

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.1853-1
(02/2012)

**Синтез временных рядов тропосферного
ослабления**

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-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	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, 2013 г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1853-1

Синтез временных рядов тропосферного ослабления

(2009-2011)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены методы синтеза ослабления в дожде и мерцания для наземных трасс и трасс Земля-космос, а также общего ослабления и тропосферного мерцания для трасс Земля-космос.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что для надлежащего планирования наземных систем связи и систем связи Земля-космос необходимо иметь соответствующие методы имитации изменения во времени состояния канала распространения;
- b) что разработаны методы, позволяющие с достаточной точностью имитировать изменение во времени состояния канала распространения,

рекомендует,

- 1 чтобы для синтеза временных рядов ослабления в дожде для наземных трасс и трасс Земля-космос применялся метод, представленный в Приложении 1;
- 2 чтобы для синтеза временных рядов мерцания для наземных трасс и трасс Земля-космос применялся метод, представленный в Приложении 1;
- 3 чтобы для синтеза временных рядов общего тропосферного ослабления и тропосферного мерцания для трасс Земля-космос применялся метод, представленный в Приложении 1.

Приложение 1**1 Введение**

Для планирования и проектирования наземных систем радиосвязи и систем радиосвязи Земля-космос необходимо иметь возможность синтеза изменения во времени состояния канала распространения. Эта информация может потребоваться, например, при разработке различных способов ослабления последствий замирания, таких как адаптивное кодирование и модуляция, а также автоматическое регулирование мощности.

Методика, представленная в настоящем Приложении, обеспечивает способ синтеза временных рядов ослабления в дожде и мерцания для наземных трасс и трасс Земля-космос и общего тропосферного ослабления и тропосферного мерцания для трасс Земля-космос, которые аппроксимируют статистические данные об ослаблении в дожде в конкретном местоположении.

2 Метод синтеза временных рядов ослабления в дожде

2.1 Обзор

В рамках метода синтеза временных рядов делается допущение, что долговременные статистические данные об ослаблении в дожде имеют логарифмически нормальное распределение. Несмотря на то что распределения в рекомендуемых МСЭ-R методах прогнозирования ослабления в дожде, представленных в Рекомендации МСЭ-R P.530 для наземных трасс и в Рекомендации МСЭ-R P.618 для трасс Земля-космос, не являются точно логарифмически нормальными, эти распределения ослабления в дожде хорошо аппроксимируются логарифмически нормальным распределением в наиболее значимом диапазоне вероятности превышения. С помощью методов прогнозирования ослабления в дожде в наземных трассах и трассах Земля-космос прогнозируется ненулевое ослабление в дожде при значениях вероятности превышения, превосходящих значение вероятности дождя; однако, метод синтеза временных рядов позволяет корректировать временные ряды ослабления, так что ослабление в дожде, соответствующее значениям вероятности превышения, превосходящим значение вероятности дождя, составляет 0 дБ.

Для наземных трасс метод синтеза временных рядов действителен для частот в диапазоне 4–40 ГГц и длины трассы 2–60 км.

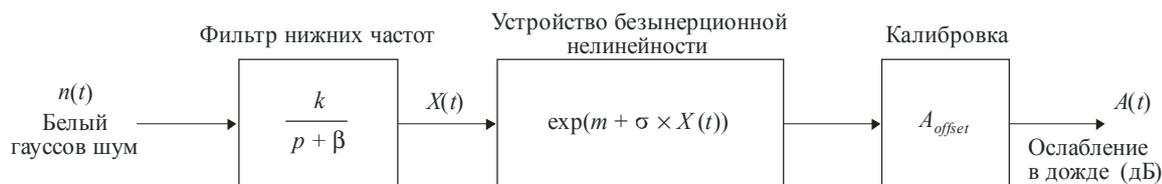
Для трасс Земля-космос метод синтеза временных рядов действителен для частот в диапазоне 4–55 ГГц и углов места 5° – 90° .

