

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1623-1*

**Метод прогнозирования динамики замирания сигнала
на трассах Земля-космос**

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(2003-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что для разнообразных услуг радиосвязи должны выполняться проектные параметры, для чего требуется информация о динамике событий нарушения связи;
- b) что для оценки параметров, связанных с риском отказа, с целью обеспечения определенного качества и надежности обслуживания должна быть известна вероятность возникновения замирания определенной длительности;
- c) что для оценки внутренних параметров контура управления системы борьбы с замираниями (FMT) (используемого для повышения качества и надежности обслуживания) должна быть известна вероятность появления наклона кривой замирания, соответствующего заданному порогу затухания;
- d) что существует необходимость в обеспечении технических данных для расчета статистики длительности замирания, длительности промежутка между последовательными событиями замирания и наклона кривой замирания,

рекомендует,

- 1 чтобы методы, описанные в п. 2.2 Приложения 1, использовались для расчета статистики длительности замирания, обусловленного совместным воздействием затухания (в газах, облаках и дожде) и мерцания на трассах Земля-космос;
- 2 чтобы методы, описанные в п. 3.2 Приложения 1, использовались для расчета статистики наклона кривой замирания, обусловленного затуханием на трассах Земля-космос.

Приложение 1**1 Введение**

При проектировании различных систем электросвязи динамические характеристики замирания при распространении в атмосфере позволяют оптимизировать пропускную способность систем и обеспечить выполнение критериев надежности и качества. Примерами являются фиксированные сети, которые содержат космический сегмент, и системы, в которых применяются методы борьбы с замираниями или совместного использования ресурсов.

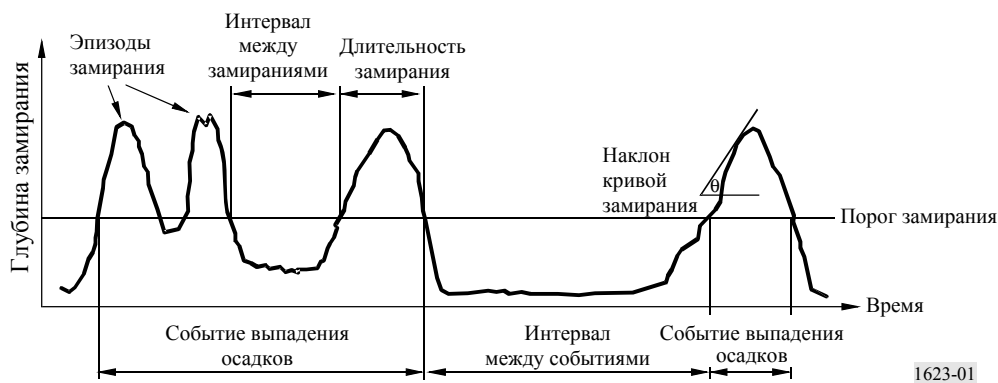
Можно определить несколько временных масштабов, и полезно иметь статистические данные о наклоне кривой замирания, длительности замирания и длительности интервала между последовательными замираниями для заданного уровня затухания (рисунок 1).

Длительность замирания определяется как интервал времени между двумя пересечениями участка кривой, расположенного выше одного и того же порога затухания, а длительность интервала между последовательными замираниями – как временной интервал между двумя пересечениями участка кривой, расположенного ниже одного и того же порога затухания. Наклон кривой замирания определяется как скорость изменения затухания во времени.

* *Примечание секретариата БР.* – В уравнение (20) были внесены редакционные поправки в сентябре 2008 года.

РИСУНОК 1

Величины, характеризующие динамику событий замирания



В контексте критериев готовности особый интерес представляет проведение различий между замираниями длительностью меньше и больше 10 с. Знание распределения длительности замирания как функции глубины замирания также является предпосылкой для применения концепций риска при предоставлении услуг электросвязи.

Кроме того, для оценки требуемой минимальной скорости слежения системы борьбы с замираниями необходимы данные об ожидаемом наклоне кривой замирания.

