

Международный союз электросвязи

**МСЭ-R**

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R Р.1815-1**  
(10/2009)

**Дифференциальное ослабление в дожде**

**Серия Р**

**Распространение радиоволн**



Международный  
союз  
электросвязи

## 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 1 МСЭ-R. 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-овой форме по адресу: <http://www.itu.int/publications/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>	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация  
Женева, 2010 г.

© ITU 2010

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.1815-1\*

**Дифференциальное ослабление в дожде**

(Вопрос МСЭ-R 208/3)

(2007-2009)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации прогнозируются статистические данные об объединенном дифференциальном ослаблении в дожде на трассах между спутником и двумя местоположениями на поверхности Земли.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что необходимо иметь соответствующие методы прогнозирования дифференциального ослабления в дожде на спутниковых трассах, то есть от одного спутника до нескольких местоположений на поверхности Земли, для целей проведения анализа на предмет совместного использования частот;
- b) что имеются оценки пространственной корреляции скорости выпадения дождя;
- c) что разработаны методы прогнозирования дифференциального ослабления в дожде на трассах космос-Земля,

*рекомендует,*

**1** чтобы для прогнозирования дифференциального ослабления в дожде на спутниковых трассах, то есть от одного спутника до нескольких местоположений на поверхности Земли, использовались методы, описание которых приведено в Приложении 1.

**Приложение 1****Описание метода дифференциального ослабления в дожде****1 Введение**

Метод, описанный в данном Приложении, содержит прогноз статистики объединенного дифференциального ослабления в дожде на трассах между спутником и двумя местоположениями на поверхности Земли и применяется на частотах вплоть до 55 ГГц для углов места выше примерно  $10^\circ$  и величинах разноса между станциями от 0 до по меньшей мере 250 км.

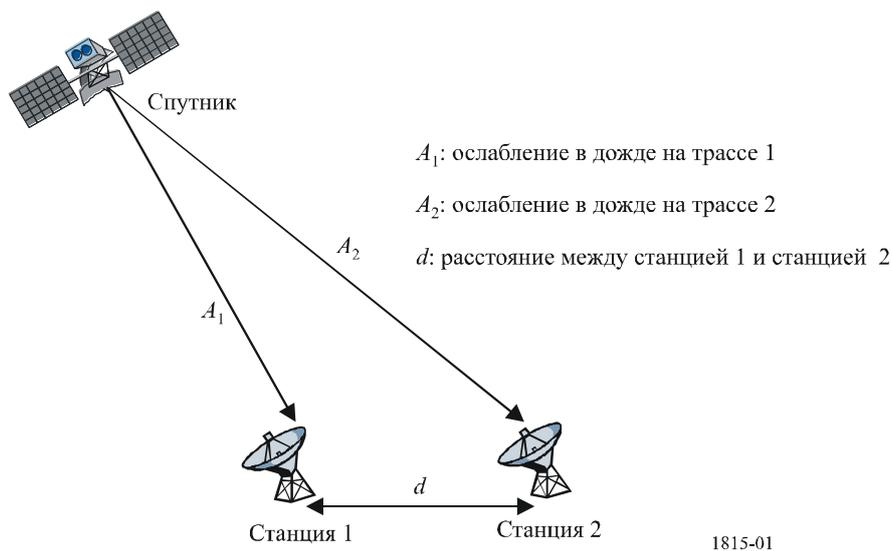
В данном методе рассматриваются статистические и временные характеристики размера дождевого очага, интенсивности дождя и перемещения дождевых очагов, связанные с дифференциальным ослаблением в дожде.

---

\* В 2016 году 3-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла поправки редакционного характера в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

РИСУНОК 1

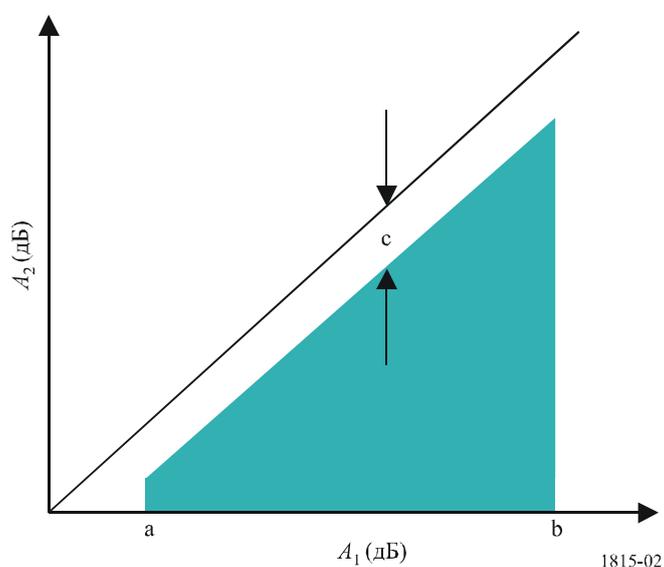
## Геометрия дифференциального ослабления



