

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.1321-5
(07/2015)

**Факторы распространения радиоволн,
влияющие на системы, использующие
методы цифровой модуляции на НЧ и СЧ**

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
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, 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.1321-5

**Факторы распространения радиоволн, влияющие на системы,
использующие методы цифровой модуляции на НЧ и СЧ**

(Вопрос МСЭ-R 225/3)

(1997-2005-2007-2009-2013-2015)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводится информация о характеристиках распространения земной и пространственной волн на НЧ и СЧ, которые могут влиять на использование методов цифровой модуляции в этих полосах.

Ключевые слова

Распространение в диапазоне СЧ, сезонное изменение

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что в настоящее время исследуются методы цифровой модуляции на НЧ и СЧ для звукового радиовещания;

b) что для выбора методов модуляции необходима информация о характеристиках распространения радиоволн на этих частотах,

рекомендует,

чтобы информация, содержащаяся в Приложении 1, принималась во внимание при разработке методов цифровой модуляции на НЧ и СЧ.

Приложение 1**1 Введение**

Большинство радиовещательных служб, работающих в НЧ и СЧ диапазонах, используют характеристики режима распространения посредством земной волны (см. Рекомендацию МСЭ-R P.368). Величина предельной зоны охвата в дневное время и при отсутствии помех определяется интенсивностью радиошумов, вызванных грозowymi разрядами и промышленными источниками (см. Рекомендацию МСЭ-R P.372), а также зависит от требуемого соотношения сигнал/шум. В темное время суток становятся важными режимы распространения в ионосфере посредством пространственной волны (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1147). В случае аналоговой амплитудной модуляции эти режимы ограничивают зону охвата, поскольку интерференция земных и меняющихся пространственных волн с задержкой по фазе ведет к тому, что качество принимаемого сигнала становится неудовлетворительным. В ночное время существенные дополнительные помехи могут быть вызваны также сигналами от других удаленных источников, распространяющимися посредством пространственной волны, что также может ограничить зону обслуживания до таких размеров, при которых достаточно сильный сигнал обеспечивается земной волной. Далее в настоящем приложении аспекты воздействия помех от других сигналов рассматриваться не будут.

Эффективность методов цифровой модуляции может зависеть также от присутствия мод с задержкой сигналов, однако при правильном планировании метода модуляции это явление можно компенсировать или даже использовать. В настоящем приложении приводятся некоторые очень простые модели, описывающие распространение в условиях многолучевости. Ожидается, что эти модели будут пригодны при разработке методов модуляции. В зависимости от выбранного метода модуляции может возникнуть необходимость в более точных методах прогнозирования, используемых при планировании обслуживания.

2 Режимы распространения радиоволн

2.1 Режим распространения посредством земной волны

Земная волна зачастую может быть нестабильной (см. п. 4). Как показано в Рекомендации МСЭ-R P.368, амплитуда сигнала зависит от дальности распространения и от электрических характеристик земли. Кроме того, амплитуда сигнала не остается постоянной при небольших изменениях местоположения (от нескольких сот метров).

2.2 Режимы распространения посредством пространственной волны

В дневное время суток ослабление сигнала в нижней части D-области ионосферы в значительной мере ограничивает использование распространения посредством пространственной волны. В этом Приложении акцент делается на ночные условия, когда распространение посредством пространственной волны может стать существенным моментом.

После захода солнца E-слой ионосферы уменьшается, однако критическая частота f_oE будет существовать в пределах СЧ диапазона радиовещания, по крайней мере, в течение первой половины ночи. Сигналы с частотой меньшей критической всегда будут отражаться от слоя E, поддерживая таким образом многоскачковое отражение. На более высоких частотах сигналы по-прежнему могут отражаться от слоя E, особенно при распространении на дальние расстояния, однако они будут также и проникать сквозь слой E, отражаясь затем от расположенного над ним слоя F. На рис. 1 с помощью простой модели слоя E показаны возможные моды сигнала для трех частот в СЧ диапазоне, а также продемонстрировано, как меняются моды в зависимости от дальности распространения и времени после захода солнца. Эти моды имеют временную задержку по сравнению с модой земной волны.