2 Длительность замирания и интервала между последовательными замираниями

2.1 Требования к данным о длительности замирания

Длительность замирания – важный параметр, который должен учитываться при проектировании систем по нескольким причинам:

- длительность нарушения радиосвязи и недоступность системы: статистика длительности замирания обеспечивает информацию о количестве и длительности нарушений радиосвязи и периодов недоступности системы из-за распространения сигнала для данной линии связи и услуги;
- совместное использование системных ресурсов: с точки зрения оператора важно иметь представление о статистической длительности события, чтобы выделить ресурсы для других пользователей;
- FMT: длительность замирания имеет значение для определения статистической длительности промежутка времени, в течение которого система должна оставаться в режиме компенсации, до ее возвращения в номинальный режим;
- кодирование и модуляция в системе: длительность замирания – главный элемент в процессе выбора кодов с упреждающей коррекцией ошибок и наилучших схем модуляции; в случае спутниковых систем связи канал распространения вносит не независимые ошибки, а блоки ошибок. Длительность замирания непосредственно влияет на выбор схемы кодирования (размер кодового слова в блочных кодах, чередование в каскадных кодах и т. д.).

2.2 Метод прогнозирования длительности замирания

Длительность замирания может описываться двумя различными интегральными функциями распределения вероятностей:

- 1 $P(d > D | a > A)$, вероятность возникновения замирания длительностью d больше, чем D (с), при условии что затухание a больше, чем A (дБ). Эту вероятность можно оценить по отношению количества замираний длительностью больше, чем D , к общему количеству наблюдаемых замираний, при условии что порог A превышен.

- 2 $F(d > D|a > A)$, интегральная вероятность превышения, или, что эквивалентно, общая доля (от 0 и 1) времени замирания, обусловленная замираниями длительностью d больше, чем D (с), при условии что затухание a больше, чем A (дБ). Эту вероятность можно оценить по отношению общего времени замирания, обусловленного замираниями длительностью больше, чем D , при условии что порог A превышен, к общему времени превышения порога.

Для данного эталонного периода количество замираний длительностью больше, чем D , оценивается путем умножения вероятности возникновения замирания $P(d > D|a > A)$ на общее количество замираний, превышающих порог, $N_{tot}(A)$. Аналогично, оценка суммарного времени превышения, обусловленного событиями замирания длительностью больше, чем D , получается путем умножения доли времени $F(d > D|a > A)$ на суммарное время, в течение которого порог превышен, $T_{tot}(A)$.

Представленная здесь двухсегментная модель состоит из функции логарифмически нормального распределения для длительного замирания и степенной функции – для кратковременного замирания. Граница между кратковременным и длительным замираниями определяется пороговой длительностью D_t , рассчитанной в рамках модели. Модель на базе степенной функции пригодна для замираний длительностью больше 1 с. Замирания меньшей длительности не вносят значительного вклада в общее время нарушения связи.

Далее даются оценки параметров, требуемых для модели, и, наконец, определяется двухсегментная модель для обеих функций распределения, т. е. для вероятности возникновения P и вероятности превышения (или доли времени) F .

Модель, как ожидается, будет работать при длительностях больше 1 с.

В качестве входных данных для этой модели требуются следующие параметры:

- f : частота (ГГц): 10–50 ГГц;
 φ : угол места (градусы): 5–60°;
 A : порог затухания (дБ).

Пошаговый расчет распределения длительности замирания производится следующим образом:

Шаг 1: Рассчитывается средняя длительность D_0 логарифмически нормального распределения доли времени замирания, обусловленной замираниями большой длительности, при условии что затухание больше, чем A , как:

$$D_0 = 80 \varphi^{-0,4} f^{1,4} A^{-0,39} \quad \text{с.} \quad (1)$$

Шаг 2: Рассчитывается стандартное отклонение σ логарифмически нормального распределения доли времени замирания, обусловленной замираниями большой длительности, как:

$$\sigma = 1,85 f^{-0,05} A^{-0,027}. \quad (2)$$

Шаг 3: Рассчитывается показатель γ степенной функции распределения доли времени замирания, обусловленной кратковременными замираниями, как:

$$\gamma = 0,055 f^{0,65} A^{-0,003}. \quad (3)$$

Шаг 4: Рассчитывается граница между длительностями кратковременного и долговременного замирания D_t как:

$$D_t = D_0 e^{p_1 \sigma^2 + p_2 \sigma - 0,39} \quad \text{с,} \quad (4)$$

где:

$$p_1 = 0,885\gamma - 0,814 \quad (5)$$

$$p_2 = -1,05\gamma^2 + 2,23\gamma - 1,61. \quad (6)$$

Шаг 5: Рассчитывается средняя длительность D_2 логарифмически нормального распределения вероятности возникновения событий замирания большой длительности как:

$$D_2 = D_0 \cdot e^{-\sigma^2} \quad \text{с.} \quad (7)$$

Шаг 6: Рассчитывается доля времени k , связанная с замираниями длительностью меньше, чем D_t , как:

$$k = \left[1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2} (1 - \gamma) Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t \gamma Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где:

