

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R RA.1237-2
(01/2010)

**Защита радиоастрономической службы от
нежелательных излучений, вызванных
применением широкополосной
цифровой модуляции**

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.1237-2*

**Защита радиоастрономической службы от нежелательных излучений,
вызванных применением широкополосной цифровой модуляции**

(Вопрос МСЭ-R 145/7)

(1997-2003-2010)

Сфера применения

Настоящая Рекомендация касается защиты радиоастрономической службы от нежелательных излучений, вызванных применением широкополосной цифровой модуляции. Техническая информация представлена в Приложении 1, главным образом по уровням помех радиоастрономии от спутниковых систем. В Рекомендации рекомендуется, чтобы для систем, применяющим методы широкополосной цифровой модуляции, принимались все практически возможные меры для уменьшения нежелательных излучений.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что радиоастрономическая служба и другие пассивные службы продолжают вносить важный и значительный вклад в науку;
- b) что прогресс в научных исследованиях в радиоастрономии в огромной мере зависит от возможности проводить наблюдения на самых пределах чувствительности;
- c) что все службы получают пользу от мер, которые снижают или устраняют нежелательные излучения в спектре;
- d) что в Резолюции 739 (Пересм. ВКР-15) определяется процедура консультаций, которой необходимо следовать, когда нежелательные излучения от некоторых линий вниз в космической службе, действующих в конкретных полосах, превышают уровень вредных помех в некоторых полосах радиоастрономии;
- e) что в передатчиках, особенно установленных на космических станциях, все больше используются расширение спектра с применением прямой последовательности (DSSS) и другие методы широкополосной цифровой модуляции, которые могут производить нежелательные излучения в боковых полосах, достигая частот, значительно удаленных от несущей частоты, как это объясняется в Приложении 1;
- f) что были разработаны и успешно используются технические средства фильтрации нежелательных излучений в боковых полосах;
- g) что известны эффективные с точки зрения спектра методы цифровой модуляции, которые по своей природе вызывают нежелательные излучения низких уровней, и такие методы были продемонстрированы;
- h) что с точки зрения службы, испытывающей помехи в распределенной полосе, находящейся вне полосы, которая распределена службе, производящей нежелательные излучения, не существует практической разницы между побочными и внеполосными помехами,

отмечая,

- a) что примеры спутниковых систем, где используется модуляция DSSS, которая может причинять помехи радиоастрономической станции, приводятся в Отчете МСЭ-R SM.2091,

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

рекомендует,

1 что для систем, в которых применяются методы широкополосной цифровой модуляции, следует принимать все практически возможные меры для уменьшения уровня боковых полос, находящихся вне распределенной службы полосы, принимая во внимание руководство, представленное в Приложении 1.

Приложение 1

Помехи для радиоастрономии от нежелательных (побочных и внеполосных) излучений, вызванных применением широкополосной цифровой модуляции

1 Введение

Накопленный опыт показал, что существенная часть помех, наносящих серьезный ущерб радиоастрономии, исходит от передатчиков, установленных на спутниках. Большая часть таких помех вызывается нежелательными излучениями, т. е. интермодуляционными и другими нелинейными эффектами и расширенными боковыми полосами цифровых передач, которые иногда во много раз превышают распределенную ширину полосы вне присвоенной полосы спутникового передатчика. Расположение обсерватории в месте, которое хорошо защищено от наземных передатчиков, не обеспечивает защиты от спутниковых излучений, а к спутникам нельзя применить настройку фильтров или другие методы ослабления помех. Таким образом, нежелательные излучения со спутников являются самой серьезной угрозой для радиоастрономической службы, особенно учитывая более широкое использование спутников для многих целей.

2 Побочные и внеполосные излучения от цифровой модуляции

Использование цифровой модуляции, включая модуляцию DSSS, может привести к расширению боковых полос. Описание этих боковых полос на основе побочных или внеполосных излучений содержится в пп. 1.144–1.146 Регламента радиосвязи (PP). Внеполосное излучение является результатом процесса модуляции, как и боковые полосы расширенного спектра, но оно определяется как излучение *непосредственно* за пределами необходимой ширины полосы. Это обычно понимается таким образом, что диапазон частот внеполосных излучений в несколько раз шире, чем необходимая ширина полосы. Побочное излучение находится дальше за пределами необходимой ширины полосы и может быть уменьшено без воздействия на соответствующую передачу информации. В обоих случаях излучения действительно имеют характеристики боковых полос расширенного спектра. Боковые полосы этого типа могут создавать серьезные помехи в соседней полосе или в полосе, более удаленной по частоте. Была разработана концепция областей нежелательных излучений (см. пп. 1.146A и 1.146B PP) в основном с целью пояснения определений.

