися в Рекомендации МСЭ-R RA.769, и распределением э.п.п.м. для одной ячейки



RA.1513-02

Из пороговых уровней п.п.м. помех, недопустимых для радиоастрономической службы, которые приведены в Рекомендации МСЭ-R RA.769, с помощью следующего уравнения могут быть получены пороговые уровни э.п.п.м., учитывая максимальное усиление антенны радиоастрономической станции, G_{max} , принятое в вычислениях:

$$epfd_{threshold} = pfd_{RA.769} - G_{max}.$$

По небесной сфере для углов места больше минимального рабочего угла места радиотелескопа пороговый уровень э.п.п.м., определенный выше, не должен превышать 2% времени.

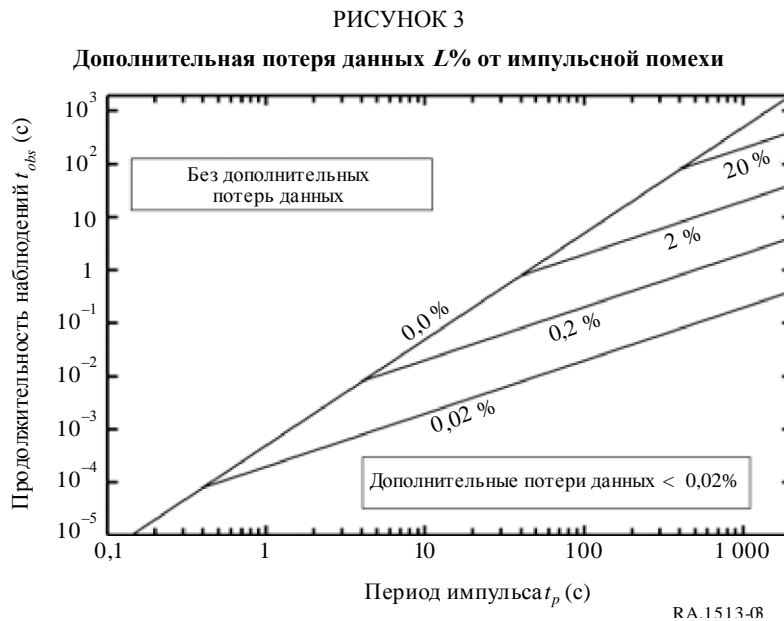
Эта методика, была первоначально разработана для охвата случая спутниковых систем НГСО, однако она может быть также использована для некоторых бортовых систем, напр., в воздушной ППС.

3.4 Измерение потерь данных от слабых, импульсных помех

В настоящем разделе определяется измерение дополнительных потерь данных от импульсных помех с учетом среднего порогового уровня недопустимых помех спектральной линии в 2000 с, установленного в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Это случай слабых помех. Существует существенное различие в характеристиках помех от импульсных и от непрерывных сигналов. Непрерывные, не меняющиеся во времени помехи, совпадающие с пороговыми уровнями недопустимых помех или ниже этих уровней, описание которых приводится в Рекомендации МСЭ-R RA.769 для интегрирований в 2000 с, не причинят вреда непродолжительным наблюдениям, поскольку в длительных периодах интегрирования отношение помеха/шум больше. Это не всегда справедливо в отношении сигналов, изменяющихся во времени. Мы определяем здесь ситуации, при которых импульсные сигналы удовлетворяют пороговому уровню, обеспечиваемому интегрированием в 2000 с, хотя по-прежнему вызывают дополнительные потери данных для непродолжительных наблюдений.

В отношении периодических помех измерение дополнительных потерь данных зависит от двух шкал времени: периода мешающего импульса, t_p , и интервала наблюдений, для которого при проведении индивидуальных измерений данные астрономических наблюдений, t_{obs} , усредняются. Научно-технические соображения требуют определения t_{obs} , продолжительность которого обычно составляет несколько секунд. В случае, если t_{obs} превышает 0,8 с, то возможна дополнительная потеря данных $> 2\%$, однако только в том случае, если период мешающего импульса продолжительнее 40 с, о чем свидетельствуют расчеты, представленные ниже.