Геометрия дифференциального ослабления показана на рис. 1, где  $A_1$  и  $A_2$  – значения ослабления в дожде на трассе 1 и трассе 2, соответственно. Требуется получить статистические данные об объединенной вероятности того, что ослабление на первой трассе,  $A_1$ , составляет значения между  $a$  и  $b$ , а ослабление на второй трассе,  $A_2$ , меньше или равно  $A_1 - c$ ; т. е.  $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\}$ . Эта объединенная вероятность показана графически на рис. 2 в виде интегрированной вероятности в пределах затененной области.

РИСУНОК 2

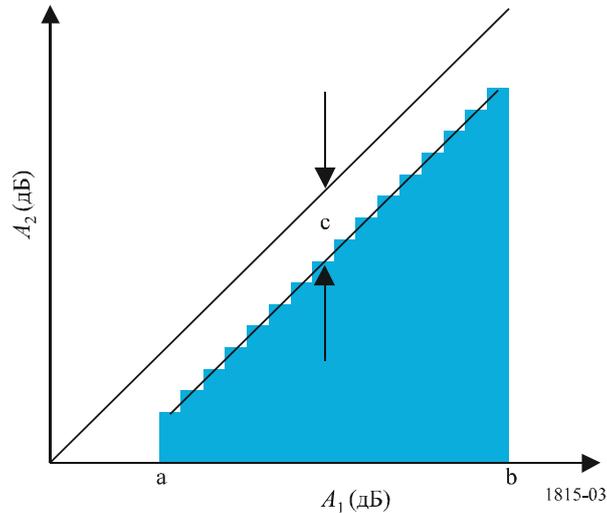
## Требуемое распределение объединенной вероятности



Объединенная вероятность в пределах затененной области на рис. 2 может быть хорошо аппроксимирована в виде суммы интегрированных вероятностей в пределах узких вертикальных прямоугольных областей, как показано на рис. 3.

РИСУНОК 3

Аппроксимация до требуемого распределения объединенной вероятности



Объединенную вероятность в пределах затененной области на рис. 3 можно затем вычислить как разность между объединенной вероятностью в пределах затененной области на рис. 4 и объединенной вероятностью в пределах затененной области на рис. 5.

РИСУНОК 4

$$\Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b)$$

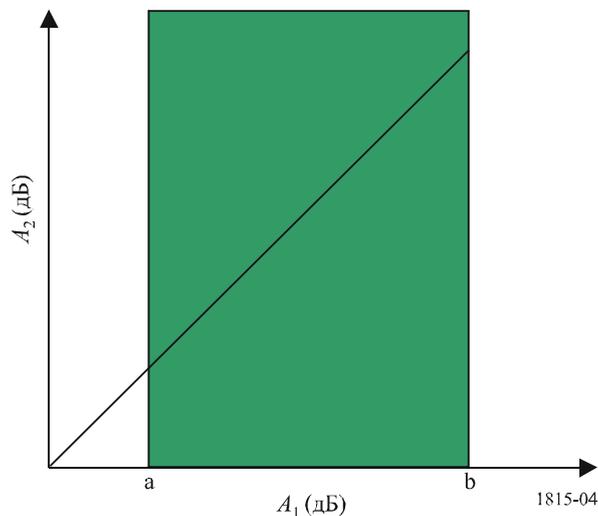
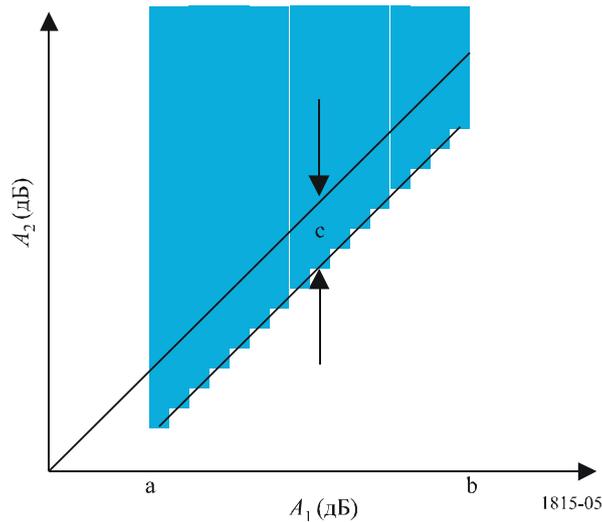


РИСУНОК 5

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta - \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) - \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta + \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) \right\}$$



