

Международный союз электросвязи

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.1853-2
(08/2019)

**Синтез временных рядов
ухудшений в тропосфере**

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 Резолюции МСЭ-R 1. 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	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская 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 МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2020 г.

© ITU 2020

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.1853-2

Синтез временных рядов ухудшений в тропосфере

(2009-2011-2019)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены методы синтеза временных рядов ухудшений в тропосфере для конфигураций с одной площадкой и несколькими площадками (ослабление в газах, облаке, дожде и замирание и усиление из-за мерцания) на трассах Земля-космос, а также метод синтеза временных рядов ослабления в дожде на единичных наземных трассах.

Ключевые слова

Ослабление в кислороде, ослабление в водяном паре, ослабление в облаке, ослабление в дожде, мерцание, ослабление на единичной наклонной трассе, несколько площадок, ослабление на наклонной трассе, суммарное наземное ослабление в дожде вдоль одной линии, ослабление, синтезатор временных рядов, многоканальный

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

принимая во внимание,

a) что для надлежащего планирования наземных систем связи и систем связи Земля-космос необходимо иметь соответствующие методы синтеза пространственного изменения состояния канала распространения и его изменений во времени;

b) что разработаны методы, позволяющие с достаточной точностью синтезировать пространственное изменение состояния канала распространения и его изменения во времени,

рекомендует,

1 чтобы для синтеза временных рядов отдельных компонентов тропосферного ослабления для конфигураций с одной площадкой и несколькими площадками и тропосферного мерцания с единичной дисперсией на трассах Земля-космос применялись методы, представленные в Приложении 1, в частности:

a) для синтеза временных рядов ослабления в газообразном кислороде для трасс с одной площадкой и несколькими площадками следует использовать соответственно разделы 2.2 и 2.3;

b) для синтеза временных рядов ослабления в водяном паре для трасс с одной площадкой и несколькими площадками следует использовать соответственно разделы 3.1 и 3.2;

c) для синтеза временных рядов ослабления в облаке для трасс с одной площадкой и несколькими площадками следует использовать соответственно разделы 4.1 и 4.2;

d) для синтеза временных рядов ослабления в дожде для трасс с одной площадкой и несколькими площадками следует использовать соответственно разделы 5.1 и 5.2;

e) для синтеза тропосферного мерцания с единичной дисперсией следует использовать раздел 6;

2 чтобы для синтеза временных рядов общих ухудшений в тропосфере для конфигураций с одной площадкой и несколькими площадками на трассах Земля-космос применялись методы, представленные в Приложении 2, в частности:

a) для синтеза временных рядов общего ухудшения с одной площадкой следует использовать раздел 2;

b) для синтеза временных рядов общего ухудшения с несколькими площадками следует использовать раздел 3;

3 чтобы для синтеза временных рядов ослабления в дожде на единичных наземных трассах применялся метод, представленный в Приложении 3.

Приложение 1

Синтез временных рядов отдельных ухудшений в тропосфере для конфигураций с одной площадкой и несколькими площадками на трассах Земля-космос

1 Введение

Методика, представленная в этом Приложении, обеспечивает методы синтеза отдельных и комбинированных ухудшений в тропосфере для конфигураций с одной и с несколькими площадками (ослабление в газах, в облаке и в дожде, а также замирание и усиление из-за тропосферного мерцания с единичной дисперсией) на трассах Земля-космос.

2 Ослабление в кислороде

Описанные ниже методы следует использовать для синтеза постоянного значения ослабления в газообразном кислороде.

2.1 Цифровые карты

Неотъемлемой частью настоящей Рекомендации являются среднегодовые данные о наземном давлении P_{annual} (гПа) и среднегодовые данные о наземной плотности водяного пара WV_{annual} (г/м³), доступные в виде цифровых карт в zip-файле R-REC-P.1853-2-201908-E. Координатная сетка широты построена для значений от -90° с. ш. до $+90^\circ$ с. ш. с шагом $0,75^\circ$, а координатная сетка долготы – от -180° в. д. до $+180^\circ$ в. д. с шагом $0,75^\circ$.