В Рекомендации МСЭ-R P.1147 изложен метод прогнозирования мощности сложного сигнала для возможных мод распространения посредством пространственной волны, однако этот метод не дает необходимой информации об относительных амплитудах отдельных мод. В Рекомендации МСЭ-R P.684 содержится такая информация, хотя она и предназначена в первую очередь для частот менее 500 кГц. В частности, в этой Рекомендации приводятся значения коэффициента ионосферного отражения в условиях минимума солнечной активности, полученные на экспериментальных результатах, а также на определенных предположениях, изложенных там же.

3 Разброс временных задержек в условиях многолучевости

На основе упомянутых выше простых моделей распространения на рис. 2 показаны ожидаемые медианные значения напряженности поля и относительные временные задержки для трех длин трасс, 100, 200 и 500 км, и двух частот, 700 кГц и 1 МГц. Напряженности поля рассчитаны для э.м.и.м. 1 кВт и не учитывают влияния диаграммы направленности передающей антенны в вертикальной плоскости, которое может выражаться в уменьшении уровней сигналов, распространяющихся посредством пространственной волны на более коротких расстояниях.

Мода, соответствующая 0 мс, относится к земной волне, а напряженности поля показаны для трех значений проводимости почвы; 5 Сим/м (морская вода), 10^{-2} (плодородная почва) и 10^{-3} (бедная почва).

На компонентах земной волны указаны соответствующие моды и приблизительные уровни медианных значений напряженности поля для четырех часов после захода солнца при минимуме солнечной активности.

