

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1321-2

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

(Вопрос МСЭ-R 225/3)

(1997-2005-2007)

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.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- а) что в настоящее время исследуются методы цифровой модуляции на НЧ и СЧ для звукового радиовещания;
- б) что для выбора методов модуляции необходима информация о характеристиках распространения радиоволн на этих частотах,

рекомендует,

1 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 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

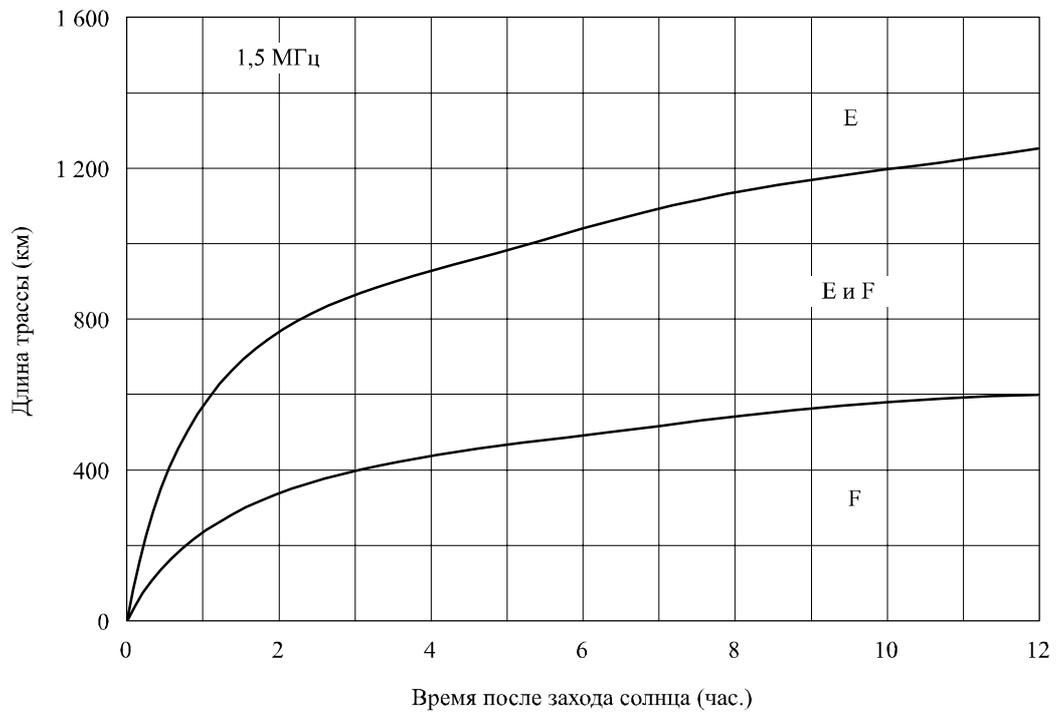
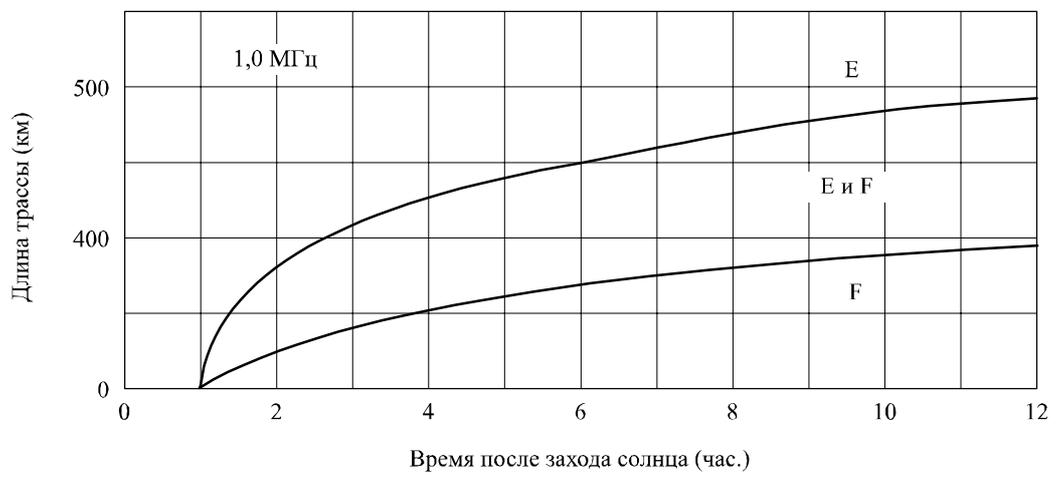
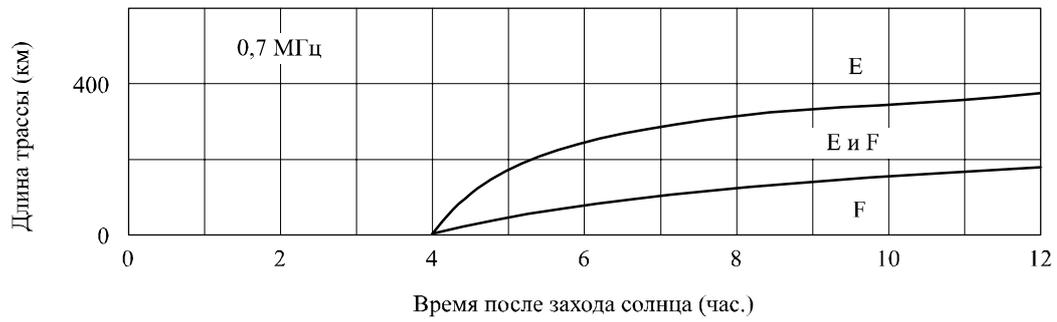
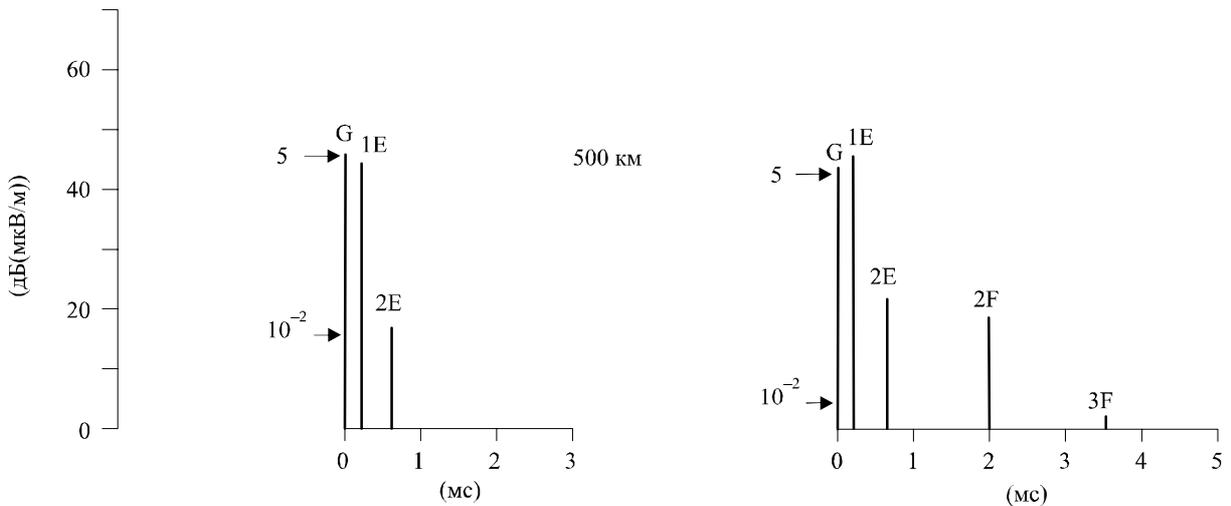
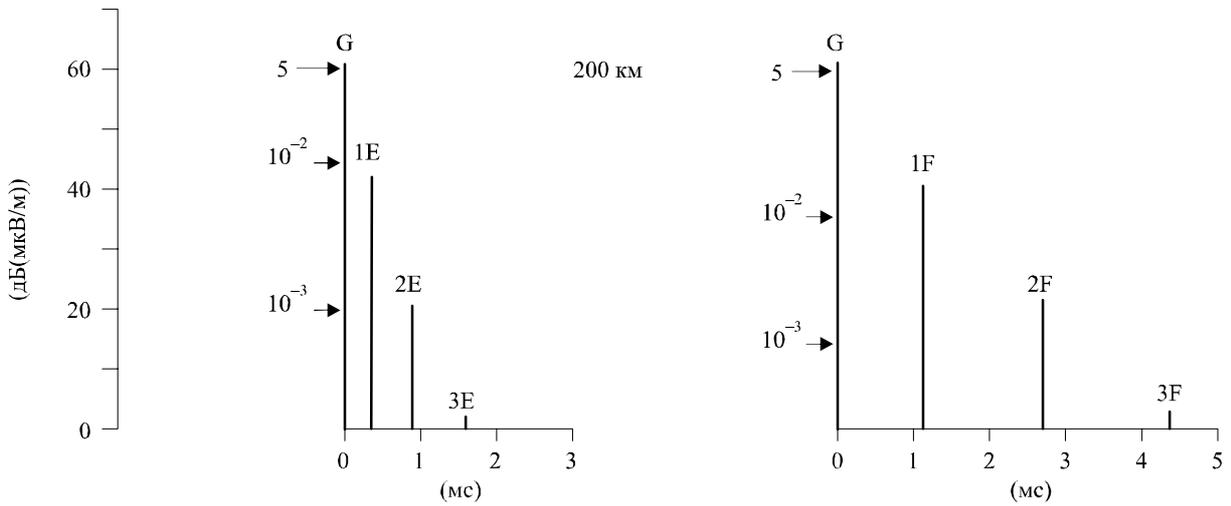
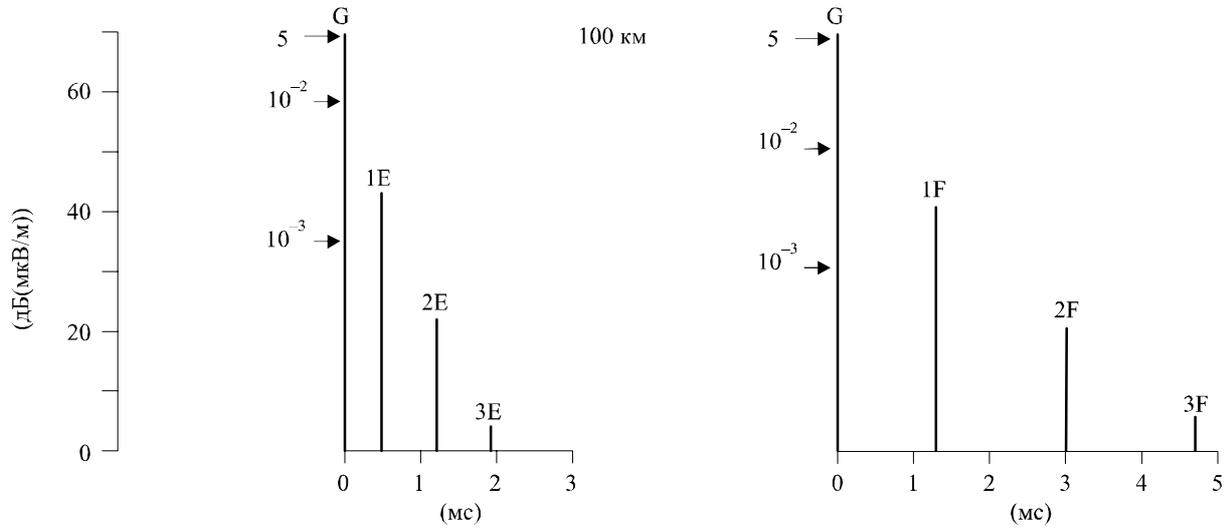