Измерения потерь данных в кратком виде представлены на рис. 3.



Дополнительная потеря данных зависит только от комбинации периода импульсов и продолжительности наблюдений, как показано на рис. 3. Наблюдение считается потерянным, если оно содержит сигнал, мощность которого превышает $1/10$ шума системы с усреднением по продолжительности наблюдения. Мы считаем, что максимальная дополнительная потеря данных меньше продолжительности периода одного импульса в 2000 с. Поэтому, сигналы радара и другие кратковременные импульсные сигналы не создают значительных дополнительных потерь данных.

3.4.1 Метод

Рассмотрим случай периодических импульсов, которые усредняются по времени до пороговых уровней недопустимых помех для потери данных за 2000 с, представленный в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Из него следует, что в отличие от случая помех, постоянных во времени, наблюдения, которые в силу своего характера короче 2000 с (напр., пульсары, которые являются источниками периодических излучений гораздо менее продолжительных, чем 2000 с), в некоторых случаях будут испытывать потерю данных, поскольку энергия мешающего импульса может быть сосредоточена в одном или нескольких из этих менее продолжительных наблюдений.

Например, одиночный мешающий импульс каждые 2000 с будет попадать в одно из двух наблюдений в серии, длящихся 1000 с, каждое. Отношение помеха/шум не продолжительнее $1/10$, как требуется в Рекомендации МСЭ-R RA.769, зато $\sqrt{2}/10$ в одном наблюдении и 0 – в другом. Это и есть дополнительная потеря данных в размере 50%. (Коэффициентом является $\sqrt{2}$, поскольку средняя мощность помехи в затронутом наблюдении в два раза выше, а среднеквадратический уровень шума менее продолжительных наблюдений больше только на $\sqrt{2}$.) Этот пример дает наихудший возможный случай дополнительной потери данных, как это будет показано ниже.

Дополнительная потеря данных получается следующим образом:

Допустим, что:

- t_{obs} : продолжительность наблюдений в секундах;
- t_p : период импульса в секундах;
- N_{obs} : количество наблюдений за 2000 с, $= 2000/t_{obs}$;
- N_p : количество импульсов за 2000 с, $= 2000/t_p$;
- P : средняя мощность импульса в течение интервала времени наблюдения t_{obs} ;
- P_{sys} : мощность шума в системе, свободной от помех, усредненная для 2000 с;
- L : дополнительная потеря данных в секундах; и
- $L\%$: дополнительная потеря данных в процентах.

Энергия, поставляемая потоком импульсов, должна составлять $\leq 1/10$ от энергии системы, свободной от помех (см. Рекомендацию МСЭ-R RA.769). Таким образом:

$$N_p P t_{obs} \leq (2000 P_{sys})/10 \quad (2)$$

Теперь определим параметр P , как:

$$P = (a P_{sys}/10) \sqrt[3]{(2000/t_{obs})} \quad (3)$$

так что средняя мощность импульса превышает пороговый уровень недопустимых помех для РЧП для временного интервала t_{obs} .

Затем из уравнений (2) и (3) получаем верхний предел для числа регулярных импульсов за 2000 с:

$$N_{p,max} = (1/a) \sqrt[3]{(2000/t_{obs})} \quad (4)$$

а также соответствующий самый короткий допустимый период импульса:

$$t_{p,min} = a \sqrt[3]{(2000 t_{obs})}. \quad (5)$$

Это показывает, что период мешающего импульса должен быть больше геометрического среднего значения продолжительности наблюдения и 2000 с для него, чтобы стать причиной дополнительной потери данных во время непродолжительных наблюдений, удовлетворяя при этом предел недопустимых помех $a = 1$ в 2000 с, установленный Рекомендацией МСЭ-R RA.769. Таким образом, например, имеется ровно 100 наблюдений продолжительностью $t_{obs} = 20$ с в интервале 2000 с, где (5) гарантирует $t_{p,min} = 200$ с. Поскольку $t_{p,min}$ – это самый продолжительный период, удовлетворяющий требованию $a = 1$, то менее 10 импульсов могут привести к потере данных в не более 9 из 100 двадцатисекундных наблюдений.