По данным на рис. 4 и 5 объединенная вероятность  $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\}$  может быть хорошо аппроксимирована в виде:

$$\begin{aligned} & \Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\} \\ &= \Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b) \\ & - \sum_{i=1}^n \left\{ \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta - \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) - \Pr \left( A_1 \geq a + (i-1)\delta + \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) \right\}, \end{aligned}$$

где:

$$\delta = \frac{b-a}{n},$$

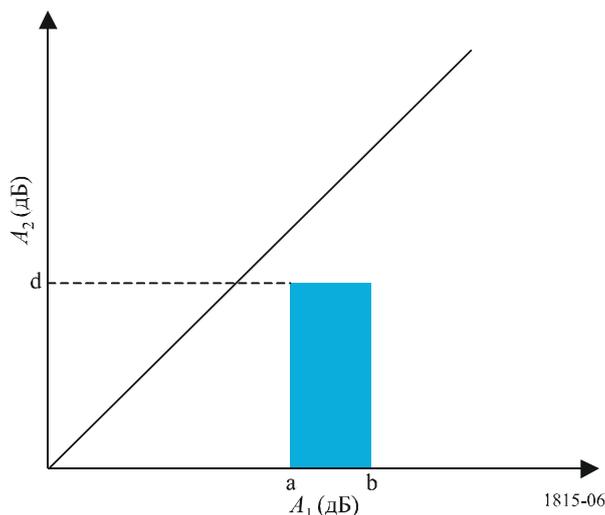
а количество ступеней,  $n$ , выбирается так, чтобы приближение было достаточно точным. Достаточно высокую точность обеспечивает, как правило, размер шага,  $\delta$ , равный 0,01 дБ.

Этот метод может также использоваться для расчета других требуемых видов объединенной вероятности. Например, объединенная вероятность  $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\}$ , показанная на затененной области рис. 6, равна:

$$\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\} = \Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b) - [\Pr(A_1 \geq a, A_2 \geq d) - \Pr(A_1 \geq b, A_2 \geq d)].$$

РИСУНОК 6

$$\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\}$$



## 2 Годовая статистика дифференциального ослабления

Если требуется получить годовую статистику дифференциального ослабления, то вероятность  $\Pr\{A_1 \geq a, A_2 \geq b\}$  можно вычислить с использованием метода прогнозирования, описанного в Приложении 2, на основе подгонки уровней ослабления в дожде для одной станции в зависимости от годовых вероятностей появления событий,  $\Pr\{A_1 \geq a\}$  и  $\Pr\{A_2 \geq b\}$ , к логнормальным распределениям вероятности. Ослабление в дожде в зависимости от годовых вероятностей появления событий можно прогнозировать с использованием метода, описанного в п. 2.2.1.1 Рекомендации МСЭ-R P.618.

Годовую статистику дифференциального ослабления можно получить при использовании следующей процедуры:

*Шаг 1:* Получить данные годового ослабления в дожде в зависимости от вероятности появления событий, используя метод прогнозирования ослабления в дожде, описанный в п. 2.2.1.1 Рекомендации МСЭ-R P.618.

*Шаг 2:* Применить метод прогнозирования дифференциального ослабления в дожде, описанный в разделе 1, где соответствующие вероятности  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$  вычисляются с использованием метода, описанного в Приложении 2.

## 3 Статистика дифференциального ослабления для наихудшего месяца

Если требуется статистика дифференциального ослабления для наихудшего месяца, то с целью преобразования годовой статистики ослабления в дожде для одной станции в статистику ослабления в дожде для одной станции для наихудшего месяца можно использовать Рекомендацию МСЭ-R P.841.

Статистику дифференциального ослабления для наихудшего месяца можно получить при использовании следующей процедуры:

*Шаг 1:* Получить данные годового ослабления в дожде в зависимости от вероятности появления событий, используя метод прогнозирования ослабления в дожде, описанный в п. 2.2.1.1 Рекомендации МСЭ-R P.618.

*Шаг 2:* Преобразовать годовую статистику ослабления в дожде в статистику ослабления в дожде для наихудшего месяца, используя метод МСЭ-R преобразования в статистику для наихудшего месяца, описанный в Рекомендации МСЭ-R P.841.

*Шаг 3:* Применить метод прогнозирования дифференциального ослабления в дожде, описанный в разделе 1, где соответствующие вероятности  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$  вычисляются с использованием метода, описанного в Приложении 2.

## Приложение 2

### Описание метода прогнозирования дифференциального ослабления в дожде

#### 1 Анализ

Метод прогнозирования дифференциального ослабления в дожде предполагает логнормальное распределение интенсивности дождя и ослабления в дожде.

