

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1407-3

Многолучевое распространение и параметризация его характеристик

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(1999-2003-2005-2007)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.1407 приводится описание характера многолучевого распространения и определяются надлежащие параметры для статистического описания явлений многолучевого распространения, а также приводятся примеры явлений корреляции между большим числом трасс распространения лучей и способов их расчета.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая

- a) необходимость оценки явлений многолучевого распространения на службы, в которых используются цифровые системы;
- b) целесообразность стандартизации терминологии и выражений, используемых для описания многолучевости,

рекомендует,

1 чтобы использовались для унифицированного описания понятий многолучевости термины и определения, содержащиеся 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, в приемнике должна быть предусмотрена возможность 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 с помощью профиля задержки мощности. Кроме того, применив преобразование Фурье к комплексной импульсной характеристике, можно получить комплексную передаточную функцию, амплитуда которой как функция частотных характеристик определяет избирательность по частоте и связана с шириной полосы корреляции.

Определения параметров канала для небольшого измеряемого сектора (или мелкомасштабных параметров) приведены в пп. 2 и 3. Далее 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.

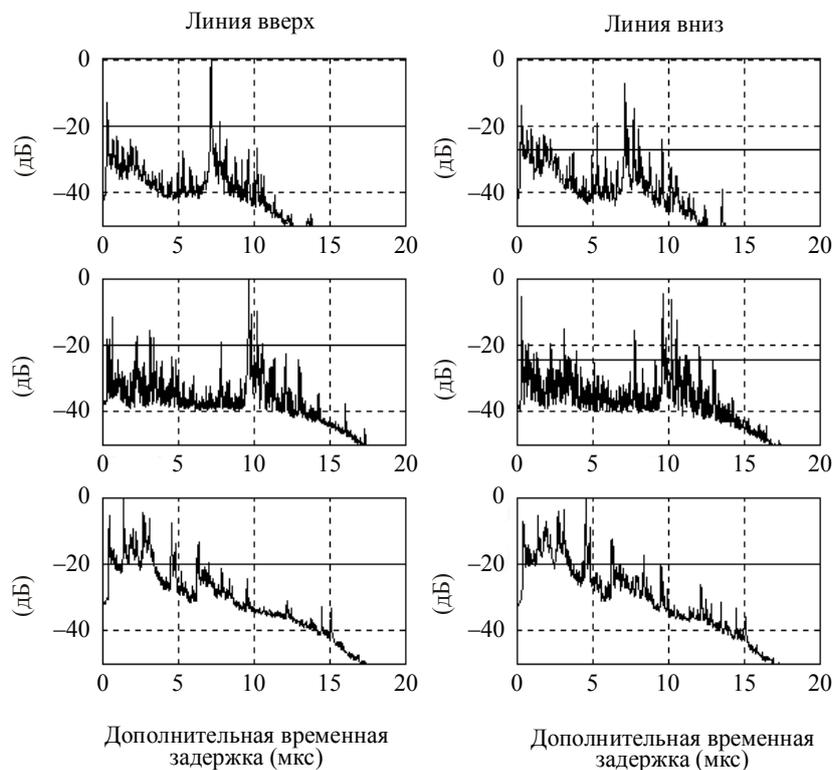
Ширина полосы корреляции – это полоса частот, в которой автокорреляционная функция передаточной функции находится выше заданного порога; типичное пороговое значение составляет 0,5.

Количество компонентов многолучевости или сигналов представляет собой число пиковых уровней профиля задержки мощности, амплитуда которых находится в пределах А дБ наиболее высокого пикового уровня и превышает значение минимального уровня шума.