Тогда потеря данных:

$$L = N_p t_{obs} \text{ в секундах,} \quad (6)$$

а процентная потеря данных:

$$L\% = 100 L/2000 \quad (7)$$

Из уравнений (5) и (6) получаем:

$$L(\text{upper limit}) = t_{p,min} \text{ в секундах; и} \quad (8)$$

$$L\%(\text{upper limit}) = 100 (t_{p,min}/2000) \quad (9)$$

Из этого видно, что кратковременные импульсные сигналы ($t_p < 40$ с) не могут стать причиной значительной дополнительной потери данных выше 2% предела.

Зависимость между t_{obs} , t_p и $L\%$ показана на рис. 3, выше, для дополнительной потери данных в 0; 0,02; 0,2; 2 и 20%.

3.4.2 Влияние регулярных импульсов

Периодические импульсы помех постоянной силы представляют худший случай с точки зрения дополнительной потери данных. Импульсы, поступающие неравномерно по времени или с меняющейся мощностью, обуславливают по большей части такой же уровень потерь данных, опять-таки в рамках требования $a = 1$, чтобы их средняя величина не превышала пороговый уровень

недопустимых помех спустя 2000 с. В некоторых случаях во время одного наблюдения могут возникнуть несколько мешающих импульсов, которые, однако, не увеличивают общее количество потерянных наблюдений, поскольку для этого достаточно всего одного импульса.

Точно так же мешающие импульсы, меняющиеся по мощности, могут уменьшить количество потерянных наблюдений. Это происходит тогда, когда мощность импульса падает гораздо ниже среднего уровня, чтобы не превышать уровень недопустимых помех. Поэтому ни в одном из случаев импульсы не могут вызывать больше потерь, чем периодические импульсы постоянной мощности.

3.4.3 Импульсы большой длительности

Периодами мешающих импульсов, обуславливающими значительную дополнительную потерю данных, являются только очень продолжительные, от десятков до сотен секунд, периоды. Такие комбинации импульсов в коммерческой практике очень редки, хотя приложения, работающие в режиме радаров, могут неравномерно осуществлять передачи близкие к этим скоростям.

Причина для ограничения периодов с импульсами большой длительности показана на следующем примере. Из уравнения (5) видно, что, для того чтобы вызвать дополнительную потерю данных, период импульса должен превышать геометрическое среднее значение продолжительности наблюдения и 2000 с. Например, имеется сто 20-секундных интегрирований в 2000 с. Отсюда одиночный импульс продолжительностью в среднем 20 с может возникать 100 раз, чтобы достичь 2000-секундного порогового уровня недопустимых помех, при этом его среднее значение снизится до этого уровня и приведет к 1% дополнительной потере данных. Эта избыточная мощность может быть уменьшена в $\sqrt{100} = 10$ раз и распределена по самое большее 10 импульсам, прежде чем она опустится ниже уровня 20-секундного уровня недопустимых помех. Это дает нам минимальную длительность импульса в 200 с.

3.4.4 Методы ослабления влияния помех

Помеха в изотропной антенне, которая хорошо видна при любом интервале интегрирования в одну секунду или более, уже указывает на то, что средняя мощность на протяжении 2000 с превысит пороговый уровень недопустимых помех, как показано ниже.

Для сигналов на уровне порога недопустимых помех или ниже ($a \leq 1$) максимальная мощность импульса, приводящая к 2% потере данных, создается одиночным импульсом каждые 2000 с, то есть на 1,5 дБ ниже среднего значения шума за 40 с. Это повредит одному 40-секундному интегрированию из каждых 50 для 2% потерь. Среднее значение шума за 40 с на $\sqrt{50}$ (8,5 дБ) больше значения шума за 2000 с, хотя величина импульса может быть в 50 раз (17 дБ) выше этого уровня. Разница составляет 8,5 дБ. Это по-прежнему на $\sqrt{2}$ меньше, чем среднее значение шума за 40 с, и поэтому его невозможно будет обнаружить в обычных условиях наблюдения. Только за очень короткие периоды наблюдений (тысячная доля секунды) может быть достигнуто значимое обнаружение импульсов, на пять или более сигм выше уровня шума.