Среднегодовое наземное давление и среднегодовую наземную плотность водяного пара в любой заданной точке у поверхности Земли можно получить, выполнив следующие действия:

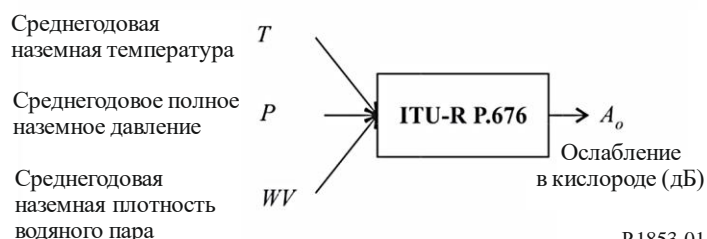
- определить четыре точки сетки (Lat_1, Lon_1) , (Lat_2, Lon_2) , (Lat_3, Lon_3) и (Lat_4, Lon_4) в окрестностях заданной точки (Lat, Lon) ;
- определить среднегодовые значения наземного давления P_1, P_2, P_3 и P_4 или среднегодовые значения наземной плотности водяного пара WV_1, WV_2, WV_3 и WV_4 у поверхности Земли в четырех окрестных точках сетки;
- определить значение P или WV в заданной точке (Lat, Lon) , выполнив билинейную интерполяцию по четырем окрестным точкам сетки, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

Карты среднегодовых значений наземного давления и наземной плотности водяного пара получены на основе данных ERA Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) за 36 лет (с 1979 по 2014 год).

2.2 Конфигурация с одной площадкой

РИСУНОК 1

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в газообразном кислороде с одной площадкой



Этап SS_OX_1. Рассчитать среднегодовую наземную температуру T для рассматриваемого местоположения, используя местные данные. Если местные данные недоступны, для прогнозирования T можно использовать метод, приведенный в Рекомендации МСЭ-R P.1510.

Этап SS_OX_2. Рассчитать среднегодовое наземное давление P для рассматриваемого местоположения, используя местные данные. Если местные данные недоступны, для прогнозирования P можно использовать метод, приведенный в пункте 2.1.

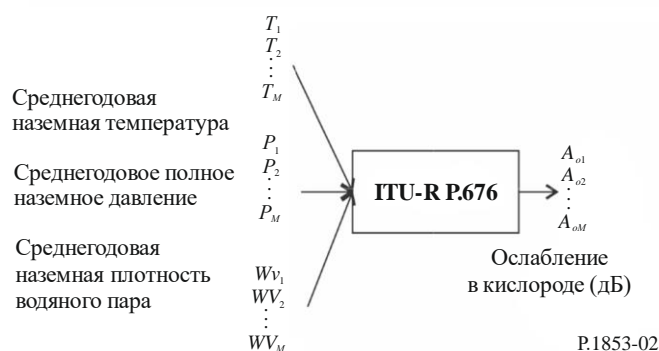
Этап SS_OX_3. Рассчитать среднегодовую наземную плотность водяного пара WV для рассматриваемого местоположения, используя местные данные. Если местные данные недоступны, для прогнозирования WV можно использовать метод, приведенный в пункте 2.1.

Этап SS_OX_4. Преобразовать среднегодовую температуру T , среднегодовое наземное давление P и среднегодовую наземную плотность водяного пара WV в среднегодовое ослабление в кислороде $A_O = \frac{h_O \gamma_O}{\sin \varphi}$ в соответствии с методом "Приближенное определение затухания в атмосферных газах в диапазоне частот 1–350 ГГц", описанным в Рекомендации МСЭ-R P.676, для рассматриваемых значений частоты, угла места и высоты над уровнем моря.

2.3 Конфигурация с несколькими площадками

РИСУНОК 2

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в газообразном кислороде с несколькими площадками



Этап MS_OX_1. Рассчитать среднегодовую наземную температуру T_i , где $i = \{1, 2, \dots, M\}$, для M рассматриваемых местоположений, используя местные данные. Если местные данные недоступны, для прогнозирования T_i можно использовать метод, приведенный в Рекомендации МСЭ-R P.1510.