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



1407-01

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 τ . 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:

- τ : переменная величина дополнительной временной задержки, равная $t - t_0$;
 τ_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:

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

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, $C(f)$:

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

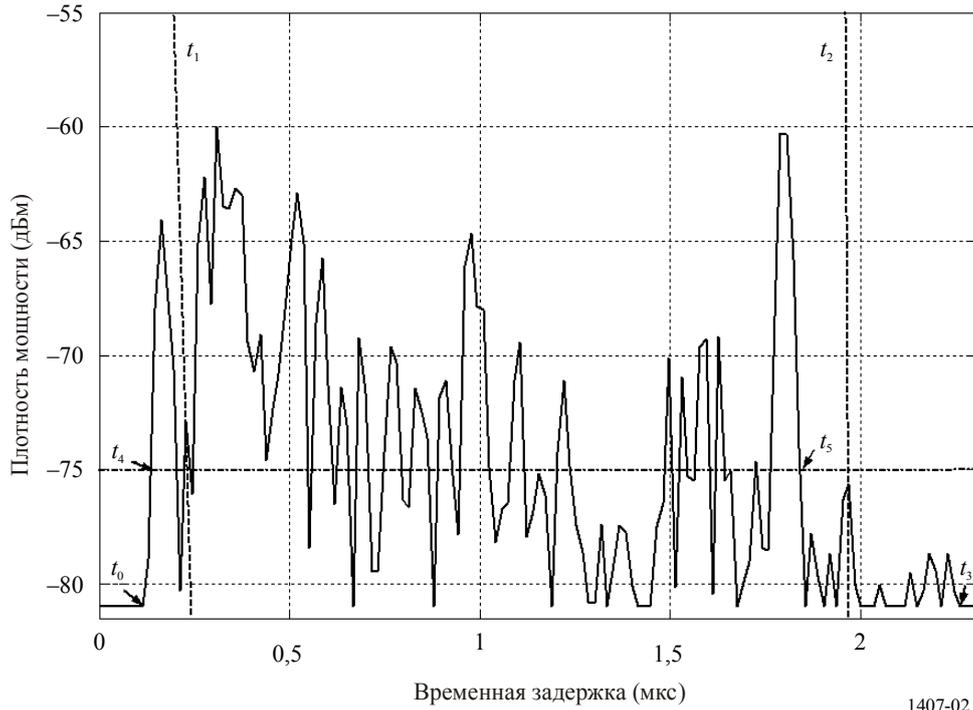
В случае райсовского канала уравнение (8) обуславливает недооценку полосы корреляции. В отношении таких каналов более точная оценка полосы корреляции получается исходя из функции корреляции разнесенных частот, которая выводится из меняющейся во времени комплексной переходной функции путем расчета корреляционного 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.

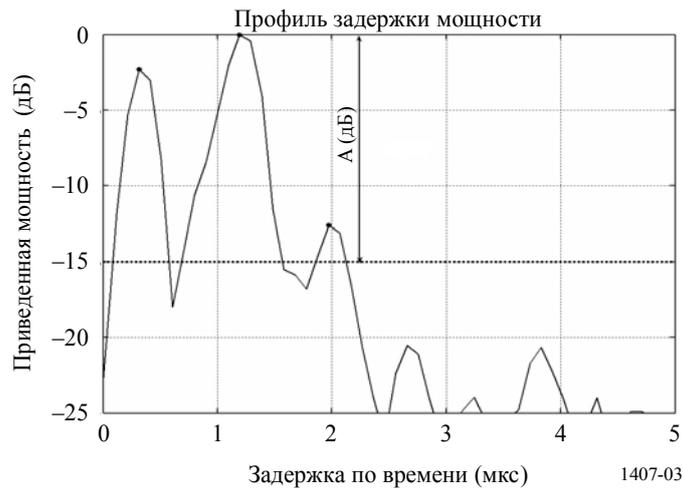
РИСУНОК 2



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.

РИСУНОК 3

Профиль задержки мощности, иллюстрирующий компоненты многолучевости выше порогового уровня



3 Параметры направления прихода

3.1 Определения

Определения соответствующих параметров, предназначенных для статистического описания явлений многолучевости, приведены ниже.

Средний угол прихода представляет собой средневзвешенное по мощности значение измеренных направлений прихода и выражается первым моментом спектра азимутальной мощности. (Он может также называться угловым профилем мощности).

Угловой профиль мощности – это угловая характеристика мощности в пределах азимута/горизонтальной прямой.