РИСУНОК 1

Возможные моды распространения

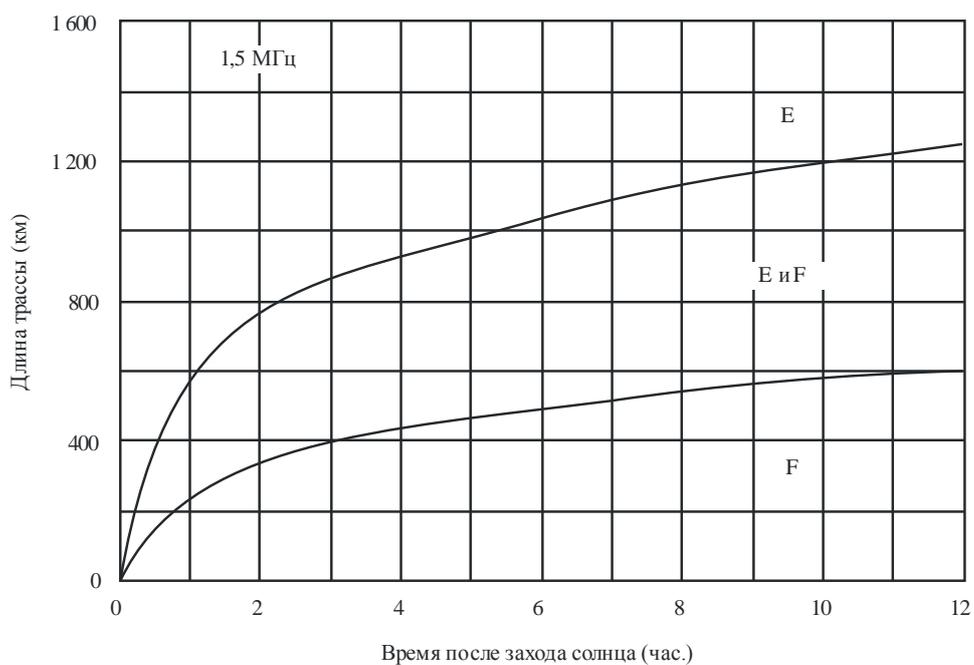
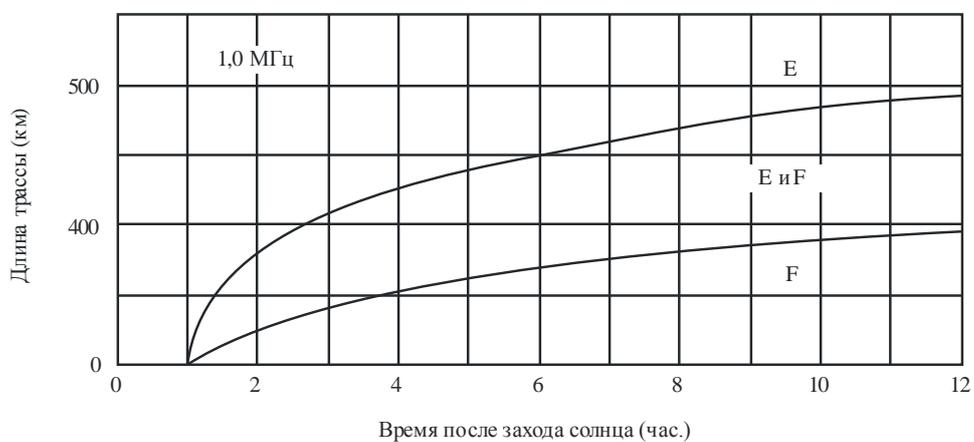
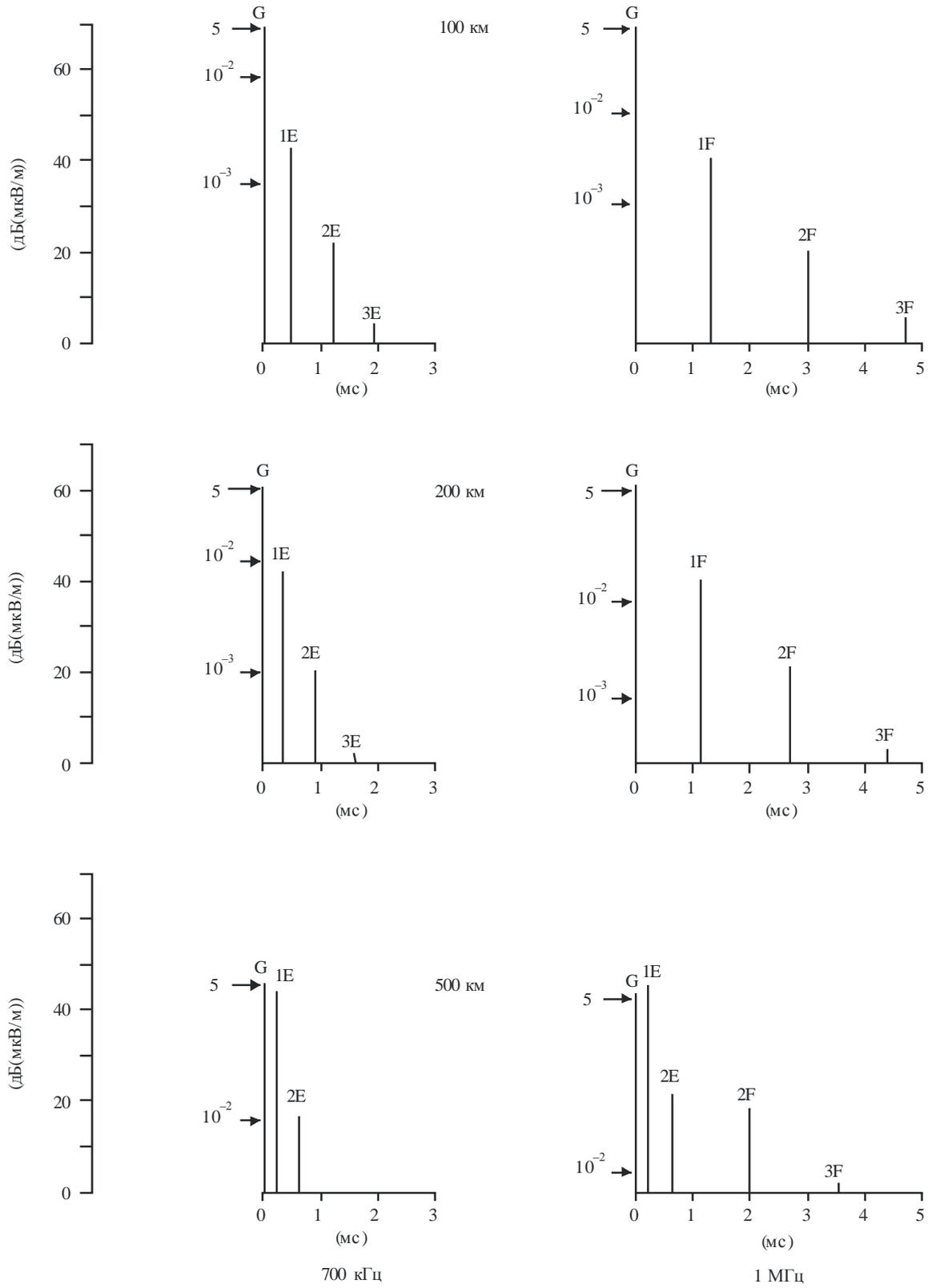