С помощью метода синтеза временных рядов генерируется временной ряд, воспроизводящий статистические данные о спектральных характеристиках, крутизне и длительности замирания для событий ослабления в дожде. Статистические данные о длительности периодов между событиями замирания также воспроизводятся, но только в рамках отдельных событий ослабления.

Как показано на рисунке 1, временной ряд ослабления в дожде, $A(t)$, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума, $n(t)$. Белый гауссов шум проходит через фильтр нижних частот, преобразуется из нормального распределения в логарифмически нормальное распределение в устройстве безынерционной нелинейности и калибруется для согласования с необходимыми статистическими данными об ослаблении.

РИСУНОК 1

Функциональная схема синтезатора временных рядов ослабления в дожде



P.1853-01

Синтезатор временных рядов определяют следующие пять параметров:

- m : математическое ожидание логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- σ : стандартное отклонение логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- p : вероятность дождя;
- β : параметр, описывающий изменение во времени (с^{-1});
- A_{offset} : смещение, которое корректирует временные ряды для согласования с вероятностью дождя (дБ).

2.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в дожде $A_{rain}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется метод постепенного приближения.

А Оценка параметров m и σ

Параметры m и σ определяются по интегральной функции распределения ослабления в дожде в зависимости от вероятности события. Статистические данные об ослаблении в дожде могут быть определены на основании данных местных измерений или, в случае отсутствия данных измерений, могут использоваться методы прогнозирования ослабления в дожде, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.530 для наземных трасс и в Рекомендации МСЭ-R P.618 для трасс Земля-космос.

Для рассматриваемых трассы и частоты логарифмически нормальный подбор ослабления в дожде в зависимости от вероятности события производится следующим образом:

Этап А1: Определяется P^{rain} (в % времени), вероятность дождя на трассе. P^{rain} может быть хорошо аппроксимирована как $P_0(Lat, Lon)$ на основе Рекомендации МСЭ-R P.837.

Этап А2: Строится множество пар $[P_i, A_i]$, где P_i (в % времени) вероятность того, что ослабление A_i (dB) будет превышено при $P_i \leq P^{rain}$. В конкретных значениях P_i должен учитываться рассматриваемый диапазон вероятности; однако предлагается следующий набор значений процентов времени 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5 и 10%, при ограничении, что $P_i \leq P^{rain}$.

Этап А3: Это множество пар $[P_i, A_i]$ преобразуется в $\left[Q^{-1}\left(\frac{P_i}{100}\right), \ln A_i \right]$,

где:

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

Этап А4: Определяются переменные $m_{\ln A_i}$ и $\sigma_{\ln A_i}$ путем подбора методом наименьших квадратов

таким образом, чтобы $\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} Q^{-1}\left(\frac{P_i}{100}\right) + m_{\ln A_i}$ для всех i . Подбор методом наименьших

квадратов может быть определен, используя "поэтапную процедуру для аппроксимации дополнительного интегрального распределения посредством логарифмически нормального дополнительного интегрального распределения", которая описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

В Параметр фильтра нижних частот

Этап В1: Параметр $\beta = 2 \times 10^{-4}$ (с⁻¹).

С Смещение ослабления

Этап С1: Смещение ослабления, A_{offset} (дБ), рассчитывается следующим образом:

$$A_{offset} = e^{m + \sigma Q^{-1}\left(\frac{P^{rain}}{100}\right)}. \quad (2)$$

Д Синтез временных рядов

Временной ряд $A_{rain}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$ синтезируется следующим образом:

Этап D1: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки, T_s , составляющий 1 с.

Этап D2: Устанавливается $X(0) = 0$.