Среднеквадратичный угловой разброс – это взвешенное по мощности стандартное изменение направления прихода, которое выражается вторым моментом углового профиля мощности. Используется для измерения среднего угла прихода.

Угловое окно – это ширина средней части углового профиля мощности, содержащей четко определенную процентную долю общей энергии, выявленной в результате этого измерения углового профиля мощности.

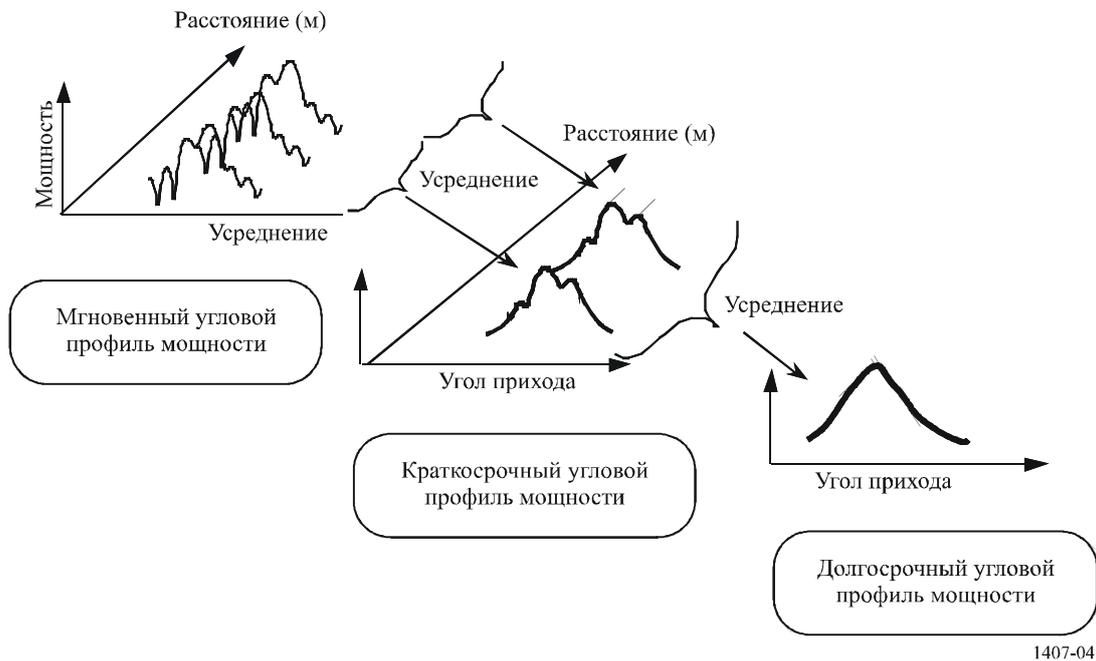
Угловой интервал (или *угловое расстояние*) – определяется как ширина импульсной характеристики (или ширина углового профиля) между двумя значениями направления прихода. Он указывает первый угол, при котором амплитуда углового профиля превышает данное пороговое значение, а также последний угол, при котором эта амплитуда становится ниже этого порогового значения. Используемое пороговое значение зависит от динамического диапазона измерительного оборудования: типичное значение равно 20 дБ ниже пикового значения углового профиля.

3.2 Рассмотрение вопроса

Соответствующие параметры для статистического описания явлений многолучевости могут быть вычислены из мгновенных, кратковременных или долговременных угловых профилей мощности. Этот показатель характеризует либо усредненные по времени значения, полученные при использовании стационарного приемника, отображающего происходящие в окружающей среде перемещения, либо усредненные пространственные значения, полученные при использовании приемника, находящегося в движении.

Как показано на рисунке 4, краткосрочные угловые профили мощности получают путем пространственного усреднения мгновенных угловых профилей мощности по нескольким десяткам значений длины волн с целью подавления колебаний быстрого замирания; долгосрочные угловые профили мощности рассчитываются путем пространственного усреднения краткосрочных угловых профилей на приблизительно том же расстоянии от вещательной станции с целью подавления колебаний, вызванных замиранием.

