

# МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R P.679-4**  
(07/2015)

**Данные о распространении радиоволн,  
необходимые для проектирования  
спутниковых радиовещательных систем**

**Серия Р**  
**Распространение радиоволн**



## 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
<b>BO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	<b>Распространение радиоволн</b>
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	Управление использованием спектра
<b>SNG</b>	Спутниковый сбор новостей
<b>TF</b>	Передача сигналов времени и эталонных частот
<b>V</b>	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, 2016 г.

© ITU 2016

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 P.679-4

**Данные о распространении радиоволн, необходимые  
для проектирования спутниковых радиовещательных систем**

(Вопрос МСЭ-R 206/3)

(1990-1992-1999-2001-2015)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что для надлежащего планирования спутниковых радиовещательных систем необходимо иметь соответствующие данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования;
- b) что для планирования систем связи Земля–космос рекомендуются методы, изложенные в Рекомендации МСЭ-R P.618;
- c) что необходимо дальнейшее развитие методов прогнозирования для конкретного применения в радиовещательных спутниковых системах в целях достижения достаточной точности для всех условий эксплуатации;
- d) что при этом существуют методы, обеспечивающие достаточную точность для многих применений;
- e) что в Рекомендации МСЭ-R P.2040 представлено руководство в отношении влияния свойств строительных материалов и структуры зданий на распространение радиоволн,

*рекомендует*

**1** принять данные о распространении радиоволн, представленные в Приложении 1, для планирования спутниковых радиовещательных систем в дополнение к методам, предложенным в Рекомендации МСЭ-R P.618.

## Приложение 1

### **1 Введение**

При планировании систем спутникового радиовещания необходимо учитывать особенности распространения радиоволн, которые не всегда совпадают с особенностями распространения волн, используемых в фиксированной спутниковой службе. Данные об ослаблении сигнала в направлении космос–Земля должны быть представлены в виде статистических средних величин или контурных карт ослабления и деполяризации сигнала для больших зон. На границе зоны обслуживания могут возникать специфические проблемы, связанные с координацией между спутниковыми радиовещательными системами и наземными или другими космическими службами. В Рекомендации МСЭ-R P.618 представлены общие методы прогнозирования явлений, связанных с распространением радиоволн на трассе Земля-космос. В настоящем Приложении рассматривается дополнительная информация по планированию спутниковых радиовещательных систем. Следует отметить, что фидерные линии рассматриваются как часть фиксированных спутниковых служб и не относятся к службам радиовещания.

Для систем радиовещания может потребоваться рассмотрение некоторых явлений, связанных с распространением радиоволн на трассе космос–Земля.

К ним относятся:

- тропосферные явления, включая поглощение в газах, а также ослабление и деполяризация сигналов в дожде и других атмосферных осадках;
- ионосферные явления, такие как мерцание и вращение Фарадея (см. Рекомендацию МСЭ-R P.531);
- локальное воздействие окружающей среды, включая ослабление сигналов зданиями и растительностью.

В настоящем Приложении рассматриваются указанные явления и приводятся ссылки на дополнительную информацию, содержащуюся в других Рекомендациях. Для определения характеристик явлений, ухудшающих распространение радиосигналов спутниковых радиовещательных служб, необходимы дополнительные данные.

## **2 Тропосферные явления**

На частотах ниже 1 ГГц и при углах места трассы более 10° ухудшение сигнала, связанное с влиянием тропосферы, пренебрежимо мало.

По мере уменьшения угла места и/или увеличения частоты ухудшение становится все более существенным, а колебания амплитуды и угла прихода сигнала могут достигать значительных величин (см. Рекомендацию МСЭ-R P.618). Последние из упомянутых явлений особенно критичны для зон обслуживания, расположенных на высоких широтах. Повышение шумовой температуры неба, обусловленное осадками (см. Рекомендацию МСЭ-R P.618), вызывает еще большее снижение отношения сигнал/шум принимаемого сигнала. Кроме того, отложения снега и льда на отражателе и фидере способны значительно ухудшить точность наведения, усиление и кроссполяризационные характеристики антенны в течение значительной части года.