РИСУНОК 2

Примеры разброса временных задержек



700 кГц

1 МГц

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.

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

РИСУНОК 3

**Задержка сигнала пространственной волны
относительно сигнала земной волны**

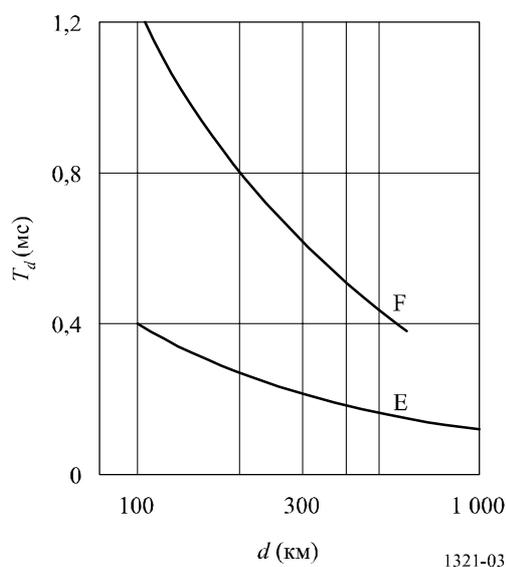
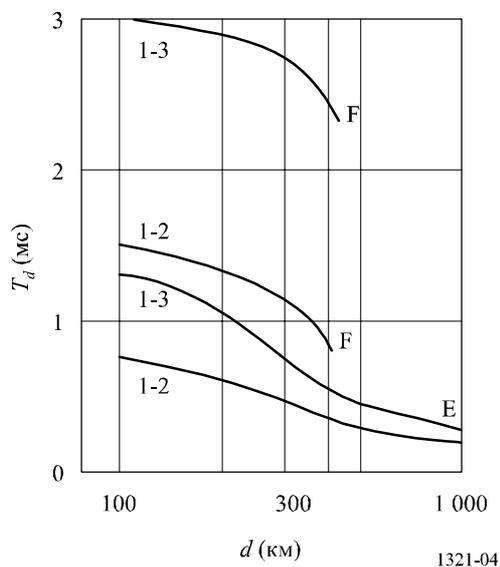


РИСУНОК 4

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



4 Изменчивость

4.1 Изменения сигнала в дневное время

Напряженность поля наземных радиоволн может изменяться с изменением зимних температур. Средний годовой разброс (разность между месячными медианными значениями напряженности поля в зимние и летние месяцы) для полосы 500–1000 кГц приведен в таблице 1 для широты северного полушария, где средняя январская температура ниже примерно 4°C.

ТАБЛИЦА 1

Средняя температура января, °С, для северного полушария	4	0	–10	–16
Диапазон изменений уровней напряженности поля зима-лето, дБ	4	8	13	15

На НЧ диапазон изменения 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:

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

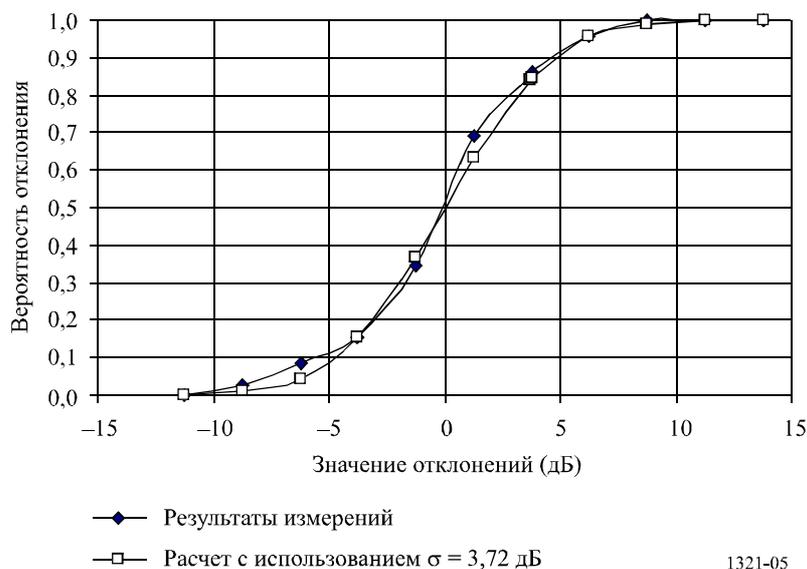
4.2 Изменения сигнала в дневное время в зависимости от места

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.

РИСУНОК 5

Закон распределения отклонений



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 замираний 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.

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