Этап D3: Выполняется фильтрация временного ряда шума, $n(kT_s)$, с помощью рекурсивного фильтра нижних частот, определяемого следующим образом:

$$X(kT_s) = \rho \times X((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho^2} \times n(kT_s) \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где:

$$\rho = e^{-\beta T_s}. \quad (4)$$

Этап D4: Рассчитывается $Y_{rain}(kT_s)$, при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$Y_{rain}(kT_s) = e^{m + \sigma X(kT_s)}. \quad (5)$$

Этап D5: Рассчитывается $A_{rain}(kT_s)$ (дБ), при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$A_{rain}(kT_s) = \text{Maximum}[Y(kT_s) - A_{offset}, 0]. \quad (6)$$

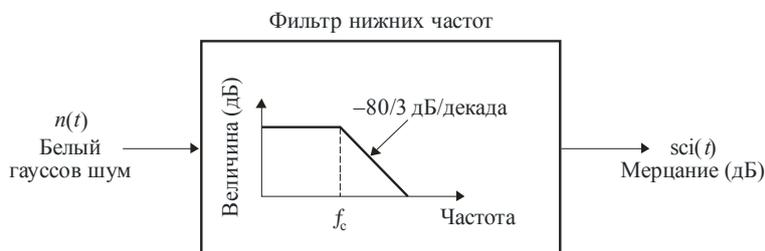
Этап D6: Из синтезированного временного ряда отбрасываются первые 200 000 выборок (соответствующие переходному периоду в фильтре). События ослабления в дожде представлены последовательностями, значения которых превышают 0 дБ для ряда последовательных выборок.

3 Метод синтеза временных рядов мерцания

Как показано на рисунке 2, временной ряд мерцания, $sci(t)$, может генерироваться путем фильтрации белого гауссова шума, $n(t)$, так чтобы спектр асимптотической мощности отфильтрованного временного ряда характеризовался частотой спада $f^{-8/3}$ и частотой среза f_c , 0,1 Гц. Следует отметить, что стандартное отклонение мерцания возрастает с возрастанием ослабления в дожде.

РИСУНОК 2

Функциональная схема синтезатора временных рядов мерцания



P.1853-02

4 Метод синтеза временных рядов совокупного объема жидкой воды в облаке

4.1 Обзор

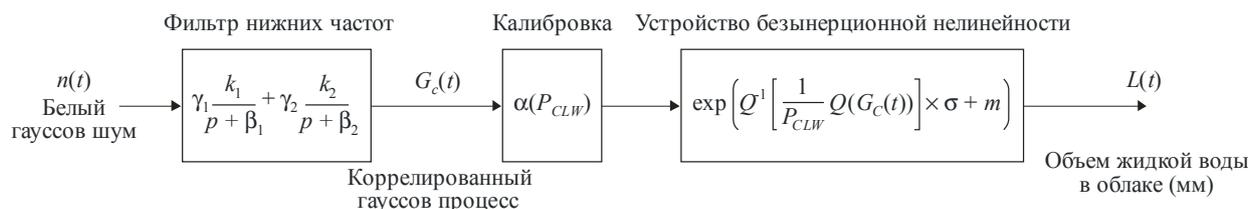
Согласно Рекомендации МСЭ-R P.840 метод синтеза временных рядов аппроксимирует статистику совокупного долговременного объема жидкой воды (ILWC) логарифмически нормальным распределением.

С помощью метода синтеза временных рядов генерируется временной ряд, воспроизводящий статистические данные о спектральных характеристиках, диапазоне изменений и длительности событий наличия объема жидкой воды в облаке.

Как показано на рисунке 3, временной ряд жидкого объема, $L(t)$, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума, $n(t)$. Белый гауссов шум проходит через фильтр нижних частот, усекается для соответствия желательному значению вероятности наличия облака и преобразуется из усеченной формы нормального распределения в условное логарифмически нормальное распределение в устройстве безынерционной нелинейности.

РИСУНОК 3

Функциональная схема синтезатора временных рядов ILWC



P.1853-03

Синтезатор временных рядов определяют следующие восемь параметров:

- m : математическое ожидание логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- σ : стандартное отклонение логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- P_{CLW} : вероятность облаков;
- α : порог усечения коррелированного гауссова шума;
- β_1 : параметр, описывающий изменение во времени быстрого компонента процесса (c^{-1});
- β_2 : параметр, описывающий изменение во времени медленного компонента процесса (c^{-1});
- γ_1 : параметр, описывающий вес быстрого компонента процесса;
- γ_2 : параметр, описывающий вес медленного компонента процесса.