Этап MS_OX_2. Рассчитать среднегодовое наземное давление P_i , где $i = \{1, 2, \dots, M\}$, для M рассматриваемых местоположений, используя местные данные. Если местные данные недоступны, для прогнозирования P_i можно использовать метод, приведенный в пункте 2.1.

Этап MS_OX_3. Рассчитать среднегодовую наземную плотность водяного пара WV_i , где $i = \{1, 2, \dots, M\}$, для M рассматриваемых местоположений, используя местные данные. Если местные данные недоступны, для прогнозирования WV_i можно использовать метод, приведенный в пункте 2.1.

Этап MS_OX_4. Преобразовать среднегодовую температуру T_i , среднегодовое наземное давление P_i и среднегодовую наземную плотность водяного пара WV_i в среднегодовое ослабление в кислороде $A_{O_i} = \frac{h_{O_i} \gamma_{O_i}}{\sin \varphi_i}$ в соответствии с методом "Приближенное определение затухания в атмосферных газах в диапазоне частот 1–350 ГГц", описанным в Рекомендации МСЭ-R P.676, для рассматриваемых значений частоты, угла места и высоты над уровнем моря.

3 Ослабление в водяном паре

3.1 Конфигурация с одной площадкой

3.1.1 Обзор

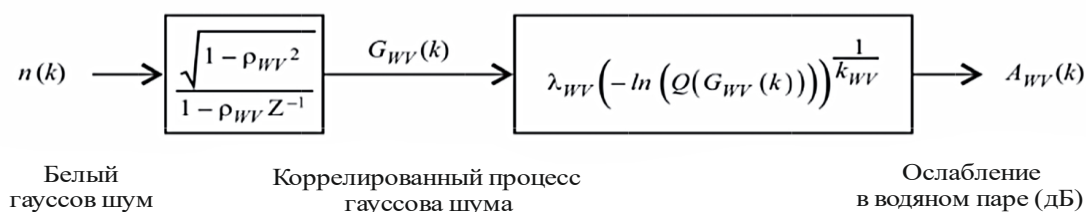
Метод синтеза временных рядов с одной площадкой предполагает, что долгосрочная статистика ослабления в водяном паре (A_{wv}) соответствует распределению Вейбулла.

При использовании метода синтеза временных рядов с одной площадкой синтезируется временной ряд, воспроизводящий спектральные характеристики и распределение вероятностей ослабления в водяном паре.

Как показано на рисунке 3, дискретный временной ряд ослабления в водяном паре $A_{wv}(t) = A_{wv}(kT_s)$, где T_s – заданное время выборки, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума $n(t) = n(kT_s)$. Для удобства kT_s обозначено на рисунке просто как k . Белый гауссов шум пропускается через фильтр нижних частот и преобразуется из нормального распределения в распределение Вейбулла в устройстве безынерционной нелинейности.

РИСУНОК 3

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в водяном паре с одной площадкой



P.1853-03

Синтезатор временных рядов определяется тремя параметрами:

- k_{wv} : параметр формы распределения Вейбулла для ослабления в водяном паре;
- λ_{wv} : параметр масштаба распределения Вейбулла для ослабления в водяном паре;
- β_{wv} : параметр, описывающий изменение во времени (s^{-1}).

3.1.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в водяном паре с одной площадкой $A_{wv}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется следующий поэтапный метод (метод постепенного приближения).

А Оценка параметров k_{wv} и λ_{wv}

Параметры k_{wv} и λ_{wv} определяются по интегральной функции распределения ослабления в водяном паре в зависимости от вероятности события. Статистику ослабления в водяном паре можно определить исходя из локальных данных измерений или, в отсутствие данных измерений, с использованием метода прогнозирования ослабления в водяном паре, основанного на суммарном содержании водяного пара, как указано в Рекомендации МСЭ-R P.676.

Подбор Вейбулла ослабления в водяном паре для рассматриваемого местоположения в зависимости от вероятности события выполняется следующим образом.