### **2.1 Ослабление сигнала в тропосфере**

Причинами потерь в тропосфере являются поглощение сигналов газами, а также ослабление в дожде и других атмосферных осадках. Кроме того, незначительные колебания индекса преломления атмосферы вызывают мерцание сигнала, способствующее как замиранию, так и повышению качества сигнала.

#### **2.1.1 Ослабление в атмосферных газах**

Рекомендуемый метод прогнозирования ослабления в газах на трассах Земля–спутник приведен в Рекомендации МСЭ-R P.618. На большинстве частот ослабление в газах не столь важно, как ослабление в дожде. Однако в полосе 22 ГГц, распределенной радиовещательной спутниковой службе в ряде районов, поглощение парами воды может быть довольно высоким. Например, в местах, где ослабление на трассе сигнала 22,75 ГГц превышает 9,5 дБ в течение 1% времени худшего месяца, примерно 3 дБ из них являются результатом поглощения в газах.

#### **2.1.2 Ослабление вследствие облачности и осадков**

Процедура прогнозирования ослабления сигнала вследствие облачности и осадков, а также несложный метод частотного масштабирования результатов измерения ослабления приведены в Рекомендации МСЭ-R P.618. Ослабление сигнала вследствие облачности не является значительным на частотах ниже 30 ГГц и всегда учитывается при применении метода прогнозирования ослабления в дожде. Ослабление вследствие тумана и облачности может быть рассчитано на основе данных о влагосодержании при помощи метода, приведенного в Рекомендации МСЭ-R P.840.

### 2.1.3 Ослабление в дожде для наихудшего месяца

В сфере применения спутникового радиовещания наибольшие проблемы, как правило, вызывает ослабление в дожде, превышенное в течение 1% времени худшего месяца. Метод соотнесения процентных долей времени наихудшего месяца с процентными долями времени в году для ослабления в дожде приведен в Рекомендации МСЭ-R P.618. Полное исследование методики сбора данных для наихудшего месяца и ее основ приводится в Рекомендации МСЭ-R P.581.

Имеющиеся данные по ослаблению в дожде для наихудшего месяца содержатся в таблице П-2 базы данных 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи (см. Рекомендацию МСЭ-R P.311).

### 2.1.4 Суточные колебания замирования сигнала

Зависимость замирования сигнала от времени суток является важным аспектом деятельности спутниковой радиовещательной службы. Данные по замированию, полученные в различных районах земного шара, демонстрируют общую тенденцию к повышению величины замирования в дневные и предвечерние часы. В климатических зонах с частыми грозами повышенная вероятность глубокого замирования связана со временем максимальной грозовой активности в данной местности. В частности, значительная суточная асимметрия наблюдается в тропических районах.

С другой стороны, незначительное замирание распределяется более равномерно как в течение года, так и в течение суток.

### 2.1.5 Замирание сигнала вследствие мерцания

Незначительные отклонения индекса преломления тропосферы могут вызывать быстрые изменения амплитуды сигнала. Мерцания сигнала, как правило, не оказывают значительного влияния на характеристики системы на частотах ниже 10 ГГц и при углах места выше 10°, однако при более низких углах места и высоких частотах их влияние может быть существенным, особенно на линиях с небольшим энергетическим запасом. Рекомендуемый метод расчета замирования вследствие мерцания приведен в Рекомендации МСЭ-R P.618.

## 2.2 Деполяризация

Гидрометеоры, главным образом скопления капель дождя и кристаллов льда, могут вызывать статистически достоверную деполяризацию сигналов на частотах выше 2 ГГц. Рекомендуемая процедура прогнозирования данных явлений содержится в Рекомендации МСЭ-R P.618.

## 3 Ионосферные явления

На частотах ниже 3 ГГц ионосферные явления влияют на распространение сигналов на некоторых трассах и в некоторых районах. Максимальные расчетные значения ионосферных явлений для общетехнического использования (полученные из Рекомендации МСЭ-R P.531) сведены в таблице 1 для различных частот. Как правило, наибольшую проблему представляют такие явления, как мерцание сигнала и (только для линейно-поляризованных волн) вращение Фарадея.