РИСУНОК 4
Определение угловых профилей мощности



1407-04

3.2.1 Общая энергия

Допустим, что принимаемая мощность в направлении θ равна $P(\theta)$.

Общая энергия, P_0 , углового профиля определяется как уровень мощности ниже порогового значения L_0 , отделяющего сигнал от шума, как это показано на рисунке 5:

$$P_0 = \int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) d\theta, \quad (9a)$$

где:

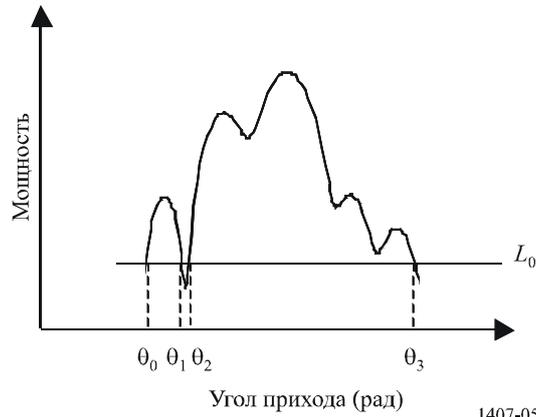
- θ : измерено в радианах со стороны основного сигнала (который, как предполагается, является стационарным во время проведения измерений);
- $P(\theta)$: мощность углового профиля выше порогового уровня L_0 ; ниже L_0 , $P(\theta) = 0$;
- L_0 : уровень, незначительно [на 3 дБ, согласно рекомендации] превышающий минимальный уровень шума;
- θ_0 : угол прихода, когда $P(\theta)$ впервые превышает пороговый уровень L_0 в $\theta_{max}(-\pi, \pi)$;
- θ_3 : угол прихода, когда $P(\theta)$ в последний раз превышает пороговый уровень L_0 в $\theta_{max}(-\pi, \pi)$.

В дискретной форме уравнение (9a) приобретает следующий вид:

$$P_0 = \sum_{i=1}^N P(\theta_i), \quad (9b)$$

где $i = 1$ и N – это индексы первого и последнего образцов углового профиля мощности выше порогового уровня, соответственно.

РИСУНОК 5
Общая энергия



1407-05

3.2.2 Средний угол прихода

Средний угол прихода, T_A , определяется первым моментом углового профиля мощности:

$$T_A = \frac{1}{P_0} \int_{\theta_0}^{\theta_3} \theta P(\theta) d\theta. \quad (10a)$$

В дискретной форме уравнение (10a) принимает вид:

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^N P(\theta_i)}, \quad (10b)$$

где $i = 1$ и N — это индексы первого и последнего образцов углового профиля мощности выше порогового уровня, соответственно.

3.2.3 Среднеквадратичная угловая скорость

Среднеквадратичная угловая скорость, S_A , направления прихода определяется следующим образом:

$$S_A = \sqrt{\frac{1}{P_0} \int_{\theta_0}^{\theta_3} (\theta - T_A)^2 P(\theta) d\theta}. \quad (11a)$$

В дискретной форме уравнение (11a) приобретает вид:

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i - T_A)^2 P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^N P(\theta_i)}}, \quad (11b)$$

где $i = 1$ и N — это индексы первого и последнего образцов углового профиля мощности выше порогового уровня, соответственно.

3.2.4 Угловое окно

Угловое окно, θ_w , – это ширина средней части углового профиля мощности, содержащая определенный процент, q , общей мощности, как показано на рисунке 6:

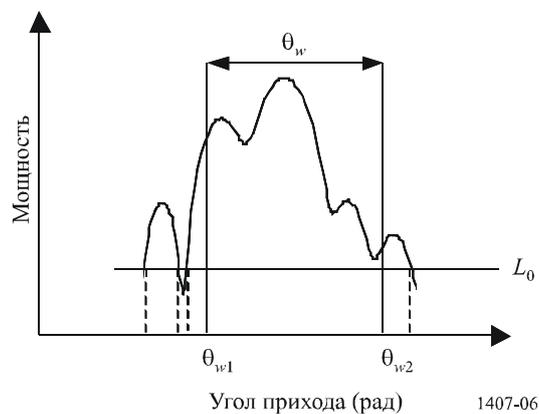
$$\theta_w = \theta_{w2} - \theta_{w1}, \quad (12)$$