Этап SS_WV_1. Составить множество пар $[P_i, A_{wvi}]$, где P_i (% времени) – вероятность превышения значения ослабления в водяном паре A_{wvi} (дБ). Конкретные значения P_i выбираются с учетом рассматриваемого диапазона вероятностей; однако предлагается следующий набор значений процента времени: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30 и 50%.

Этап SS_WV_2. Преобразовать множество пар $[P_i, A_{WVi}]$ во множество пар $\left[\ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right), \ln A_{WVi} \right]$.

Этап SS_WV_3. Определить переменные a и b , приведя наименьшие квадраты в соответствие с линейной функцией для n наборов пар:

$$\ln A_{WVi} = a \ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right) + b \quad (1)$$

следующим образом:

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln A_{WVi} \ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right) - \sum_{i=1}^n \ln A_{WVi} \sum_{i=1}^n \ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right)}{n \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right)\right]^2 - \left[\sum_{i=1}^n \ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right)\right]^2}; \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(A_{WVi}) - a \sum_{i=1}^n \ln\left(-\ln \frac{P_i}{100}\right)}{n}. \end{cases} \quad (2)$$

Этап SS_WV_4. Рассчитать параметры k_{WV} и λ_{WV} следующим образом:

$$\begin{cases} k_{WV} = \frac{1}{a}; \\ \lambda_{WV} = \exp(b). \end{cases} \quad (3)$$

В Параметр фильтра нижних частот

Этап SS_WV_5. Установить $\beta_{WV} = 3,65 \times 10^{-6}$ (c^{-1}).

С Синтез временных рядов

Временные ряды $A_{WV}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, синтезируются следующим образом.

Этап SS_WV_6. Синтезировать временные ряды гауссова белого 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 SS_WV_7. Установить $G_{WV}(0) = 0$.

Этап SS_WV_8. Отфильтровать шумы временных рядов $n(kT_s)$ с помощью рекурсивного фильтра нижних частот, определяемого следующим образом:

$$G_{WV}(kT_s) = \rho_{WV} \times G_{WV}((k-1)T_s) + \sqrt{1 - \rho_{WV}^2} \times n(kT_s) \quad \text{для } k = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

где

$$\rho_{WV} = e^{-\beta_{WV} T_s}. \quad (5)$$

Этап SS_WV_9. Рассчитать $A_{WV}(kT_s)$ для $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$A_{WV}(kT_s) = \lambda_{WV} \left(-\log[Q(G_{WV}(kT_s))]\right)^{1/k_{WV}}, \quad (6)$$

где (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1057)

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (7)$$

Этап SS_WV_10. Отбросить первые 5 000 000 выборок синтезированных временных рядов.