Q : стандартная интегральная функция распределения для нормально распределенной переменной:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx. \quad (9)$$

Шаг 7: Рассчитывается вероятность возникновения событий замирания длительностью d больше, чем D , при условии что затухание a больше, чем A , как:

$$\text{Для } 1 \leq D \leq D_t \quad P(d > D | a > A) = D^{-\gamma}. \quad (10)$$

$$\text{Для } D > D_t \quad P(d > D | a > A) = D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}. \quad (11)$$

Шаг 8: Рассчитывается интегральная вероятность превышения, т. е. общая доля времени замирания, обусловленного замираниями длительностью d больше, чем D :

$$\text{Для } 1 \leq D \leq D_t \quad F(d > D | a > A) = \left[1 - k \left(\frac{D}{D_t} \right)^{1-\gamma} \right]. \quad (12)$$

$$\text{Для } D > D_t \quad F(d > D | a > A) = (1 - k) \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}. \quad (13)$$

Шаг 9: Если требуется, общее количество замираний длительностью d больше, чем D , для данного порога A можно рассчитать из выражения:

$$N(D, A) = P(d > D | a > A) \times N_{tot}(A). \quad (14)$$

Аналогичным образом, общее время замирания длительностью d больше, чем D , для порога A составляет:

$$T(d > D | a > A) = F(d > D | a > A) \times T_{tot}(A) \quad \text{с.} \quad (15)$$

для представляющего интерес эталонного периода, где $T_{tot}(A)$ – суммарное время, когда порог A превышен, и $N_{tot}(A)$ – общее количество замираний, превышающих минимальную длительность в 1 с. Эти параметры могут быть получены следующим способом:

$T_{tot}(A)$ должно быть определено из локальных данных. Если эта долгосрочная статистика отсутствует, то оценку можно рассчитать по Рекомендации МСЭ-R P.618. В этом случае процедура состоит в расчете интегральной функции распределения (CDF) для общего затухания, определении процента времени, когда рассматриваемый порог затухания A превышает, а затем в расчете соответствующего общего времени превышения $T_{tot}(A)$ для рассматриваемого эталонного периода.

После того как определено $T_{tot}(A)$, величину $N_{tot}(A)$ можно рассчитать как:

$$N_{tot}(A) = T_{tot}(A) \cdot \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{1-\gamma}{D_t^{1-\gamma}}. \quad (16)$$

Вышеописанный метод был проверен с использованием банка данных 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи, содержащего значения длительности замирания для частот от 11 до 50 ГГц и углов места от 6° до 60° . Было определено среднее арифметическое логарифмической ошибки (отношение прогнозируемой длительности замирания к измеренной на том же уровне вероятности), которое составило 30% для замирания длительностью меньше 10 с, и от -25% до -80% для замирания длительностью больше 10 с. В отношении стандартного отклонения было установлено, что его величина варьируется в диапазоне от 80% до 150%, что показывает высокую естественную изменчивость этого параметра.

2.3 Длительность интервала между последовательными замираниями

Помимо статистики длительности замирания, также полезно характеризовать промежуток времени между двумя событиями замирания, который называется длительностью интервала между последовательными замираниями. Когда уровень принятого сигнала вновь превышает пороговое значение после события нарушения радиосвязи, с точки зрения оператора важно знать статистическую величину длительности интервала до следующего события нарушения связи.

Результаты экспериментов показывают, что статистика длительности интервалов между последовательными замираниями может иметь логарифмически нормальное распределение; однако статистика кратковременных интервалов между последовательными замираниями вследствие тропосферного мерцания, как ожидается, будет иметь вид степенной функции, как это определено для статистики кратковременного замирания.

3 Наклон кривой замирания

3.1 Требования к данным о наклоне кривой замирания

Важно иметь возможность количественного определения наклона кривой замирания для систем спутниковой связи, для которых могут применяться методы борьбы с замираниями. Знание наклона кривой замирания для принятого сигнала полезно при разработке контура управления, который может отслеживать изменения сигнала, либо позволяет лучше осуществлять краткосрочное прогнозирование условий распространения. В обоих случаях соответствующие данные – это наклон медленно изменяющегося компонента сигнала, который является результатом фильтрации мерцания и быстрых изменений затухания в дожде.