Этот метод прогнозирует значения  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ , объединенной вероятности (%) того, что ослабление на трассе до первой станции будет больше чем  $a_1$ , а ослабление на трассе до второй станции будет больше чем  $a_2$ .  $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$  является произведением двух вероятностей:

$P_r$ , объединенная вероятность того, что дождь идет на обеих станциях, и

$P_a$ , условная объединенная вероятность того, что уровни ослабления превышают  $a_1$  и  $a_2$ , соответственно, при условии, что дождь идет на обеих станциях; т. е.:

$$\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a \quad \%. \quad (1)$$

Эти вероятности равны:

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty} \int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2(1-\rho_r^2)}\right)\right] dr_2 dr_1, \quad (2)$$

где:

$$\rho_r = 0,7 \exp(-d/60) + 0,3 \exp[-(d/700)^2] \quad (3)$$

и

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_1 \ln A_1}{\sigma_{\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_1 \ln A_2}{\sigma_{\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{b_1^2 - 2\rho_a b_1 b_2 + b_2^2}{2(1-\rho_a^2)}\right)\right] db_2 db_1, \quad (4)$$

где:

$$\rho_a = 0,94 \exp(-d/30) + 0,06 \exp[-(d/500)^2], \quad (5)$$

а  $P_a$  и  $P_r$  – дополнительные двумерные нормальные распределения<sup>1</sup>.

Параметр  $d$  – это разнос между двумя станциями (км). Пороговые значения  $R_1$  и  $R_2$  являются решениями уравнения:

$$P_k^{rain} = 100 \times Q(R_k) = 100 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_k}^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr, \quad (6)$$

т. е.:

$$R_k = Q^{-1}\left(\frac{P_k^{rain}}{100}\right), \quad (7)$$

где:

$R_k$ : пороговый уровень для  $k$ -й станции, соответственно;

$P_k^{rain}$ : вероятность возникновения дождя (%);

$Q$ : дополнительное кумулятивное нормальное распределение;

$Q^{-1}$ : обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение;

$P_k^{rain}$ : для конкретного местоположения можно получить исходя из шага 3

Приложения 1 к Рекомендации МСЭ-R P.837, используя либо местные данные, либо карты МСЭ-R скорости выпадения дождевых осадков.

Значения параметров  $m_{\ln A_1}$ ,  $m_{\ln A_2}$ ,  $\sigma_{\ln A_2}$  и  $\sigma_{\ln A_2}$  определяются на основе подгонки уровней ослабления в дожде для каждой отдельной станции,  $A_i$ , в зависимости от вероятности появления события,  $P_i$ , к логнормальному распределению:

$$P_i = P_k^{rain} Q\left(\frac{\ln A_i - m_{\ln A_i}}{\sigma_{\ln A_i}}\right). \quad (8)$$

Эти параметры можно получить для каждого отдельного местоположения или же может быть использовано какое-то одно местоположение. Ослабление в дожде в зависимости от годовой вероятности появления события может быть спрогнозировано при использовании метода, описанного в п. 2.2.1.1 Рекомендации МСЭ-R P.618.

Для каждой станции логнормальное приближение уровней ослабления в дожде в зависимости от годовой вероятности появления события может быть осуществлено следующим образом:

*Шаг 1:* Определить  $P_k^{rain}$  (% времени) – вероятность дождя на  $k$ -й трассе.

*Шаг 2:* Построить набор пар  $[P_i, A_i]$ , где  $P_i$  (% времени) – это вероятность превышения ослабления  $A_i$  (дБ), когда  $P_i \leq P_k^{rain}$ . В конкретных значениях  $P_i$  должен учитывать представляющий интерес набор вероятностей; однако предлагаемый набор процентных значений времени включает 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,5%, 1%, 2%, 3%, 5% и 10%, при условии что  $P_i \leq P_k^{rain}$ .

<sup>1</sup> Приближенное представление этого интеграла приведено в Z. Drezner, and G.O. Wesolowsky. "On the Computation of the Bivariate Normal Integral", Journal of Statistical Computation and Simulation. Vol. 35, 1989, pp. 101–107. Статистический инструмент Matlab содержит встроенную функцию Matlab "mvcdf", которая рассчитывает двумерный нормальный интеграл, и библиотека Python содержит встроенную функцию "mvndst", которая рассчитывает двумерный нормальный интеграл.

Шаг 3: Преобразовать набор пар в  $[P_i, A_i]$   $\left[ Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right), \ln A_i \right]$ ,

где:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Шаг 4: Определить переменные  $m_{\ln A_i}$  и  $\sigma_{\ln A_i}$  путем подгонки методом наименьших квадратов до

значения  $\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right) + m_{\ln A_i}$  для всех  $i$ . Подгонка методом наименьших квадратов может определяться с использованием описанной в Рекомендации МСЭ-Р Р.1057 "поэтапной процедуры для аппроксимации дополнительного интегрального распределения посредством логарифмически нормального дополнительного интегрального распределения".

---