

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1407-2

**Многолучевое распространение и параметризация его характеристик**

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(1999-2003-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) необходимость оценки влияния многолучевости на работу служб, использующих цифровые системы;
- b) что желательно стандартизовать терминологию и выражения, используемые для описания многолучевости,

*рекомендует,*

**1** чтобы для согласованного описания явления многолучевости использовались термины и определения, приведенные в Приложении 1.

**Приложение 1****1 Введение**

В радиосистемах с низкими антеннами помимо прямых трасс распространения в пределах прямой видимости между передатчиком и приемником часто возникают многолучевые не прямые трассы, обусловленные отражением от окружающих объектов. Такое многолучевое распространение особенно значительно в городских условиях, где стены зданий и дорожное покрытие обладают высокой отражательной способностью. В результате принимаемый сигнал состоит из нескольких компонентов с разными амплитудами, фазами и направлениями прихода.

Результирующая пространственная изменчивость напряженности поля сигнала может быть представлена в двух следующих режимах:

- a) быстрое замирание, скорость которого меняется на расстоянии порядка длины волны, что обусловлено в первую очередь изменением фазы различных компонентов сигнала;
- b) медленное замирание, которое меняется на расстояниях большой протяженности, прежде всего, за счет изменения уровня потерь из-за затенения окружающими объектами.

Помимо этого, различные компоненты сигнала могут испытывать доплеровский сдвиг частоты различной величины, что обусловлено движением подвижной станции или отражающих объектов, таких как транспортные средства.

Многолучевой канал подвижной связи можно описать с помощью импульсной характеристики, скорость изменения которой зависит от скорости движения подвижной станции и/или рассеивателей. Следовательно, приемник должен уметь справляться с искажениями, возникающими за счет отраженных сигналов, а также учитывать быстрые изменения характера таких искажений. Подобные характеристики радиоканала подвижной связи описываются с помощью профилей задержки мощности и доплеровскими спектрами, которые можно получить путем измерений зондирования широкополосного канала.

Из-за многолучевого рассеяния амплитуды сигналов, передаваемых на движущиеся транспортные средства и от них в городе или лесной местности, сильно меняются. К обычным явлениям относятся замирания на 30 дБ или более относительно среднего уровня. Мгновенное значение напряженности поля, измеренного на расстояниях порядка нескольких десятков длин волны, приблизительно следует рэлеевскому распределению. Средние значения для распределений на этих небольших секторах сильно меняются в зависимости от географической зоны, высоты, плотности и расположения холмов, деревьев, зданий и других объектов.

Характеристики многолучевого распространения – это основной фактор в вопросах управления качеством цифровой подвижной связи. С физической точки зрения в характеристики многолучевого распространения входят количество лучей, амплитуда, разница в длине трасс (задержка) и угол прихода. Эти характеристики описываются передаточной функцией трассы распространения (амплитудно-частотные характеристики) и шириной полосы корреляции.

Определения параметров канала для небольшого измеряемого сектора (или мелкомасштабных параметров) приведены в пп. 2 и 3. Впоследствии статистические данные о мелкомасштабных параметрах используются для составления кумулятивных функций распределения (CDF). Среднемасштабная функция CDF охватывает отдельный маршрут измерений, имеющий длину порядка от десятков до сотен метров. Совокупность объединенных данных от ряда среднемасштабных маршрутов рассматривается в качестве крупномасштабной или глобальной характеристики, представляющей особенности изучаемой окружающей обстановки, например холмистой местности, города, пригорода, больших помещений внутри зданий, коридоров и т. д.

Нестационарный линейный канал можно описать линейным трансверсальным фильтром. На выходе этого фильтра получают сигнал, представляющий собой сумму задержанного входного сигнала, ослабленного входного сигнала и входного сигнала с доплеровским сдвигом частоты. Канал при этом можно описать функцией задержки-доплеровской частоты-разброса, называемой иногда функцией рассеяния. Эта функция описывает явление многолучевости в трехмерном пространстве – дополнительная задержка, доплеровская частота и плотность мощности. Такое представление особенно удобно при аппаратном моделировании в виде динамического трансверсального фильтра.