3.2 Конфигурация с несколькими площадками

3.2.1 Обзор

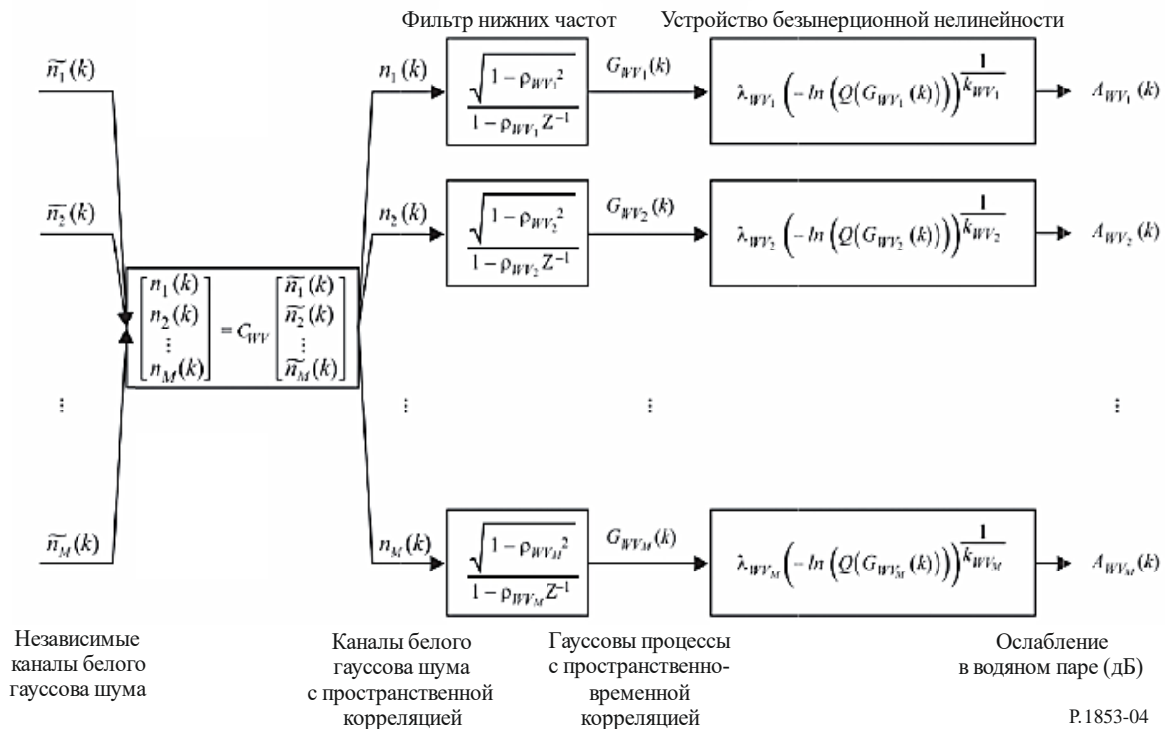
Метод синтеза временных рядов с несколькими площадками предполагает, что долгосрочная статистика ослабления в водяном паре для каждой площадки (A_{wvi}), где $i = \{1, 2, \dots, M\}$ (M – общее количество площадок), соответствует распределению Вейбулла.

При использовании этого метода синтеза временных рядов синтезируются M коррелированных временных рядов, воспроизводящих пространственное изменение, спектральные характеристики и распределение вероятностей ослабления в водяном паре.

Как показано на рисунке 4, временной ряд ослабления в водяном паре с несколькими площадками $A_{wvi}(t) = A_{wvi}(kT_s)$, где T_s – время выборки, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума $n_i(t) = n_i(kT_s)$. Для удобства kT_s обозначено на рисунке просто как k . Белый гауссов шум пропускается через фильтр нижних частот и преобразуется из нормального распределения в распределение Вейбулла в устройствах безынерционной нелинейности.

РИСУНОК 4

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в водяном паре с несколькими площадками



Синтезатор временных рядов для площадки i определяется следующими параметрами:

- k_{wvi} : параметр формы распределения Вейбулла для ослабления в водяном паре;
- λ_{wvi} : параметр масштаба распределения Вейбулла для ослабления в водяном паре;
- β_{wvi} : параметр, описывающий изменение во времени (c^{-1});
- D_{ij} : расстояние между площадками i и j (км).

3.2.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в водяном паре с несколькими площадками $A_{wvi}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, k – индекс каждой выборки, а $i = 1, 2, \dots, M$ (M – общее число площадок), используется следующий поэтапный метод.

А Оценка параметров k_{wvi} и λ_{wvi}

Этап MS_WV_1. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ выполнить шаги, указанные в пункте А описания синтезатора временных рядов ослабления в водяном паре с одной площадкой, приведенного в пункте 3.1.2.

В Параметры фильтра нижних частот

Этап MS_WV_2. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ установить $\beta_{wvi} = 3,65 \times 10^{-6}$ (с⁻¹).

С Синтез временных рядов

Этап MS_WV_3. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ синтезировать временные ряды гауссова белого шума $\tilde{n}_i(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки T_s , составляющий 1 с.