3 Уровни помех для радиоастрономии

Пороговые уровни, на которых мешающие сигналы становятся недопустимыми для радиоастрономии, приводятся в Рекомендации МСЭ-R RA.769. Они даны в форме принимаемой мощности на входе антенны, спектральной плотности принимаемой мощности плотности потока мощности (п.п.м.) и спектральной плотности потока мощности (с.п.п.м.) в радиоастрономической антенне и рассчитываются по всему спектру для репрезентативных серий полос для радиоастрономии. Указанные в таком виде уровни помех широко применимы к большому количеству активных служб, которые могут причинять помехи радиоастрономии.

В Приложении 3 PP определяются пределы побочных излучений в показателях мощности линии передачи антенны. Однако такие пределы не были определены с учетом защиты пассивных служб, и поэтому в некоторых случаях они могут быть недостаточными для защиты РАС. Кроме того, для толкования таких пределов на основе помех радиоастрономии необходимо будет знать подробные

сведения о характеристиках передающей антенны для каждого потенциального источника помех, а также потери на трассе между такими передающими антеннами и любой радиоастрономической антенной. Более того, указанные в таком виде пределы не подходят в случае активных антенных решеток, где нет единого порта выхода передатчика. Такого рода соображения дают основания считать, что пределы излучения лучше всего указывать в показателях эффективной изотропно излучаемой мощности (э.и.и.м.) в направлении радиообсерватории.

В качестве примера использования э.и.и.м. рассмотрим случай передатчика на геостационарном спутнике. Поскольку любой такой спутник виден над горизонтом на большей части поверхности Земли, вероятно, что боковые лепестки направлены в сторону одной или нескольких радиообсерваторий. Однако зона обслуживания линии вниз может охватывать относительно небольшую область Земли, которая может не включать радиообсерваторию. Поэтому разработчик спутниковой системы может решить уменьшить реагирование боковых лепестков в качестве одной из мер, направленных на недопущение помех радиоастрономии. Это будет возможным, если указаны пределы в показателях э.и.и.м. в направлении обсерватории. Однако если пределы определены в показателях мощности передающей линии антенны, как в настоящее время это сделано в Приложении 3 РР, то необходимо будет предположить в качестве наихудшего случая, что все усиление передающей антенны может оказаться направленным в сторону обсерватории. Такие пределы соблюдать будет гораздо сложнее. Поэтому представляется, что значения э.и.и.м. в направлении радиоастрономической антенны обеспечивают более подходящую форму для указания пределов для нежелательных излучений в целях защиты радиоастрономии. Этот вывод применим в равной степени к любому типу передачи, в том числе передатчиков наземного базирования. Значения э.и.и.м. могут быть выведены на основе значений п.п.м. или с.п.п.м., приведенных в Рекомендации МСЭ-R RA.769, если известны потери при распространении.

Следует также отметить, что при расчете помех уровни нежелательных излучений должны быть известны в абсолютных величинах, а не в децибелах по отношению к основной передаче. Во многих случаях нежелательное излучение будет значительно удалено по частоте от основной передачи, а служба, испытывающая помехи, и основная передача будут занимать различные распределенные полосы. Поэтому логично указывать пределы в абсолютных единицах мощности, п.п.м. или с.п.п.м., а не в виде коэффициента от основного излучения.

4 Помехи от спутников

Помехи станциям РАС поступают от линий вниз спутниковой службы ГСО или НГСО. В первом случае помехи не будут различаться в зависимости от местоположения. Во втором случае мощность помех будет изменяться в зависимости от времени и местоположения на небе. В результате эти оба случая рассматриваются отдельно.

В полосах, где преобладают непрерывные наблюдения, ширина полосы, используемая для расчета порогового уровня вредных помех, представляет собой ширину полосы, распределенную РАС (см. таблицу 1 Рекомендации МСЭ-R RA.769). В полосах, где преобладают наблюдения спектральных линий, ширина полосы канала, используемая для расчета пороговых уровней помех, представляет собой предполагаемую ширину полосы канала спектральной линии приемника РАС (см. таблицу 2 Рекомендации МСЭ-R RA.769).