## 2 Параметры многолучевости

### 2.1 Определения

Ниже приводятся соответствующие параметры для статистического описания явлений многолучевости. *Средняя задержка* – это взвешенное по мощности среднее значение дополнительной задержки, которое определяется первым моментом профиля задержки мощности (квадрат амплитуды импульсной характеристики).

*Среднеквадратичный разброс задержки* – это взвешенное по мощности стандартное отклонение дополнительных задержек, которое определяется вторым моментом профиля задержки мощности. Этот параметр является мерой изменчивости средней задержки.

*Окно задержки* – это длина средней части профиля задержки мощности, в которой содержится определенный процент (обычно 90%) общей энергии, передаваемой в соответствии с данной импульсной характеристикой.

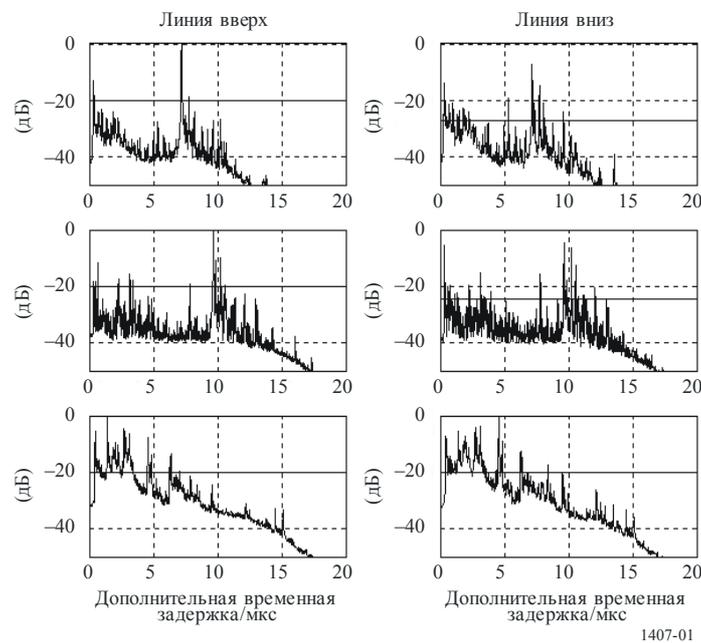
*Интервал задержки* – это часть импульсной характеристики между двумя значениями дополнительной задержки от момента, когда амплитуда этой характеристики первый раз превышает заданный порог, до момента, когда амплитуда в последний раз падает ниже этого порога. Используемый порог зависит от динамического диапазона измерительного оборудования: типичное значение на 20 дБ ниже пикового уровня профиля задержки.

*Ширина полосы корреляции* – это полоса частот, в которой автокорреляционная функция передаточной функции находится выше заданного порога; типичное пороговое значение составляет 0,5.

## 2.2 Рассмотрение вопроса

Соответствующие параметры для статистического описания явлений многолучевости могут быть вычислены или из мгновенных, или из средних профилей задержки мощности, которые представляют либо усредненные по времени значения, полученные при использовании стационарного приемника, отображающие происходящие в окружающей среде перемещения, либо усредненные пространственные значения, полученные при использовании приемника, находящегося в движении. На рисунке 1 показаны поясняющие примеры, отражающие результаты измерений с помощью автофургона, где средние профили получены для стоящего фургона, а два других профиля – для движущегося фургона. Вычисления по обоим видам усреднений должны производиться для ряда импульсных характеристик в течение времени когерентной интеграции канала, определяемого как продолжительность времени (или расстояние), в пределах которого компоненты многолучевости изменяются не более чем на  $\pm$  половину элемента разрешения по временной задержке (или разрешения по дальности).