где границы θ_{w1} и θ_{w2} определяются соотношением:

$$\int_{\theta_{w1}}^{\theta_{w2}} P(\theta) d\theta = \frac{q}{100} \int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) d\theta = \frac{q}{100} P_0, \quad (13)$$

а энергия за пределами окна делится на две равные части $\left(\frac{100-q}{200}\right)P_0$.

РИСУНОК 6
Угловое окно

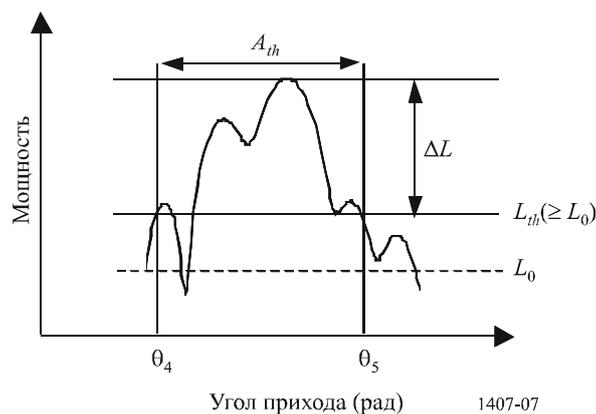


3.2.5 Угловой интервал (угловое расстояние)

Угловой интервал, A_{th} , определяется как угловая разность между углом θ_4 , в случае когда амплитуда углового профиля мощности впервые превысила данное пороговое значение L_{th} , и углом θ_5 , когда амплитуда в последний раз падает ниже этого порога, как показано на рисунке 7:

$$A_{th} = \theta_5 - \theta_4. \quad (14)$$

РИСУНОК 7
Угловой интервал



3.2.6 Интервал пространственной корреляции

В частности, для каналов с большим количеством входов и выходов (MIMO) коэффициент пространственной корреляции, d , рассчитывается как комплексная передаточная функция с угловой дисперсией от профиля угловой мощности. Коэффициент пространственной корреляции, $R(d)$, вычисляется следующим образом:

$$R(d) = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) \exp(-j2\pi d \sin \theta / \lambda) d\theta}{\int_{\theta_0}^{\theta_3} P(\theta) d\theta}, \quad (15)$$

где:

d : расстояние для различных интервалов;

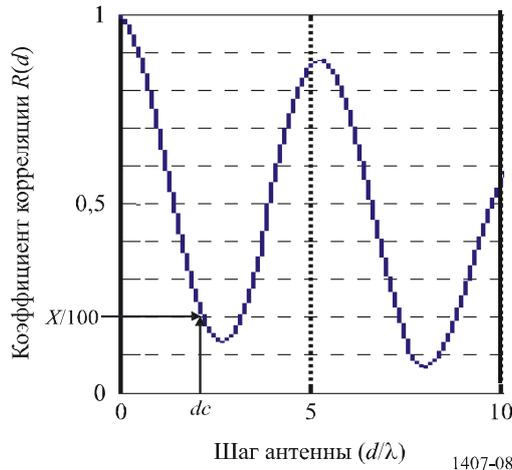
λ : длина волны.