РИСУНОК 2

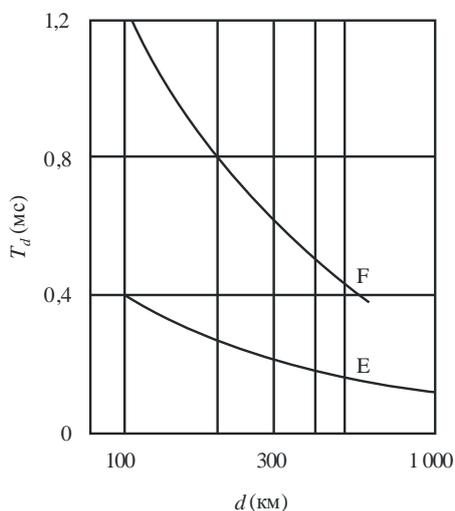
Примеры разброса временных задержек



На рис. 3 показана задержка односкачковых пространственных мод, отраженных от областей E и F, по отношению к земной волне для трасс протяженностью до 1000 км, а на рис. 4 приведены относительные задержки между одно- и многоскачковыми модами пространственной волны.

РИСУНОК 3

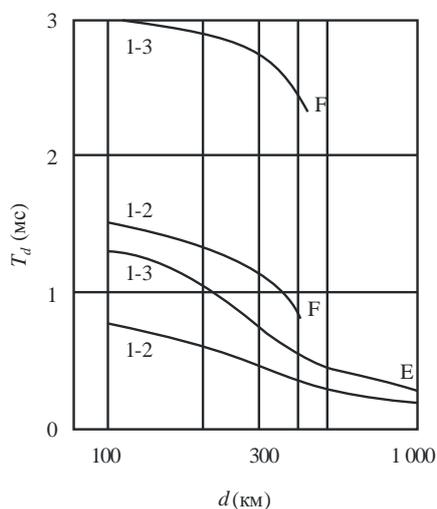
Задержка сигнала пространственной волны относительно сигнала земной волны



P.1321-03

РИСУНОК 4

Общая задержка сигналов, распространяющихся посредством пространственной волны, для различного числа скачков



P.1321-04

Особый интерес представляет диапазон расстояний, для которого амплитуды сигналов, распространяющихся посредством земной и пространственной волны, примерно одинаковы, поскольку замирения, возникающие в этом диапазоне расстояний, чрезвычайно существенны. Этот диапазон был назван "зоной ночных замирений" и часто является ограничивающим фактором при определении радиуса действия СЧ радиовещания с хорошим качеством.

4 Изменчивость

4.1 Изменения сигнала во времени в дневное время

4.1.1 Сезонные изменения

Напряженность поля наземных радиоволн может изменяться в зависимости от сезонных температур.