3.2 Метод прогнозирования наклона кривой замирания

Распределение вероятности наклона кривой замирания зависит от климатических параметров, распределения размеров капель и, следовательно, от вида дождя. Горизонтальная составляющая скорости ветра, перпендикулярная трассе, является еще одним параметром, описывающим влияние погоды, который определяет скорость, с которой горизонтальный профиль дождя проходит через трассу распространения. Кроме того, ожидаемый наклон кривой замирания при заданном уровне

затухания, вероятно, будет уменьшаться по мере увеличения длины трассы из-за сглаживающего эффекта суммирования вкладов различных видов дождя и будет возрастать при увеличении угла места на трассах Земля-космос.

На измеренный наклон кривой замирания также влияют динамические параметры, или постоянные времени, приемной системы. Приемник с более длительным временем интегрирования уменьшает мгновенное изменение замирания и растягивает его на более продолжительный период времени.

Прогнозируемое распределение наклона кривой замирания зависит от уровня затухания $A(t)$ и от длины интервала времени Δt . Кроме того, распределение зависит от частоты среза по уровню 3 дБ фильтра нижних частот, который используется, чтобы удалить из сигнала компоненты, обусловленные тропосферным мерцанием и быстрыми изменениями затухания в дожде. Результаты экспериментов показывают, что частота среза по уровню 3 дБ в 0,02 Гц позволяет должным образом отфильтровать мерцание и быстрые изменения затухания в дожде. Если мерцание и быстрые изменения затухания в дожде не будут отфильтрованы, то в сигнале появятся более сильные флуктуации, и модель будет прогнозировать только флуктуации, обусловленные ослаблением в дожде. В этом случае частота среза, которую требуется использовать, – это частота выборки.

В модели наклон кривой замирания ζ в некоторый момент времени определяется на основе отфильтрованных данных как:

$$\zeta(t) = \frac{A\left(t + \frac{1}{2} \Delta t\right) - A\left(t - \frac{1}{2} \Delta t\right)}{\Delta t} \quad \text{дБ/с.} \quad (17)$$

Модель действительна для следующих диапазонов параметров:

- частоты от 10 до 30 ГГц
- углы места от 10° до 50°.

В качестве входных данных для модели требуются следующие параметры:

- A : уровень ослабления (дБ): 0–20 дБ
- f_B : частота среза по уровню 3 дБ фильтра нижних частот (Гц): 0,001–1 Гц;
- Δt : длина интервала времени (с), в течение которого рассчитывается наклон кривой замирания: 2–200 с.

Пошаговый расчет распределения наклона кривой замирания производится следующим образом:

Шаг 1: Рассчитывается функция F , которая дает зависимость от длины интервала времени Δt и частоты среза по уровню 3 дБ фильтра нижних частот f_B :

$$F(f_B, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{(1/f_B^b + (2\Delta t)^b)^{1/b}}}, \quad (18)$$

где $b = 2,3$.

Шаг 2: Рассчитывается стандартное отклонение σ_ζ условного наклона кривой замирания при заданном уровне затухания как:

$$\sigma_\zeta = s F(f_B, \Delta t) A \quad \text{дБ/с,} \quad (19)$$

где s – параметр, который зависит от климата и угла места; общее среднее значение s для Европы и Соединенных Штатов Америки при углах места 10°–50° равно 0,01.

Шаг 3а: Рассчитывается $p(\zeta|A)$, условная вероятность (функция плотности вероятности) того, что наклон кривой замирания равен ζ для заданного значения затухания, A :

$$p(\zeta|A) = \frac{2}{\pi\sigma_\zeta (1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2}. \quad (20)$$

Шаг 3b: Если требуется, рассчитывается $P(\zeta|A)$, условная вероятность (дополнительная интегральная функция распределения) того, что наклон кривой замирания ζ превышен для заданного значения затухания, A :

$$P(\zeta|A) = \frac{1}{2} - \frac{(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi(1+(\zeta/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{\arctan(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi}. \quad (21)$$

или рассчитывается $P(|\zeta| | A)$, условная вероятность того, что абсолютное значение наклона кривой замирания ζ превышено для заданного значения затухания, A :

$$P(|\zeta| | A) = \int_{-\infty}^{-\zeta} p(x|A) dx + \int_{\zeta}^{\infty} p(x|A) dx = 1 - \frac{2(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi(1+(|\zeta|/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{2 \arctan(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi}. \quad (22)$$

Модель, которая описывается уравнением (22), была проверена по данным для частот от 12,5 ГГц до 50 ГГц. Эти результаты показали хорошее соответствие форме интегральной функции распределения наклона кривой замирания, а также ее изменению с изменением порога затухания A , длины интервала Δt и частоты среза по уровню 3 дБ фильтра нижних частот f_B .