Как показано на рисунке 8, интервал пространственной корреляции, d_c , определяется как расстояние первой отсечки, при котором $|R(d)|$ равно $x\% |R(d=0)|$.

$$|R(d_c)| / |R(0)| = x/100. \quad (16)$$

РИСУНОК 8

Интервал пространственной корреляции



1407-08

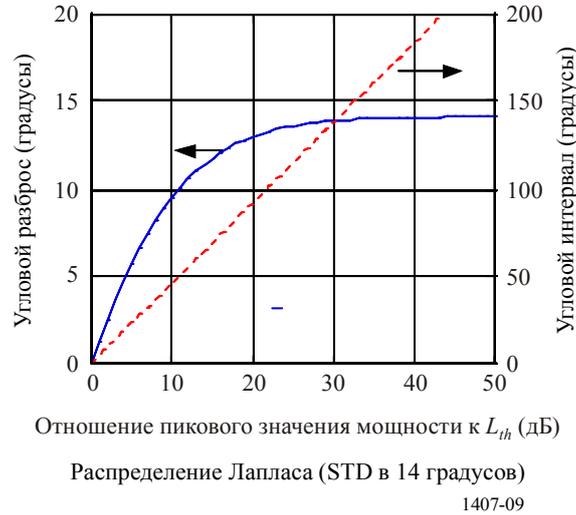
3.2.7 Рекомендованные параметры

Для проведения подробного анализа данных рекомендуется рассматривать угловые окна для 50%, 75% и 90% мощности, угловые интервалы для пороговых уровней на 19, 12 и 15 дБ ниже максимального значения и интервалы корреляции для 50% и 90% уровней корреляции. Кроме того, 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 устанавливать 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, например, 15 дБ (без запаса надежности в 3 дБ), что позволит ограничить число включаемых в статистические данные угловых профилей. На рисунке 9 приведен пример эффекта установления магнитуды минимального отношения пикового значения к L_{th} (ΔL). Предполагается, что на этом рисунке профиль угловой мощности представляет собой распределение Лапласа (двойное экспоненциальное распределение) с угловым разбросом в 14 градусов; угловым разбросом и угловым интервалом

рассчитывается как функции от отношения пикового значения мощности к L_{th} . На данном рисунке показано, что эти параметры претерпевают существенные изменения даже в случае использования в основном идентичных величин. Поэтому следует указать величину, используемую при статистической оценке в качестве ΔL .

РИСУНОК 9

Пример эффекта минимального отношения пикового значения мощности к L_{th} (ΔL)



Приложение 2

1 Введение

В настоящем Приложении приведены некоторые результаты вычислений коэффициентов корреляции из углового профиля мощности и примеры воздействия коэффициентов корреляции на пропускную способность при большом количестве входов и выходов (MIMO).

2 Вычисление коэффициентов пространственной корреляции

Для расчета пространственной корреляции использовалось определение, приведенное в Приложении 1 в уравнении (15). В настоящем Приложении содержится краткое описание полученного результата и характера воздействия на корреляцию шага антенны.

На рисунке 10 показан идеальный усеченный лапласовый спектр азимутальной мощности (PAS):

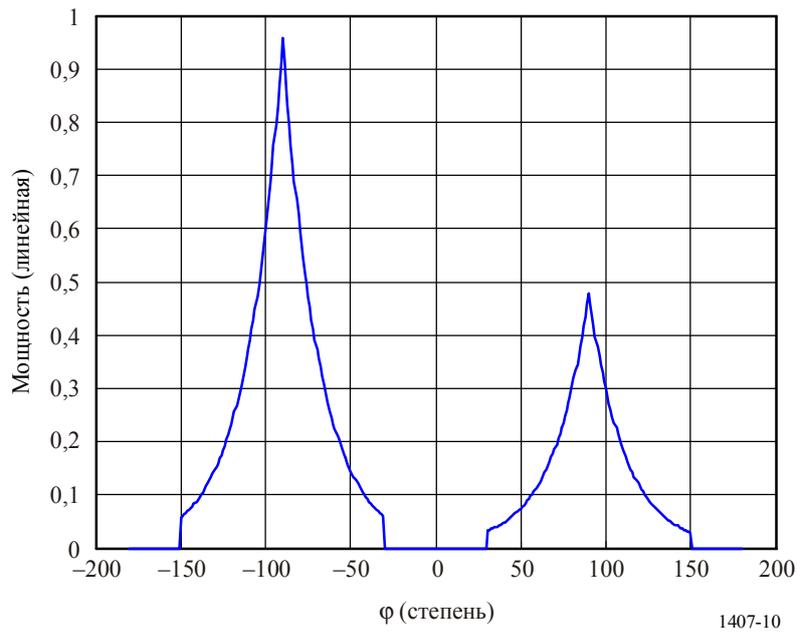
$$PAS_L(\varphi) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{Q_{L,k}}{\sigma_{L,k} \sqrt{2}} \exp\left[-\frac{\sqrt{2}|\varphi - \varphi_{0,k}|}{\sigma_{L,k}}\right] \left\{ \varepsilon[\varphi - (\varphi_{0,k} - \Delta\varphi_k)] - \varepsilon[\varphi - (\varphi_{0,k} + \Delta\varphi_k)] \right\}, \quad (17)$$