4.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов объема жидкой воды в облаке $L(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется метод постепенного приближения.

A Оценка параметров m , σ и P_{CLW}

Параметры логарифмически нормального распределения – математическое ожидание, m , стандартное отклонение, σ , и вероятность наличия жидкой воды, P_{CLW} , – доступны в форме карт, представленных в Рекомендации МСЭ-R P.840.

Для рассматриваемого местоположения условные логарифмически нормальные параметры определяются следующим образом:

Этап А1: Определяются параметры $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, P_{CLW1}, P_{CLW2}, P_{CLW3}$ и P_{CLW4} в четырех ближайших точках координатной сетки цифровых карт, представленных в Рекомендации МСЭ-R P.840.

Этап А2: Определяются значения параметров m, σ и P_{CLW} в желательном местоположении путем выполнения билинейной интерполяции четырех значений каждого параметра в четырех точках координатной сетки, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

B Параметры фильтра нижних частот

Этап В1: Параметр $\beta_1 = 7,17 \times 10^{-4}$ (c^{-1}).

Этап В2: Параметр $\beta_2 = 2,01 \times 10^{-5}$ (c^{-1}).

Этап В3: Параметр $\gamma_1 = 0,349$.

Этап В4: Параметр $\gamma_2 = 0,830$.

C Порог усечения

Этап C1: Порог усечения α рассчитывается следующим образом:

$$\alpha = Q^{-1}(P_{CLW}), \quad (7)$$

где Q – функция, определенная в п. 2.2.A и описанная в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

D Синтез временных рядов

Временной ряд, $L(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$ синтезируется следующим образом:

Этап D1: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки, T_s , составляющий 1 с.

Этап D2: Устанавливается $X_1(0) = 0; X_2(0) = 0$.

Этап D3: Выполняется фильтрация временного ряда шума, $n(kT_s)$, с помощью двух рекурсивных фильтров нижних частот, определяемых следующим образом:

$$\begin{cases} X_1(kT_s) = \rho_1 \times X_1((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_1^2} \times n(kT_s) \\ X_2(kT_s) = \rho_2 \times X_2((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_2^2} \times n(kT_s) \end{cases} \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

где:

$$\begin{cases} \rho_1 = e^{-\beta_1 T_s} \\ \rho_2 = e^{-\beta_2 T_s} \end{cases}. \quad (9)$$

Этап D4: Рассчитывается $G_c(kT_s)$, при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$G_c(kT_s) = \gamma_1 \times X_1(kT_s) + \gamma_2 \times X_2(kT_s). \quad (10)$$

Этап D5: Рассчитывается $L(kT_s)$ (дБ), при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$L(kT_s) = \begin{cases} \exp\left(Q^{-1}\left[\frac{1}{P_{CLW}}Q(G_c(kT_s))\right] \times \sigma + m\right) & \text{при } G_c(kT_s) > \alpha \\ 0 & \text{при } G_c(kT_s) \leq \alpha \end{cases}. \quad (11)$$

Этап D6: Из синтезированного временного ряда отбрасываются первые 500 000 выборок (соответствующие переходному периоду в фильтре). События наличия облака представлены последовательностями, значения которых превышают 0 мм для ряда последовательных выборок.

5 Метод синтеза временных рядов совокупного объема водяных паров

5.1 Обзор

В рамках метода синтеза временных рядов делается допущение, что долговременные статистические данные о совокупном объеме водяных паров (IWVC) характеризуются распределением Вейбулла. Несмотря на то что рекомендуемые МСЭ-R распределения IWVC, прогнозируемые в Рекомендации МСЭ-R P.836, не являются точно распределениями Вейбулла, эти распределения IWVC хорошо аппроксимируются распределением Вейбулла в наиболее значимом диапазоне вероятности превышения.