В диапазоне СЧ на средних широтах в условиях континентального климата и высокой плотности лесистой местности диапазон сезонных изменений напряженности поля земных волн в каналах протяженностью до примерно 100 км в среднем лежит в пределах 10–18 дБ. Меньшие диапазоны характерны для каналов, начинающихся в крупном городе (10 дБ) или пересекающих город (до 15 дБ). Более широкие диапазоны характерны для каналов в сельской местности (15–18 дБ). Подобные результаты можно ожидать в других регионах с аналогичными климатическими и природными условиями.

Пункт выше относится к восточноевропейской зоне, где средняя температура января составляет -10°C . В других географических зонах средний диапазон сезонных изменений зависит от средней температуры января, как показано в таблице 1, так как для каналов с аналогичными характеристиками почвы/растительности изменения различаются только по январской температуре. Целесообразно провести приблизительную оценку сезонного изменения напряженности поля, пропорциональную диапазону температур, с учетом различий в климатических условиях разных географических зон. Например, используя данные предыдущего пункта и таблицы 1, для канала, начинающегося в городе, где температура января составляет $+4^{\circ}\text{C}$, получим диапазон напряженности поля приблизительно равный $10 \times (4/13) \approx 3$ дБ, а для каналов в сельской местности – приблизительно равный $(15 \dots 18) \times (4/13) \approx (4,6 \dots 5,5)$ дБ.

ТАБЛИЦА 1

Средняя температура января для северного полушария ($^{\circ}\text{C}$)	4	0	-10	-16
Диапазон изменений уровней напряженности поля зима-лето (дБ)	4	8	13	15

На НЧ диапазон изменений напряженности поля на средних широтах в континентальном климате (измеренный в континентальной Европе и районе Сибири) зависит от расстояния и частоты, подчиняясь параметру $q = d \cdot f^{1/2}$, где d – расстояние (км) и f – частота (МГц). Для изменений в случае земных волн характерны значения q приблизительно меньше 500, а в случае ионосферных пространственных волн характерны более высокие значения q , превышающие 500.

Соответствующие формулы для диапазона изменений имеют вид:

– для трасс с незначительной долей лесных массивов:

$$U_{s/w} = 3 + 2 \times 10^{-5} \times q^2 + 0,005q \quad \text{дБ};$$

– для трасс с большой долей лесных массивов:

$$U_{L/w} = 6,409 \times \ln(q) - 21,124 \quad \text{дБ}.$$

Здесь индексы s/w и L/w обозначают небольшую долю лесных массивов (примерно до 30%) и большую долю лесных массивов (свыше 50%), соответственно.

4.1.2 Изменения медианного почасового значения по дням

Для значения среднеквадратического отклонения (RMS) (σ_L для НЧ и σ_M для СЧ) медианная почасовая напряженность поля от месячного медианного значения на НЧ зависит от протяженности трассы, тогда как на СЧ она зависит от частоты.

На НЧ в средних широтах со средней долей лесных массивов эта зависимость составляет:

$$\sigma_L = 0,073 d^{0,5} + 0,00122 d \quad \text{дБ.}$$

На СЧ отклонение RMS с частотой для трасс от 20 км до 120 км без разделения по временам года составляет:

$$\sigma_M = 0,0018f + 0,6 \quad \text{дБ.}$$

в этих уравнениях σ_L , σ_M – RMS в дБ, d – расстояние в км, f – частота в кГц.

4.2 Изменения сигнала в дневное время в зависимости от места

На СЧ стандартные отклонения изменений уровня сигнала между местами, разнесенными на расстояния порядка 1 км, имеют одинаковые значения в различных частях земли. Как показано на рис. 5, распределение вероятности практически соответствует логарифмически нормальному закону со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 3,7$ дБ.

В городских условиях, на улицах и в районах, стандартное отклонение также близко к 4 дБ. В частях города с плотной застройкой, особенно при небольших расстояниях от передатчика (вплоть до 1 км), стандартное отклонение увеличивается и достигает 7–8 дБ. Внутри зданий в редких случаях дополнительное поглощение может достигать 20 дБ.