Этап MS_WV_4. Вычислить матрицу $M \times M$ $\mathbf{R}_n = [r_{n_{ij}}]$ для $i = \{1, 2, \dots, M\}$ и $j = \{1, 2, \dots, M\}$ следующим образом:

$$r_{n_{ij}} = \frac{1 - \rho_{wvi} \rho_{wvj}}{\sqrt{1 - \rho_{wvi}^2} \sqrt{1 - \rho_{wvj}^2}} r_{G_{wv_{ij}}}, \quad (8)$$

где $\rho_{wvi} = e^{-\beta_{wvi} T_s}$ и $\rho_{wvj} = e^{-\beta_{wvj} T_s}$

и

$$r_{G_{wv_{ij}}} = r_{G_{wv}}(D_{ij}) = 0,29 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{38}\right) + 0,71 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{900}\right). \quad (9)$$

Этап MS_WV_5. Вычислить функцию факторизации Холецкого¹ матрицы \mathbf{R}_n , чтобы определить нижнюю треугольную матрицу $\mathbf{C}_{wv} = [c_{wv_{ij}}]$, то есть

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{C}_{wv} \mathbf{C}_{wv}^T. \quad (10)$$

Этап MS_WV_6. Для каждого интервала времени kT_s вычислить $\mathbf{n}(kT_s) = [n_1(kT_s) \ n_2(kT_s) \ \dots \ n_M(kT_s)]^T$, где

$$\mathbf{n}(kT_s) = \mathbf{C}_{wv} \cdot \tilde{\mathbf{n}}(kT_s) \quad (11)$$

и $\tilde{\mathbf{n}}(kT_s) = [\tilde{n}_1(kT_s) \ \tilde{n}_2(kT_s) \ \dots \ \tilde{n}_M(kT_s)]$.

Для справок:

$$\begin{cases} n_1(kT_s) = \tilde{n}_1(kT_s); \\ n_2(kT_s) = c_{wv_{21}} \tilde{n}_1(kT_s) + c_{wv_{22}} \tilde{n}_2(kT_s); \\ \vdots \\ n_M(kT_s) = c_{wv_{M1}} \tilde{n}_1(kT_s) + c_{wv_{M2}} \tilde{n}_2(kT_s) + \dots + c_{wv_{MM}} \tilde{n}_M(kT_s). \end{cases} \quad (12)$$

Этап MS_WV_7. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ и каждого интервала времени выполнить этапы с SS_WV_7 по SS_WV_10 пункта С описания синтезатора временных рядов ослабления в водяном паре с одной площадкой, приведенного в пункте 3.1.2.

¹ Функция факторизации Холецкого реализована в языках программирования Matlab, Octave и Python.

4 Ослабление в облаке

4.1 Конфигурация с одной площадкой

4.1.1 Обзор

Статистику долгосрочного совокупного содержания жидкой воды (ILWC) можно аппроксимировать логарифмически нормальным распределением, обусловленным вероятностью ненулевого ослабления в облаке, как предлагается в Рекомендации МСЭ-R P.840. Поскольку взаимосвязь между ослаблением в облаке (A_C) и ILWC линейная (см. Рекомендацию МСЭ-R P.840), статистику долгосрочного ослабления в облаке (A_C) можно аналогичным образом аппроксимировать условным логарифмически нормальным распределением.

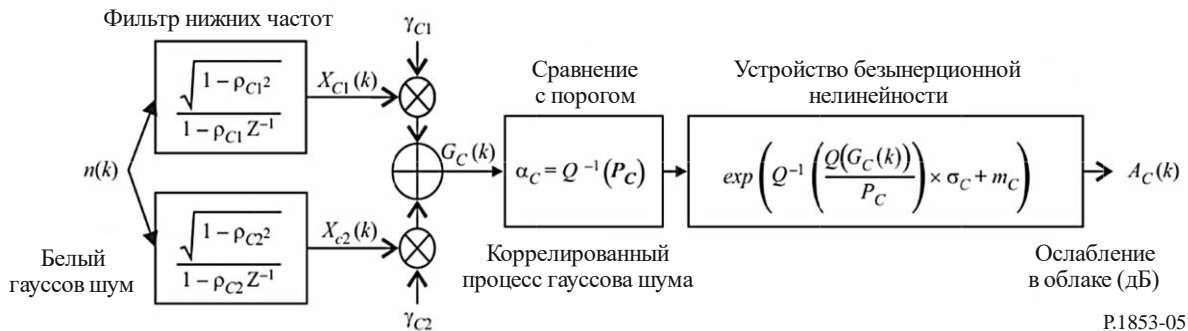
Следовательно, при использовании метода синтеза временных рядов с одной площадкой статистика долгосрочного ослабления в облаке (A_C) аппроксимируется условным логарифмически нормальным распределением.