С помощью метода синтеза временных рядов генерируется временной ряд, воспроизводящий спектральные характеристики и распределение объема водяных паров.

Как показано на рисунке 4, временной ряд объема водяных паров, $V(t)$, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума, $n(t)$. Белый гауссов шум проходит через фильтр нижних частот и преобразуется из нормального распределения в распределение Вейбулла в устройстве безынерционной нелинейности.



P.1853-04

Синтезатор временных рядов определяют следующие три параметра:

- к: параметр распределения Вейбулла IWVC;
- λ : параметр распределения Вейбулла IWVC;
- β_v : параметр, описывающий изменение во времени (c^{-1}).

5.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов IWVC $V(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется метод постепенного приближения.

A Оценка параметров k и λ

Параметры k и λ определяются по интегральной функции распределения IWVC в зависимости от вероятности события. Статистические данные IWVC могут быть определены на основании данных местных измерений или, в случае отсутствия данных измерений, могут использоваться методы прогнозирования IWVC, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.836.

Для рассматриваемого местоположения подбор IWVC Вейбулла в зависимости от вероятности события производится следующим образом:

Этап А1: Строится множество пар $[P_i, V_i]$, где P_i (% времени) вероятность того, что IWVC V_i (мм) будет превышено. В конкретных значениях P_i должен учитываться рассматриваемый диапазон вероятности; однако предлагается следующий набор значений процентов времени 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30 и 50%.

Этап А2: Это множество пар $[P_i, V_i]$ преобразуется в $[\ln(-\ln P_i), \ln V_i]$.

Этап А3: Определяются промежуточные переменные a и b путем подбора методом наименьших квадратов соответствия линейной функции:

$$\ln(-\ln P_i) = a \ln V_i + b \quad (12)$$

следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln V_i \ln(-\ln P_i) - \sum_{i=1}^n \ln V_i \sum_{i=1}^n \ln(-\ln P_i)}{n \sum_{i=1}^n [\ln V_i]^2 - \left[\sum_{i=1}^n \ln V_i \right]^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln P_i) - a \sum_{i=1}^n \ln V_i}{n} \end{array} \right. \quad (13)$$

Этап А4: Определяются параметры κ и λ следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa = a \\ \lambda = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \end{array} \right. \quad (14)$$

В Параметр фильтра нижних частот

Этап В1: Параметр $\beta_V = 3,24 \times 10^{-6}$ (с^{-1}).

С Синтез временных рядов

Временной ряд, $V(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$ синтезируется следующим образом:

Этап С1: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки, T_s , составляющий 1 с.

Этап С2: Устанавливается $G_V(0) = 0$.

Этап С3: Выполняется фильтрация временного ряда шума, $n(kT_s)$, с помощью рекурсивного фильтра нижних частот, определяемого следующим образом:

$$G_V(kT_s) = \rho \times G_V((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho^2} \times n(kT_s) \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

где:
$$\rho = e^{-\beta_V T_s} \quad (16)$$

Этап С4: Рассчитывается $V(kT_s)$, при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$V(kT_s) = \lambda (-\log[Q(G_V(kT_s))])^{1/\kappa}, \quad (17)$$

где Q – функция, определенная в п. 2.2.А и описанная в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап С5: Из синтезированного временного ряда отбрасываются первые 500 000 выборок (соответствующие переходному периоду в фильтре).

6 Метод синтеза временных рядов общего ослабления и мерцания для трасс Земля-космос

6.1 Обзор

Временные ряды общего ослабления и мерцания генерируются с использованием схемы, представленной на рисунке 5, и методов, описанных в разделах выше. Введена надлежащая корреляция между наличием облаков и дождя. Этот коэффициент корреляции и тот факт, что вероятность облаков на линии выше вероятности дождя, гарантирует, что в условиях события дождя всегда возникают облака.