где $\varepsilon(\varphi)$ – это единичная ступенчатая функция и N_c – число кластеров, $\varphi_{0,k}$ – средний угол падения k -го кластера, $\sigma_{L,k}$ – угловая скорость. PAS рассчитывается по $[\varphi_0 - \Delta\varphi, \varphi_0 + \Delta\varphi]$. Допустим, что условие нормирования мощности имеет следующий вид:

$$\sum_{k=1}^{N_c} Q_{L,k} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{2}\Delta\varphi_k}{\sigma_{L,k}}\right) \right] = 1. \quad (18)$$

РИСУНОК 10

Идеальный усеченный лапласовый спектр азимутальной мощности (PAS)



Нормированный лапласовый PAS для двух кластеров. $AS = 30^\circ$, $\varphi_0 \in [-90^\circ, +90^\circ]$. Кроме того, мощность кластера $+90^\circ$ составляет половину мощности кластера -90° .

Тогда коэффициент корреляции по огибающей рассчитывается по формуле:

$$\rho_e(D) = |R_{XX}(D) + jR_{XY}(D)|^2, \quad (19)$$

где:

$$D = 2\pi d/\lambda;$$

d : шаг антенны;

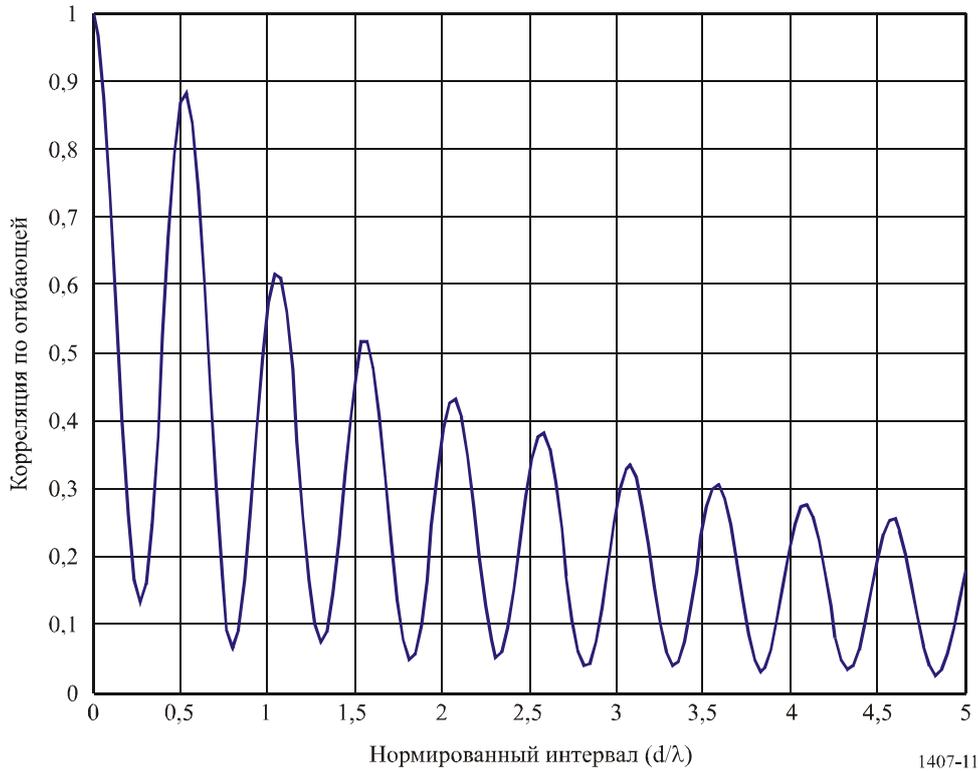
λ : длина волны,

а функции перекрестной корреляции $R_{XX}(D)$ и $R_{XY}(D)$ определяются на основе вышеприведенного уравнения (16).