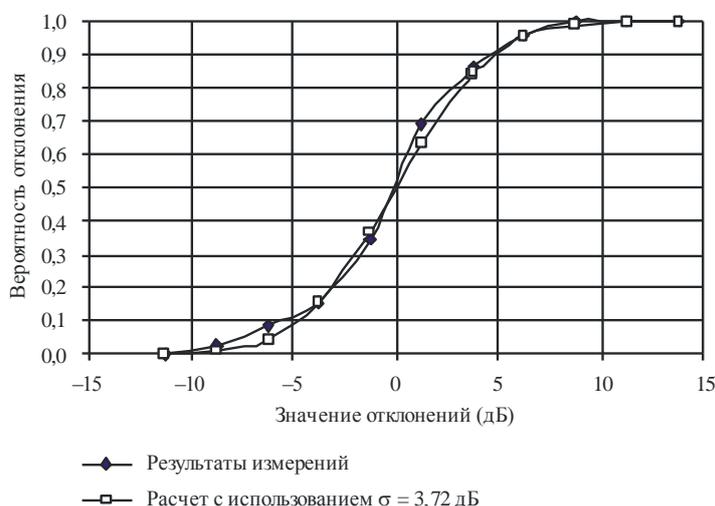
4.3 Изменения сигнала в ночное время

Пространственные моды подвержены долгосрочным изменениям от ночи к ночи, когда часовые медианные значения распределяются по логарифмически нормальному закону с полуинтердецильным размахом в интервале от 3,5 до 9 дБ. В пределах часа замирания отдельных мод также распределены по логарифмически нормальному закону; данных измерений пока немного, но можно считать, что характерное значение стандартного отклонения составляет примерно 3 дБ. Частота замираний составляет примерно 10–30 замираний в час.

Распределение замираний сигнала для случаев, когда необходимо рассматривать составную амплитуду мод земной волны и пространственной волны, то есть когда приемная система не может разделить моды, обсуждается в Дополнении 1 к Приложению 1.

Сдвиг частот мод пространственной волны, обусловленный доплеровским эффектом при отражении от движущихся слоев ионосферы, будет невелик.

РИСУНОК 5
Закон распределения отклонений



4.4 Характеристики превышений и замираний в ионосферных каналах НЧ и СЧ

Для целей анализа и планирования систем радиосвязи с цифровой модуляцией в НЧ и СЧ диапазонах характеристики средних значений и дисперсии сигнала, по-видимому, описаны не достаточно. Необходимо учитывать более подробные характеристики превышений и замираний, в частности, необходимо понимать распределение вероятности продолжительностей превышений и замираний, на различных уровнях сигнала и помех. Статистические характеристики превышений и замираний получены для двухгодичного периода на двух каналах: одном НЧ-канале (1550 км на частоте 155 кГц) и одном СЧ-канале (860 км на частоте 539 кГц). Эти характеристики приводятся ниже, в Дополнении 2. Результаты относятся к средним географическим широтам восточного полушария и умеренной солнечной активности ($SSN \approx 40$).

В таблицах 3 и 4, содержащихся в Дополнении 2, приводится количество превышений и замираний за час для каждого канала. На рисунках 6 и 7 представлены диаграммы рассеяния количества (в %) продолжительностей превышения медианного порогового значения для каждого канала.

5 Выводы

В Рекомендации МСЭ-R P.1407 указан набор параметров, используемых для описания эффектов многолучевости. "Окно задержки", содержащее, скажем, более 98% общей энергии, в соответствии с рис. 2 имеет величину менее 3 мс. Можно заметить, что при некоторых обстоятельствах амплитуда исходной многолучевой компоненты не будет максимальной.

Дополнение 1 к Приложению 1

Амплитуду сложного сигнала, e , являющуюся комбинацией устойчивой земной волны и пространственной волны с логарифмически нормальным распределением, можно получить как сумму мощностей:

$$e = \sqrt{e_e^2 + e_i^2},$$

где e_e и e_i – уровни компонент земной и пространственной волн, обычно выраженные в мкВ/м.