РИСУНОК 1



Изменения профилей задержки мощности для дуплексных полос UMTS с частотным разделением от усреднения по времени (средний профиль) и пространственного усреднения (верхний и нижний профили). Эти профили нормируются для отображения относительной плотности мощности в функции  $\tau$ . Горизонтальная линия показывает интервал задержки 20 дБ.

Общая энергия,  $P_m$ , импульсной характеристики определяется как:

$$P_m = \int_{t_0}^{t_3} P(t) dt, \quad (1)$$

где:

- $P(t)$  : плотность мощности импульсной характеристики;  
 $t$  : задержка относительно опорного времени;  
 $t_0$  : момент, когда  $P(t)$  в первый раз превышает уровень отсечки;  
 $t_3$  : момент, когда  $P(t)$  в последний раз превышает уровень отсечки.

Средняя задержка,  $T_D$ , определяется первым моментом профиля задержки мощности:

$$T_D = \frac{\int_0^{\tau_e} \tau P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau) d\tau} - \tau_a, \quad (2a)$$

где:

- $\tau$  : переменная величина дополнительной временной задержки, равная  $t - t_0$ ;  
 $\tau_a$  : время прихода первого принятого компонента многолучевого сигнала (первый пик в профиле);  
 $\tau_e = t_3 - t_0$ .

В дискретной форме уравнение (2a) принимает вид:

$$T_D = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)} - \tau_M, \quad (2b)$$

где  $i = 1$  и  $N$  – индексы первого и последнего из образцов профилей задержки, лежащих выше порогового уровня, соответственно, а  $M$  – индекс первого принятого компонента многолучевого сигнала (первый пик в профиле).

Величины задержек могут определяться из следующего соотношения:

$$t_i (\mu\text{s}) = 3,3r_i \quad \text{км},$$

где  $r_i$  – сумма расстояний от передатчика до отражателя многолучевых сигналов и от отражателя до приемника или общее расстояние от передатчика до приемника для  $t_{LOS}$ .

Среднеквадратичный разброс задержек,  $S$ , определяется как корень квадратный из второго центрального момента:

$$S = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_e} (\tau - T_D - \tau_a)^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau) d\tau}} \quad (3)$$

или в дискретной форме:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - T_D - \tau_M)^2 P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)}} \quad (4)$$

Окно задержки,  $W_q$ , представляет собой среднюю часть профиля задержки мощности, содержащую определенный процент,  $q$ , общей мощности:

$$W_q = (t_2 - t_1) \quad (5)$$

причем границы  $t_1$  и  $t_2$  определяются соотношением:

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \frac{q}{100} \int_{t_0}^{t_3} P(t) dt = \frac{q}{100} P_m, \quad (6)$$

а энергия за пределами окна делится на две равные части  $\left(\frac{100-q}{200}\right)P_m$ .

Интервал задержки,  $I_{th}$ , определяется как временной интервал между моментом  $t_4$ , когда амплитуда профиля задержки мощности в первый раз превышает заданный порог  $I_{th}$ , и моментом  $t_5$ , когда амплитуда в последний раз падает ниже этого порога:

$$I_{th} = (t_5 - t_4) \quad (7)$$

Применив к плотности мощности импульсной характеристики преобразование Фурье, получим автокорреляцию передаточной функции,  $C(f)$ :