4.1 Нежелательные излучения от спутниковых систем ГСО (линия вниз)

П.п.м. нежелательных излучений можно определить следующим образом:

$$п.п.м._{нежелательного\ излучения} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{P(f) \cdot g(f)}{SL \cdot ATM(f)} df, \quad (1)$$

где:

п.п.м. нежелательных излучений: п.п.м. на станции РАС (Вт/м²);

f_1, f_2 : нижняя и верхняя границы соответственно эталонной ширины полосы РАС (Гц);

$p(f)$: плотность мощности нежелательного излучения на фланце передающей антенны (Вт/Гц);

$g(f)$: усиление передающей антенны в направлении месторасположения радиоастрономической станции;

SL : потери на расходимость пучка (дБ);

$ATM(f)$: поглощение в атмосфере в полосе $f_1 - f_2$ как функция от частоты.

Следует отметить, что плотность мощности передаваемого сигнала, усиление подсистемы антенны и поглощение в атмосфере различаются в зависимости от частоты и в связи с этим представляются как функция от частоты. П.п.м. нежелательных излучений в местоположении станции РАС является интегралом от этих функций, как показано выше, по частоте полосы пропускания приемника. В случаях если плотность мощности нежелательного излучения, усиление антенны и поглощение в атмосфере – постоянные значения по всей ширине полосы приемника пассивной службы, эту функцию можно упростить следующим образом:

$$п.п.м._{нежелательного\ излучения} = \frac{P \cdot g}{SL \cdot ATM} (f_2 - f_1). \quad (2)$$

В случаях если активная полоса расположена рядом с пассивной полосой, можно будет предположить, что усиление передающей антенны остается примерно постоянной величиной как в передающей полосе, так и в пассивной полосе. Однако такой случай будет представляться редко, особенно когда пассивная полоса ниже граничной частоты сети с волноводным питанием в подсистеме антенны.

Затем этот уровень п.п.м. требуется сравнить с пороговыми уровнями, приведенными в Рекомендации МСЭ-R RA.769.

4.2 Нежелательные излучения от спутниковых систем НГСО (линия вниз)

Для оценки помех от систем НГСО фиксированной спутниковой службы (ФСС) станциям РАС, в дополнение к приведенным выше расчетам, дающим значение п.п.м. для одного конкретного спутника, следует использовать методику, приведенную в Рекомендации МСЭ-R S.1586. Таким же образом для оценки помех от систем НГСО подвижной спутниковой службы (ПСС) и радионавигационной спутниковой службы (РНСС) станциям РАС следует использовать методику, приведенную в Рекомендации МСЭ-R M.1583.

5 Нежелательные излучения от спутников, в особенности касающиеся радиоастрономии

5.1 Расширение спектра с применением прямой последовательности

При отсутствии формирования импульса этот тип модуляции приводит к спектру мощности, который имеет вид синусоидальной функции, возведенной в квадрат, частоты с весьма широкими боковыми полосами. Если f – это частота, измеряемая от несущей частоты, а T – базовый период функции распространения, то спектр имеет следующий вид:

$$(\sin(\pi f T) / (\pi f T))^2. \quad (3)$$

Уровни пиковой мощности в боковых полосах ослабевают, поскольку f^{-2} , т. е. в f имеется только 6 дБ на октаву. В худшем случае излучаемый спектр соответствует уравнению (3) в широком диапазоне частот и может приводить к серьезным помехам для радиоастрономии на частотах, достаточно отдаленных от несущей. Однако в системах, где применяются такие методы, как правило фильтрами промежуточной частоты (ПЧ) на приемнике принимается только центральный максимум передаваемого спектра, так что дополнительные боковые полосы являются нежелательными излучениями. Это может не относиться к сигналам РНСС, для которых в процессе корреляции может потребоваться учитывать также боковые лепестки, чтобы получить достаточную точность для местоположения, определяемого системой (см. Отчет МСЭ-R SM.2091).

Устранение нежелательных боковых полос расширенного спектра вблизи несущей с помощью фильтрации на несущей частоте может оказаться практически невыполнимым, если несущая расширенного спектра находится близко к полосе радиоастрономии. Альтернативный подход к уменьшению нежелательных боковых полос состоит в изменении процесса модуляции, с тем чтобы их ослабить. Точной формы спектра можно добиться с помощью современных методов цифровой обработки (например, гауссовской минимальной манипуляции), действуя на уровне основной полосы сигналов расширенного спектра.