Объем жидкой воды в облаке интерполируется, если одновременно подтверждены следующие два критерия:

- возникло событие дождя (ослабление в синтетическом дожде больше 0 дБ);
- ILWC превышает порог 1 мм.

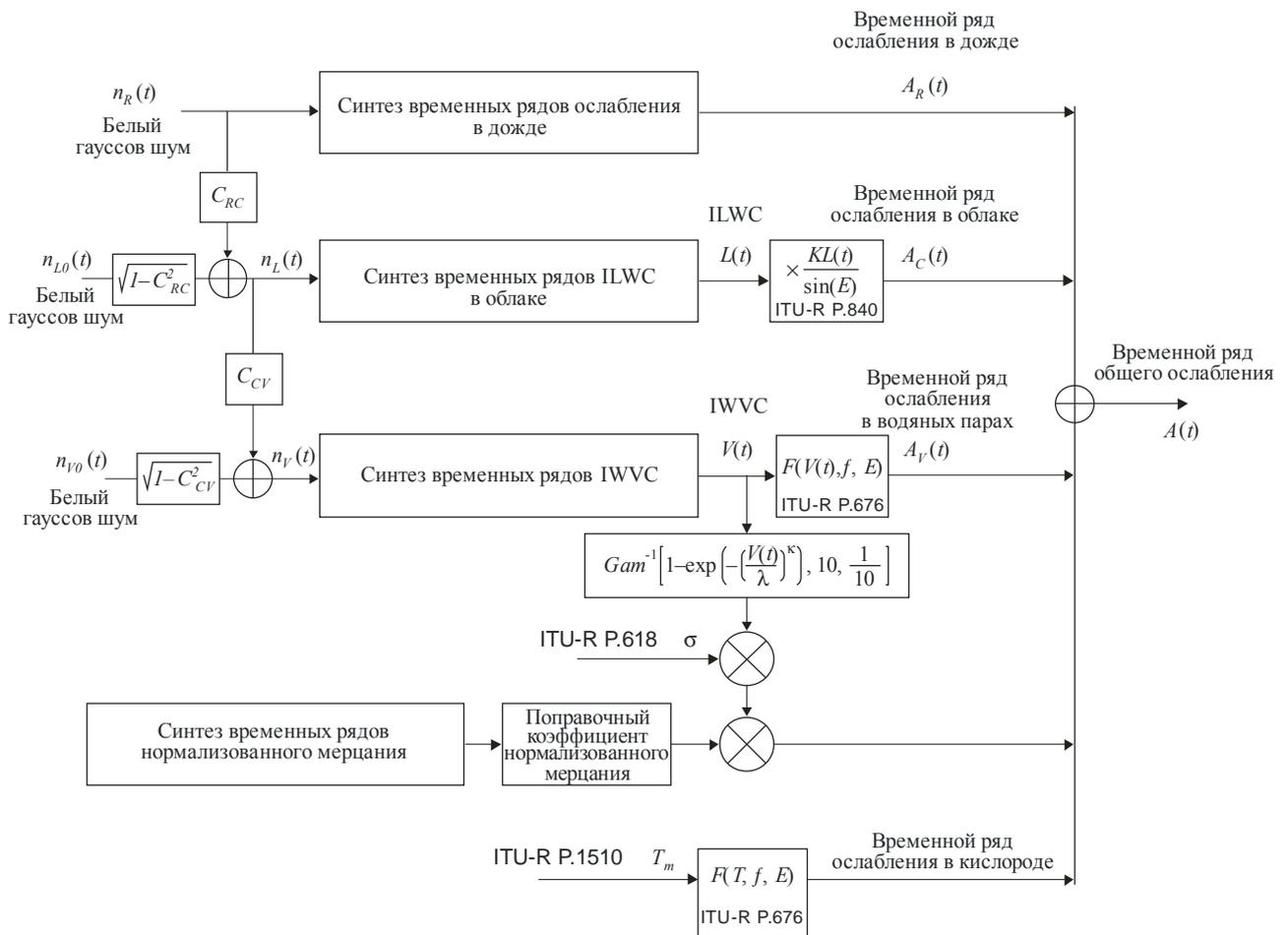
В силу весьма низкого значения динамического параметра для компонента IWVC, из синтезированного временного ряда для всех рассматриваемых воздействий должны быть отброшены первые $5 \cdot 10^6$ выборок (соответствующие переходному периоду в фильтре IWVC).