$$C(f) = \int_0^{\tau_e} P(\tau) \exp(-j 2 \pi f \tau) d \tau \quad (8)$$

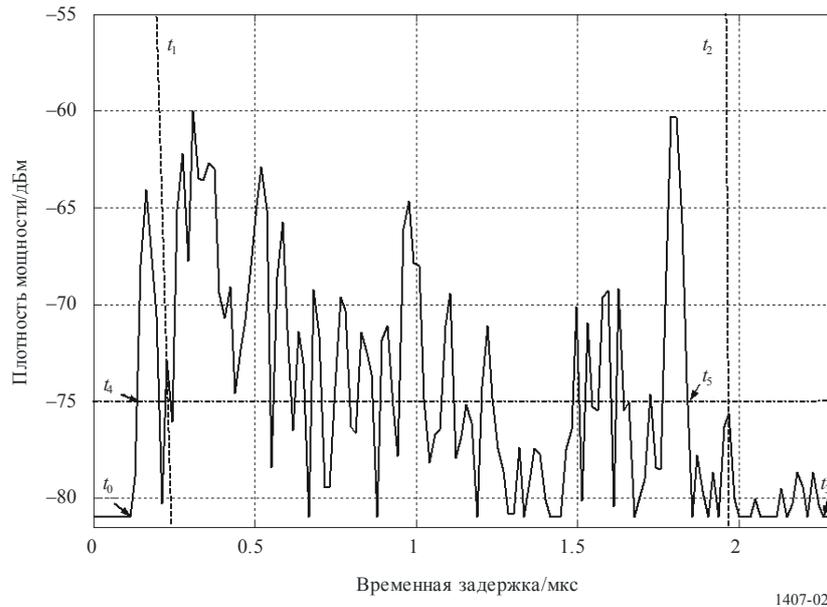
Для райсовского канала уравнение (8) недооценивает полосу корреляции. В отношении таких каналов более точная оценка полосы корреляции получается исходя из функции корреляции разнесенных частот, которая выводится из меняющейся во времени комплексной переходной функции путем расчета корреляционного коэффициента для различных частотных разносов.

Полоса корреляции,  $B_x$ , определяется как частота, для которой  $|C(f)|$  равно  $x\%$  от  $C(f=0)$ .

При анализе данных рекомендуется рассматривать окна задержки для 50%, 75% и 90% мощности, интервалы задержки для порогов на 9, 12 и 15 дБ ниже максимального значения и полосу корреляции для 50% и 90% уровней корреляции. Следует отметить, что влияние шума и побочных сигналов в системе (от РЧ до обработки данных) может быть весьма значительным. Поэтому важно точно определить пороговый уровень шумов и/или побочных сигналов для системы и обеспечить для этого уровня необходимый запас надежности. Рекомендуется использовать запас надежности, равный 3 дБ, а для того чтобы обеспечить целостность результатов, рекомендуется минимизировать используемое в качестве критерия приемлемости отношение "пиковый уровень сигнала/уровень побочного сигнала" до, к примеру, 15 дБ (без запаса надежности в 3 дБ), если статистические данные не содержат параметров импульсной характеристики.

Пример использования некоторых из этих терминов приведен на рисунке 2.

РИСУНОК 2



Профиль задержек мощности, иллюстрирующий следующие параметры: окно задержки,  $W_{90}$ , содержащее 90% принимаемой мощности, располагается между двумя вертикальными пунктирными линиями ( $t_1$  и  $t_2$ ), интервал задержки,  $I_{15}$ , в котором уровень сигнала превышает порог "на 15 дБ ниже пикового значения", лежит в пределах между  $t_4$  и  $t_5$ . Точки  $t_0$  и  $t_3$  указывают начало и конец профиля выше минимального уровня шума.

### 3 Параметры направления прихода

Пусть принимаемая мощность в направлении  $\theta$  будет равна  $P(\theta)$ , Вт, где  $\theta$  в радианах измеряется от направления прихода основного сигнала (предполагается, что оно постоянно в пределах продолжительности измерения). Тогда среднеквадратичный угловой разброс  $\sigma_\theta$  направления прихода определяется следующим образом:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{1}{P_0} \int_{-\pi}^{\pi} (\theta - \bar{\theta})^2 P(\theta) d\theta}, \quad (9)$$

где:

$$P_0 = \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) d\theta \quad (10)$$

и

$$\bar{\theta} = \frac{1}{P_0} \int_{-\pi}^{\pi} \theta P(\theta) d\theta, \quad (11)$$

где все интегралы оцениваются для значений выше минимального уровня шума при измерении.