С тем чтобы не превышать пороговые уровни, недопустимые для радиоастрономической службы, системам, в которых используется DSSS, требуется снизить уровни боковых полос, используя сочетание фильтрации и формирования спектра. Эти методы уже использовались во всех работающих системах РНСС, хотя в будущем могли бы потребоваться дальнейшие усовершенствования некоторых из этих систем.

Проблемы помех спутникам от более широких боковых полос расширенного спектра или других нежелательных излучений могли бы также возникать в результате распределений для передач космос-Земля подвижной спутниковой службы в полосах 137–138 МГц, 387–390 МГц и 400,15–401 МГц. В этом случае полосами радиоастрономии являются 150,05–153 МГц, 322–328,6 МГц, 406,1–410 МГц и, возможно, 608–614 МГц. Рассматриваемые полосы радиоастрономии – это часть полос, используемых для наблюдений за излучениями линии нейтрального водорода, сильно смещенными в сторону красного спектра, которые дают возможность научных исследований самых отдаленных частей вселенной. Для таких исследований полосы радиоастрономии на частотах ниже 1400 МГц обеспечивают уникальные возможности, имеющие огромное научное значение, которые нельзя заменить наблюдениями в других полосах частот.

5.2 Фазовая модуляция цифровых сигналов

Передача цифровых данных с использованием двухпозиционной фазовой манипуляции (ДФМН) или квадратурной фазовой манипуляции (КФМН) приводит к созданию в спектрах такой же синусоидальной функции, возведенной в квадрат, что и при расширении спектра с применением прямой последовательности. В этом случае T в уравнении (3) представляет период в один бит, если используется ДФМН, и период в два бита, если используется КФМН. Для более высоких скоростей передачи данных боковые полосы могут вызывать не меньшие проблемы, чем при расширении спектра. В этих случаях могут применяться такие же решения: фильтрация или ослабление боковых полос в процессе модуляции.

Пример другой формы широкополосной цифровой модуляции, которая может создавать проблемы для радиоастрономии, связан с распределением цифровому звуковому радиовещанию (DAB) полосы 1452–1492 МГц, которая используется как для наземных, так и для спутниковых передач. Боковые полосы при таких передачах попадают в полосу 1400–1427 МГц радиоастрономии, и если они не будут в достаточной степени ослаблены, они могут превышать порог помех для радиоастрономии. Принятая форма модуляции – кодированное ортогональное частотное разделение каналов (COFDM), состоит из 1536 отдельных несущих, каждая с КФМН модуляцией и со спектром мощности с формой, описанной в уравнении (3), при $T = 1,25$ мс. Каждая из них представляет собой узкополосный цифровой канал модуляции. Несущие разнесены на 1 кГц. Итоговый комбинированный спектр мощности выровнен по полосе 1,54 МГц и резко падает примерно на 45 дБ на краю полосы. Крайний уровень боковой полосы снижается примерно как f^{-2} , где f – частота, измеряемая от центра комбинированной полосы. Может потребоваться дополнительная фильтрация для недопущения того, чтобы совокупная с.п.п.м. нежелательного бокового сигнала превышала порог помех для радиоастрономии. Такая фильтрация не может вредить работе системы COFDM, которая специально разработана таким образом, чтобы быть невосприимчивой к дополнительной фильтрации. В случае использования какой-либо альтернативной формы модуляции для DAB в этой полосе, могла бы возникнуть проблема помех, которая должна решаться путем координации между наземным DAB и радиоастрономией.

6 Побочные и внеполосные излучения от наземных передатчиков

Побочные и внеполосные излучения от наземных передатчиков часто доставляют меньше неприятностей радиоастрономии, чем излучения со спутников или воздушных судов, поскольку радиоастрономические обсерватории часто расположены в отдаленных местах, выбранных с таким расчетом, чтобы использовать экранирующее влияние рельефа местности. Однако, в качестве примера, передачи на линии вверх от наземных станций в полосе 1610–1626,5 МГц могут вступать в конфликт с использованием в радиоастрономии полосы 1610,6–1613,8 МГц. Поскольку радиоастрономическая служба имеет распределение на первичной основе в полосе 1610,6–1613,8 МГц, которое также защищается в соответствии с пп. 5.364 и 5.372 РР от нежелательных излучений ПСС, работающей в полосе 1610–1626,5 МГц, может быть необходима координация. Линии вверх некоторых систем могут использовать передачи DSSS, и при отсутствии координации их боковыми полосами могут причиняться помехи, даже если полезный центральный лепесток излучаемого спектра не попадает в полосу радиоастрономии.