Составляющая пространственной волны, e_i , распределена по логарифмически нормальному закону (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1057, уравнение (6)). Для удобства полагают как бы, что составляющая земной волны также распределена по логарифмически нормальному закону, а окончательный результат можно получить, приняв стандартное отклонение равным 0 дБ.

Комбинация двух логарифмически нормальных распределений также является логарифмически нормальным распределением, в котором средний уровень есть сумма отдельных средних уровней (т. е. по амплитуде, но не в дБ), а дисперсия является суммой двух дисперсий.

Для логарифмически нормального распределения (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1057) среднее значение и стандартное отклонение уровней сигнала (мкВ/м) определяются как:

$$\text{среднее} = e^m \cdot e^{\sigma^2/2},$$

$$\text{стандартное отклонение} = \sqrt{e^{2m} \cdot e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)},$$

где m – среднее значение, а σ – стандартное отклонение логарифмически нормального распределения.

Учитывая вышеописанные соображения, можно оценить параметры комбинированного распределения. В таблице 2 приведен пример полученных таким образом результатов при стандартном отклонении логарифмически нормального распределения компоненты пространственной волны, равном 3 дБ.

ТАБЛИЦА 2

e_i / e_e	Средний уровень, отнесенный к среднему значению уровня составляющей земной волны	Стандартное отклонение
0,5 (-6 дБ)	+1,3 дБ	0,72 дБ
1 (0 дБ)	+4,4	1,35
2 (+6 дБ)	+5,7	2,0

Дополнение 2 к Приложению 1

ТАБЛИЦА 3

Количество превышений и замираний за час на НЧ-канале

	Время суток (час.)									
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
Пороговый уровень	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
Медианный уровень (превышение)	2,3	2,7	3,1	3,7	4,1	4,6	4,4	3,9	3,5	
Нижний дециль (замирение)	1,5	1,75	2	2,3	2,6	2,6	2,3	2	1,7	
Верхний дециль (превышение)	1,6	1,8	1,9	2,1	2,25	2,4	2,4	2,3	2,2	

ТАБЛИЦА 4

Количество превышений и замираний за час на СЧ-канале

	Время суток (час.)									
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03
Пороговый уровень	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03
Медианный уровень (превышение)	1,8	2	2,3	2,7	2,9	3,2	3,5	3,5	3	2,7
Нижний дециль (замирение)	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,4	2,3	2,1
Верхний дециль (превышение)	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,1	2	1,8

Распределение для продолжительности превышения медианного уровня в НЧ и СЧ диапазонах

Для аппроксимации статистических характеристик продолжительностей превышения медианного уровня в НЧ и СЧ диапазонах, можно использовать следующее распределение:

$$P_k = 0,38 \cdot e^{-d t^2 / r^2} + 0,62 \cdot e^{-0,5 t^2 / q^2} + 0,62 \cdot e^{-b t / r} \cdot (1 - e^{-0,5 t^2 / q^2}), \quad (1)$$

где t (мин.) больше или равно 0, а d , b , q и r – выбранные параметры.

Распределение для продолжительности превышения верхнего дециля и продолжительностей замирания нижнего дециля в НЧ и СЧ диапазонах

Распределение вероятности продолжительности замирания для пороговых уровней верхнего и нижнего дециля хорошо описано гамма-распределением:

$$p_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t}, \quad P_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t} dt, \quad (2)$$

где:

p_G : распределение вероятности;

P_G : функция распределения;

t : продолжительность (мин.);

λ и α : выбранные параметры.

В таблице 5, представленной ниже, показаны распределение и значения параметров для нескольких пороговых уровней.