Для трасс Земля-космос метод синтеза временных рядов действителен для частот в диапазоне 4–55 ГГц и углов места 5° – 90° . При некоторых условиях (например, низкие частоты, углы места от средних до высоких, зоны умеренного климата) общее ослабление может с достаточным уровнем точности аппроксимироваться ослаблением в дожде.

С помощью метода синтеза временных рядов генерируется временной ряд, воспроизводящий статистические данные о спектральных характеристиках, крутизне и длительности замирания для событий общего замирания. Статистические данные о длительности периодов между событиями замирания также воспроизводятся, но только в рамках отдельных событий ослабления.

РИСУНОК 5

Функциональная схема синтезатора временных рядов общего ослабления и мерцания



6.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления $A(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется метод постепенного приближения.

A Коэффициенты корреляции

Этап A1: Параметр $C_{RC} = 1$.

Этап A2: Параметр $C_{CV} = 0,8$.

B Полиномы мерцания

Этап B1: Полиномы замирания из-за мерцания и полиномы увеличения определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{Fade}(P) &= -0,061 \times (\log_{10}(P))^3 + 0,072 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,71 \times \log_{10}(P) + 3,0 \\ a_{Enhanc}(P) &= -0,0597 \times (\log_{10}(P))^3 - 0,0835 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,258 \times \log_{10}(P) + 2,672 \end{aligned} \quad (18)$$

C Синтез временных рядов

Временной ряд $A(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$ синтезируется следующим образом:

Этап C1: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки, T_s , составляющий 1 с.

Этап C2: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n_{L0}(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки, T_s , составляющий 1 с.

Этап C3: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n_{V0}(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки, T_s , составляющий 1 с.

Этап C4: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n_L(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$n_L(kT_s) = C_{RC} \times n_R(kT_s) + \sqrt{1 - C_{RC}^2} \times n_{L0}(kT_s). \quad (19)$$

Этап C5: Синтезируется временной ряд белого гауссова шума, $n_V(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$n_V(kT_s) = C_{CV} \times n_L(kT_s) + \sqrt{1 - C_{CV}^2} \times n_{V0}(kT_s). \quad (20)$$

Этап C6: Рассчитывается временной ряд ослабления в дожде $A(kT_s)$, начиная с временного ряда белого гауссова шума, $n_R(kT_s)$, в соответствии с процедурой, рекомендованной в п. 2 настоящей Рекомендации, и этап D6 п. 2 заменяется следующим: из синтезированного временного ряда отбрасываются первые 5 000 000 выборок.

Этап C7: Рассчитывается временной ряд совокупного объема жидкой воды в облаке $L(kT_s)$, начиная с временного ряда белого гауссова шума, $n_L(kT_s)$, в соответствии с процедурой, рекомендованной в п. 4 настоящей Рекомендации, и этап D6 п. 4 заменяется следующим: из синтезированного временного ряда отбрасываются первые 5 000 000 выборок.

Этап C8: Временной ряд совокупного объема жидкой воды в облаке $L(kT_s)$ преобразуется во временной ряд ослабления в облаке $A_C(kT_s)$ в соответствии с методом, рекомендованным в Рекомендации МСЭ-R P.840.