На рисунке 11 показана результирующая пространственная корреляция.

РИСУНОК 11

Результуирующая пространственная корреляция



Коэффициент корреляции по огибающей как функция от величины нормированного интервала ($= d/\lambda$) для двух кластеров, приведенных на рисунке 10.

1407-11

3 Воздействие коэффициентов корреляции на пропускную способность ММО

В случае рэлеевских замирающих каналов эргодическая пропускная способность ММО в отсутствие информации о каналах передатчика рассчитывается следующим образом:

$$C = \log_2 \det \left(I_{n_R} + \frac{P}{n_T \sigma^2} R_R^{1/2} H_w R_T H_w^H (R_R^{1/2})^H \right) = \log_2 \det \left(I_{n_R} + \frac{P}{n_T \sigma^2} H_w R_T H_w^H R_R^H \right), \quad (20)$$

где:

n_R и n_T : количество антенн приемника и передатчика, соответственно;

P : означает общую мощность передачи;

I_{n_R} : представляет собой единичную матрицу $n_R \times n_R$;

$(\cdot)^H$ и $\det(\cdot)$: означают эрмитову и определяющую операцию, соответственно;

H_w : это матрица, элементы которой представляют собой независимые идентично распределенные комплексные случайные гауссовы переменные с нулевой средней и удельной дисперсией,

$(\cdot)^{1/2}$: это среднеквадратичное эрмитовое значение матрицы.

Матрицы R_R и R_T определяют значение пространственной корреляции между приемниками и передатчиками, соответственно, где матрица канала H рассчитывается по формуле $H = R_R^{1/2} H_w R_T^{1/2}$, $R_R^{1/2}$ и $R_T^{1/2}$ являются позитивными определенными эрмитовыми матрицами, которые в конечном итоге считаются нормированными таким образом, что $[R_R]_{j,j}$ для $j = 1, K, n_R$ и $[R_T]_{i,i}$ для $i = 1, K, n_T$.

Если допустить, что R_R и R_T имеют полный ранг и $n_R = n_T = n$, тогда при высоком S/N приближенная величина пропускной способности может быть рассчитана следующим образом:

$$C \approx \log_2 \det \left(\frac{P}{n_T \sigma^2} H_w H_w^H \right) + \log_2 \det(R_R) + \log_2 \det(R_T). \quad (21)$$

Если собственные значения R_R обозначить как λ_i , $i = 1, K, n$, то в этом случае $\sum_{i=1}^n \lambda_i = n$. Из среднеарифметического и среднегеометрического неравенства:

$$\prod_{i=1}^n \lambda_i \leq 1. \quad (22)$$

Поскольку $\det(R_R) = \prod_{i=1}^n \lambda_i$, $\log_2 \det(R_R) \leq 0$ и равен нулю только в том случае, если все собственные значения R_R являются одинаковыми, т. е. $R_R = I_n$. Таким образом, эта корреляция определяет пропускную способность ММО, а потери в эргодической пропускной способности при высоких S/N рассчитываются по формуле $(\log_2 \det(R_R) + \log_2 \det(R_T))$, бит/с/Гц.

На рисунке 12 проиллюстрировано воздействие величины пространственной корреляции на эргодическую пропускную способность канала ММО при $n_R = n_T = 2$. Предполагается, что на рисунке $R_T = I_2$. Матрица корреляции приемника выбрана в соответствии с формулой

$$R_R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_R \\ \rho_R^* & 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где ρ_R означает пространственную корреляцию между антеннами приемника.

РИСУНОК 12

Эргодическая пропускная способность при низкой и высокой корреляции приема