ТАБЛИЦА 5

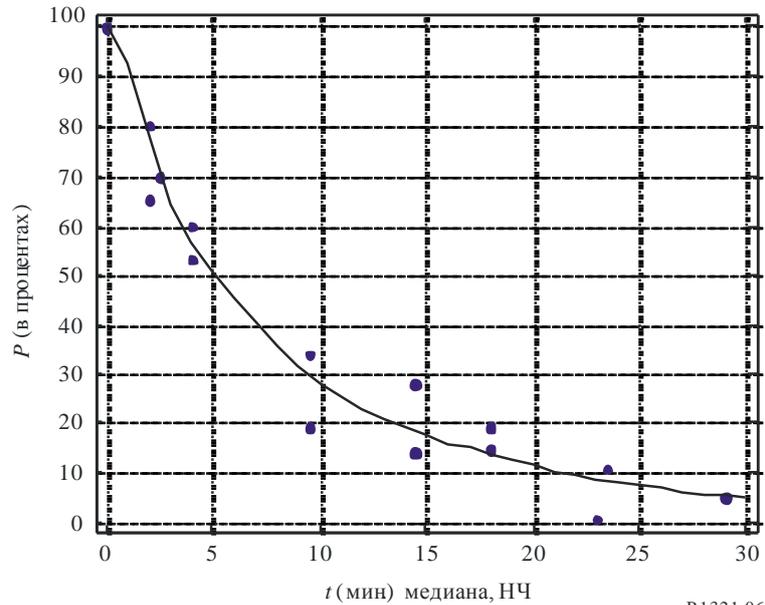
Распределение и параметры для нескольких пороговых уровней

Диапазон	Пороговый уровень	Превышение или замирание	Распределение	Параметры
НЧ	Медианный уровень	Превышение	Уравнение (1)	$b = 0,32, d = 3,0, q = 4,0, r = 3,8$
НЧ	Нижний дециль	Замирание	Уравнение (2)	$\alpha = 2,00, \lambda = 0,67$
НЧ	Верхний дециль	Превышение	Уравнение (2)	$\alpha = 2,20, \lambda = 0,67$
СЧ	Медианный уровень	Превышение	Уравнение (1)	$b = 0,3, d = 0,8, q = 1,8, r = 2,2$
СЧ	Нижний дециль	Замирание	Уравнение (2)	$\alpha = 3,30, \lambda = 1,13$
СЧ	Верхний дециль	Превышение	Уравнение (2)	$\alpha = 2,95, \lambda = 0,7$

Экспериментальные данные для медианных значений продолжительности превышения для НЧ и СЧ отличаются незначительно, приблизительно на 1 мин. (5 мин. для НЧ и 4 мин. для СЧ).

РИСУНОК 6

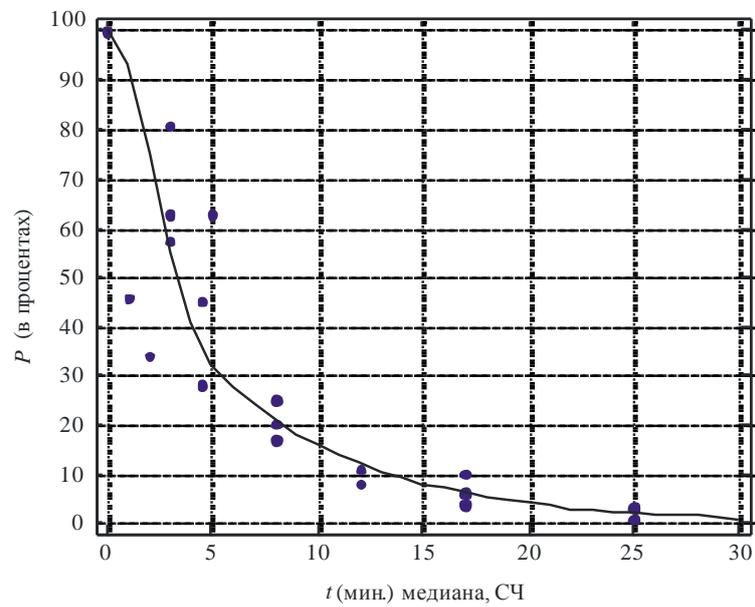
Количество продолжительностей превышения (в %) за час для медианного порогового значения на НЧ-канале и интегральное распределение



P.1321-06

РИСУНОК 7

Количество продолжительностей превышения (в %) за час для медианного порогового значения на СЧ-канале и интегральное распределение



P.1321-07