Этап C9: Определяются метки времени $k_1T_s, k_2T_s, k_3T_s, \dots$, если одновременно подтверждены следующие условия:

$$\begin{aligned} 1 - A_R(kT_s) &> 0 \\ 2 - L(kT_s) &> 1. \end{aligned} \quad (21)$$

Этап C10: Отбрасываются вычисленные значения $A_C(kT_s)$, соответствующие меткам времени $k_1T_s, k_2T_s, k_3T_s, \dots$, определенным на *этапе C8*, и вместо этого для этих меток времени рассчитывается $A_C(kT_s)$ на основе линейной интерполяции в зависимости от времени, начиная с неотброшенных значений ослабления в облаке.

Этап C11: Рассчитывается временной ряд совокупного объема водяных паров $V(kT_s)$, начиная с временного ряда белого гауссова шума, $n_V(kT_s)$, в соответствии с процедурой, рекомендованной в п. 5 настоящей Рекомендации.

Этап C12: Временной ряд совокупного объема водяных паров $V(kT_s)$ преобразуется во временной ряд ослабления в водяных парах $A_V(kT_s)$ в соответствии с оценкой аппроксимации метода ослабления в водяных парах на наклонных трассах, который рекомендован в Рекомендации МСЭ-R P.676 (раздел 2.3 Приложения 2).

Этап C13: Рассчитывается средняя годовая температура T_m для рассматриваемого местоположения, используя значения наблюдений, если таковые имеются. Иначе, для прогнозирования T_m может использоваться метод, представленный в Рекомендации МСЭ-R P.1510.

Этап C14: Значение средней годовой температуры T_m преобразуется в значение среднего годового ослабления в кислороде A_O в соответствии с методом, рекомендованным в Рекомендации МСЭ-R P.676.

Этап C15: Синтезируется временной ряд мерцания с единичной дисперсией $Sci_0(kT_s)$ в соответствии с методом, рекомендованным в п. 3 настоящей Рекомендации.

Этап C16: Рассчитывается временной ряд поправочного коэффициента $C_x(kT_s)$, с тем чтобы обеспечить различие между затуханием из-за мерцания и увеличениями:

$$C_x(kT_s) = \begin{cases} \frac{a_{Fade} (100 \times Q[Sci_0(K.Ts)])}{a_{Enhanc} (100 \times Q[Sci_0(K.Ts)])} & \text{при } Sci_0(K.Ts) > 0 \\ 1 & \text{при } Sci_0(K.Ts) \leq 0 \end{cases}, \quad (22)$$

где Q – функция, определенная в п. 2.2.A и описанная в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап C17: Временной ряд совокупного объема водяных паров $V(kT_s)$ преобразуется во временной ряд с гамма-распределением $Z(kT_s)$ следующим образом:

$$Z(kT_s) = Gam^{-1} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{V(kT_s)}{\lambda} \right)^k \right), 10, \frac{1}{10} \right], \quad (23)$$

где k и λ – параметры распределения Вейбулла совокупного объема водяных паров, а функция Gam – дополнительная гамма-функция распределения, описанная в Рекомендации МСЭ-R P.1057 и определяемая следующим образом:

$$Gam(x, k, \vartheta) = \int_x^{\infty} \frac{x^{k-1} \exp(-x/\vartheta)}{\Gamma(k)\vartheta^k} dt. \quad (24)$$

Этап C18: Рассчитывается стандартное отклонение мерцания σ в соответствии с методом, рекомендованным в Рекомендации МСЭ-R P.618.

Этап C19: Рассчитывается временной ряд мерцания $Sci(kT_s)$ следующим образом:

$$Sci(kT_s) = \begin{cases} \sigma \times Sci_0(kT_s) \times C_x(k.T_s) \times Z(kT_s) \times [A_R(kT_s)]^{5/12} & \text{при } A_R(kT_s) > 1 \\ \sigma \times Sci_0(kT_s) \times C_x(k.T_s) \times Z(kT_s) & \text{при } A_R(kT_s) \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

Этап C20: Рассчитывается временной ряд общего тропосферного ослабления $A(kT_s)$ следующим образом:

$$A(kT_s) = A_R(kT_s) + A_C(kT_s) + A_V(kT_s) + A_O + Sci(kT_s). \quad (26)$$