ТАБЛИЦА 1

**Расчетные значения\* ионосферных явлений для значений угла места около 30°  
при одностороннем прохождении сигнала\*\***  
(взято из Рекомендации МСЭ-R P.531)

Явление	Зависимость от частоты	0,5 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц
Вращение Фарадея	$1/f^2$	1,2 оборота	108°	12°	1,1°
Задержка распространения	$1/f^2$	1 мкс	0,25 мкс	0,028 мкс	0,0025 мкс
Преломление	$1/f^2$	< 2,4'	< 0,6'	< 4,2"	< 0,36"
Отклонение в направлении прибытия (среднеквадратическое значение)	$1/f^2$	48"	12"	1,32"	0,12"
Поглощение (зоны полярных сияний и полюсов)	$\approx 1/f^2$	0,2 дБ	0,05 дБ	$6 \times 10^{-3}$ дБ	$5 \times 10^{-4}$ дБ
Поглощение (на средних широтах)	$1/f^2$	< 0,04 дБ	< 0,01 дБ	< 0,001 дБ	< $1 \times 10^{-4}$ дБ
Дисперсия	$1/f^3$	0,0032 пс/Гц	0,0004 пс/Гц	$1,5 \times 10^{-5}$ пс/Гц	$4 \times 10^{-7}$ пс/Гц
Мерцание <sup>(1)</sup>			> 20 дБ размах	$\approx 10$ дБ размах	$\approx 4$ дБ размах

\* Данный расчет основан на полном электронном содержании (ПЭС), равном 10 электронов/м<sup>2</sup>. Столь высокое значение ПЭС наблюдается на низких широтах в дневное время при высокой солнечной активности.

\*\* На частотах выше 10 ГГц влияние ионосферных явлений пренебрежимо мало.

<sup>(1)</sup> Значения, наблюдаемые вблизи геомагнитного экватора в ранние ночные часы (по местному времени) во время равноденствия в условиях большого числа солнечных пятен.

#### 4 Влияние местных условий

В некоторых случаях местные строения и растительность могут оказывать существенное влияние на условия приема сигналов. Результаты последних измерений на частоте 5 ГГц показали, что потери на входе в здание сильно зависят от углов места и азимута. Эти данные дополняют результаты измерений, полученные в полосах частот ниже 3 ГГц. К сожалению, данных, относящихся к спутниковому радиовещанию, недостаточно для исчерпывающей характеристики этих явлений.

##### 4.1 Потери на входе в здание

Материалы, касающиеся потерь на входе в здание, представлены в Рекомендации МСЭ-R P.2040.

##### 4.2 Потери на входе в транспортное средство

Результаты измерений сигнала, проникающего в транспортное средство, довольно немногочисленны и получены с использованием наземных методов, аналогичных описанным выше. Один из циклов измерений проводился на частоте 1600 МГц с использованием смоделированных углов места трассы от 8° до 90°, двух различных антенн (двумерного микрополоскового излучателя и квадрофилярной спиральной), различных типов транспортных средств (устанавливаемых на поворотном стенде в целях измерения уровня сигнала как функции направления прибытия) и различных положений

пользователя устройства внутри транспортного средства. Сбор данных производился при опущенных стеклах автомобиля. Типичные избыточные потери на трассе (определяемые как средний уровень сигнала, измеренный внутри автомобиля, минус медианный уровень замираний, наблюдаемый при измерениях в открытом поле с использованием того же типа антенны и положения кузова, что и при измерении внутри автомобиля) находились в диапазоне от 3 до 8 дБ на среднем уровне и от 4 до 13 дБ на уровне 90-й перцентиля.

На основе этих данных сделаны следующие общие выводы и заключения:

- уровень сигнала внутри транспортных средств подчиняется распределению Рэлея, что подразумевает отсутствие в большинстве случаев прямой трассы распространения сигнала (LoS), при этом принимаемый сигнал складывается путем многолучевого рассеяния по краям отверстий в кузове автомобиля (например, окон);
- потери на 90-й перцентили составляют 15–20 дБ при всех углах места;
- потери лишь незначительно зависят от угла места трассы, однако для антенн, расположенных на уровне головы и на уровне пояса, зависимость от угла места различается;
- тип транспортного средства не оказывает существенного влияния на потери при входе сигнала;
- расположение пользователя устройства внутри транспортного средства не оказывает существенного влияния на потери;
- медианное значение дополнительных потерь на трассе (относительно измерений в открытом поле) имеет логарифмически-нормальное распределение;
- патч-антенна демонстрирует меньшие потери на трассе, чем антенна, расположенная на уровне головы (поскольку высокая направленность вызывает более высокие потери в открытом поле, которые не сильно ухудшаются при размещении антенны внутри автомобиля); и
- при угле места  $8^\circ$  среднее медианное значение дополнительных потерь на трассе для всех типов транспортных средств составило 3,7 дБ для антенн на уровне головы, что сравнимо с медианным значением потерь 3,2 дБ на частоте 900 МГц, зафиксированным при входе сигнала в большой седан по горизонтальной трассе.

Можно считать, что данные результаты в целом соответствуют прогнозируемым значениям потерь при входе сигналов в транспортные средства.

### 4.3 Отражения и затенение зданиями

Измерения, полученные путем передачи с высокой радиомачты звуковых радиовещательных FM-сигналов с круговой поляризацией на частотах 839 МГц и 1504 МГц, показали, что при угле места около  $20^\circ$  изменение напряженности поля в зависимости от местоположения вблизи уровня улиц городской зоны достигает 15 дБ на частоте 839 МГц и 18 дБ на частоте 1504 МГц. Для сигналов, принимаемых при помощи антенн как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризацией, отклонения параметров практически одинаковы. Качество звука при колебаниях напряженности поля в условиях многолучевого распространения (даже на узких улицах с невыгодным расположением) ухудшается незначительно.

На городских и сельских территориях отражения от поверхности земли могут являться учитываемым фактором при определении предпочтительного типа поляризации, поскольку напряженность поля вертикально поляризованной волны, отраженной от поверхности, при угле псевдо-Брюстера падает до нуля, тогда как в случае горизонтально поляризованной волны этого не происходит. Таким образом, напряженность поля отраженной от земли волны с горизонтальной поляризацией, как правило, выше, чем у вертикально поляризованной волны (для случая гладкой поверхности Земли), а результатом суммирования прямой и отраженной волн будут более глубокие провалы и более высокие пики.

## **5 Статистическое распределение уровня сигнала для больших территорий**

Радиовещательный спутник должен обслуживать обширные территории, желательно с одинаковым качеством обслуживания на протяжении одинаковых в процентном отношении интервалов времени. Однако в разных частях зоны обслуживания (например, в разных климатических зонах) различные эффекты, связанные с распространением волн, могут по-разному влиять на качество услуг. Характеристики подобных различий могут быть получены при помощи скоординированных измерений, выполняемых в разных точках, распределенных по всей территории обслуживания. Полученные данные можно использовать как для оценки требований к абонентскому оборудованию, так и для определения условий воздействия помех на границе территории обслуживания. Однако количество таких данных невелико.

Из имеющихся данных видно, что суммарная вероятность выпадения дождя в разных местах составляет несколько процентов для расстояний до 500 км, а также что для расстояний менее 800 км нельзя говорить о статистической независимости. Для пар точек, разнесенных на 200 км, суммарная вероятность интенсивности дождевых осадков с превышением на 5 мм/ч может в пять раз превышать вероятность, полученную при допущении статистической независимости.

## **6 Статистическое распределение и частотная корреляция сигналов**

Измерения, полученные путем передачи сигнала на частоте 567,25 МГц с радиомачты высотой 515 м для моделирования спутникового сигнала, показывают, что для большинства точек размещения приемника распределение мгновенных значений огибающей сигнала близко к логарифмически-нормальному распределению. Если локальные препятствия вызывают ослабление сигнала более чем на 15 дБ относительно медианного уровня, распределение мгновенных значений приближается к распределению Рэлея.

В рамках этого же эксперимента была также измерена частотная корреляция между сигналами с разносами частот 0,15 МГц, 0,5 МГц, 1,0 МГц, 2,2 МГц, 4,4 МГц и 6,5 МГц. Как выяснилось, частотная корреляция снижается по мере увеличения разноса частот и лишь эпизодически и незначительно зависит от угла места.

---