Во всех случаях обнаружение импульсных помех будет требовать усиления антенны, направленной на источник помех, намного выше изотропной или, в случае очень коротких импульсов, – высокого разрешения по времени. Таким образом, видимая помеха в изотропной антенне с интегрированием в несколько секунд гарантированно превысит уровень недопустимых помех, если ее средняя продолжительность превысит 2000 с, даже в случае отсутствия дополнительных помех.

В данном разделе мы исходим из того, что не предпринималось попыток синхронизировать скорость извлечения данных с периодом импульса. Вместе с тем регулярный импульсный сигнал позволяет использовать исключительно эффективный метод ослабления помех, если будет выбран этот вариант. Из опыта работы по обнаружению пульсаров известно, что можно достичь улучшения отношения помехи к шуму, пропорционального квадратному корню из отношения ширины импульса к периоду импульса, которое для радаров обычно составляет от 10 до 20 дБ.

3.4.5 Эквивалентность коротких импульсов и непрерывного излучения

Короткие импульсы, например излучения радаров, можно рассматривать в качестве постоянных помех, соответствующих по своей мощности средней мощности импульса. В частности, мощность импульсной помехи, которая не превышает предусмотренный в Рекомендации МСЭ-R RA.769 предел для 2000-секундного интегрирования, может оказаться ниже предела недопустимых помех, рассчитанного для короткого периода интегрирования. Например, рассмотрим импульсный сигнал с 20-секундным периодом, то есть на 15 дБ ниже уровня шума, в каждом 20-секундном интегрировании. Шум по истечении 2000 с окажется в 10 раз слабее. Таким образом, этот сигнал, безвредный в каждом 20-секундном интегрировании, будет, спустя 2000 с, на 5 дБ выше уровня недопустимых помех.

Иными словами, импульсный сигнал ведет себя точно так же, как и постоянный сигнал. И только периоды импульсов его продолжительнее, чем геометрическое среднее значение времени интегрирования и 2000 с, что может стать причиной дополнительных потерь данных в короткие периоды интегрирования, хотя уровень импульсной помехи не превышает предусмотренный в Рекомендации МСЭ-R RA.769 пороговый уровень недопустимых помех для 2000-секундного интегрирования. На практике это случается достаточно редко.

3.4.6 Итог

Эти расчеты показывают, исходя из предположения, что импульсная помеха не превышает предусмотренный в Рекомендации МСЭ-R RA.769 пороговый уровень недопустимых помех для 2000-секундного наблюдения, следующее:

- 1) Излучения радаров и другие импульсные излучения с периодами менее 40 с, средняя мощность которых снижается до уровня недопустимых помех за 2000 с, установленного в Рекомендации МСЭ-R RA.769, не приведут к дополнительной потере данных > 2%.
- 2) Для измерений с продолжительностью наблюдения в 40 с мощность импульса в худшем случае для дополнительной потери данных > 2% на 1,5 дБ ниже мощности шума системы, причем только для чрезвычайно редких импульсов (1 за 2000 с) и при отсутствии каких-либо мер по ослаблению помех, синхронизирующих выборку данных в антикорреляции с регулярными импульсами.
- 3) Аperiodические помехи и/или помехи меняющейся мощности приведут к потере данных на уровне периодических импульсов постоянной мощности или ниже.

4 Выводы

Считается, что практический критерий для суммарной потери данных от помех РАС составляет 5% времени от всех источников. Существование многих перекрывающихся источников помех является практическим аспектом, который следует учитывать. Требуются дополнительные исследования распределения доли суммарной помехи между различными сетями.

Потеря данных из какой-либо одной системы должна быть значительно меньше 5%. Чтобы соответствовать этому требованию, устанавливается практический предел в 2% для одной системы.