При использовании метода синтеза временных рядов с одной площадкой синтезируется временной ряд, воспроизводящий спектральные характеристики и распределение вероятностей ослабления в облаке.

Как показано на рисунке 5, временной ряд ослабления в облаке с одной площадкой $A_C(t) = A_C(kT_s)$, где T_s – время выборки, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума $n(t) = n(kT_s)$. Для удобства kT_s обозначено на рисунке просто как k . Белый гауссов шум пропускается через фильтр нижних частот, усекается до соответствия заданной вероятности события в облаке и преобразуется из усеченного нормального распределения в условное логарифмически нормальное распределение в устройстве безынерционной нелинейности.

РИСУНОК 5

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в облаке



Синтезатор временных рядов определяется восемью параметрами:

- m_C : математическое ожидание условного логарифмически нормального распределения ослабления в облаке;
- σ_C : стандартное отклонение условного логарифмически нормального распределения ослабления в облаке;
- P_C : вероятность ослабления в облаке (%);
- α_C : порог усечения коррелированного гауссова шума;
- β_{C1} : параметр, описывающий изменение во времени быстрого компонента процесса (c^{-1});
- β_{C2} : параметр, описывающий изменение во времени медленного компонента процесса (c^{-1});
- γ_{C1} : параметр, описывающий вес быстрого компонента процесса;
- γ_{C2} : параметр, описывающий вес медленного компонента процесса.

4.1.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в облаке с одной площадкой $A_C(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется следующий поэтапный метод.

А Оценка параметров m_C , σ_C и P_C

Параметры условного логарифмически нормального распределения – математическое ожидание m_C , стандартное отклонение σ_C и вероятность ненулевого ослабления в облаке P_C – можно рассчитать по данным местных измерений. Если местные данные недоступны, эти параметры можно определить по цифровым картам совокупного содержания жидкой воды с температурой, сниженной до 0 °С, приведенным в Рекомендации МСЭ-R P.840.

При отсутствии данных местных измерений для рассматриваемого местоположения параметры условного логарифмически нормального распределения определяются следующим образом.

Этап SS_CL_1. Определить параметры m_{ILWC1} , m_{ILWC2} , m_{ILWC3} , m_{ILWC4} , σ_{ILWC1} , σ_{ILWC2} , σ_{ILWC3} , σ_{ILWC4} , P_{ILWC1} , P_{ILWC2} , P_{ILWC3} и P_{ILWC4} в четырех ближайших точках сетки по цифровым картам, приведенным в Рекомендации МСЭ-R P.840.

Этап SS_CL_2. Определить значения параметров m_{ILWC} , σ_{ILWC} и P_{ILWC} в требуемом месте посредством билинейной интерполяции четырех значений каждого параметра в четырех точках сетки, как указано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

Этап SS_CL_3. Вычислить коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды, содержащейся в облаке, $K_l(f, T)$, методом, описанным в Рекомендации МСЭ-R P.840, для рассматриваемой частоты f и $T = 273,15$ К.

Этап SS_CL_4. Установить:

$$\begin{cases} m_C = m_{ILWC} + \ln\left(\frac{K_l}{\sin \varphi}\right); \\ \sigma_C = \sigma_{ILWC}; \\ P_C = P_{ILWC}, \end{cases} \quad (13)$$

где φ – угол места рассматриваемой наклонной трассы.

В Параметры фильтра нижних частот

Этап SS_CL_5. Установить:

$$\beta_{C1} = 5,7643 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{C2} = 1,7663 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{C1} = 0,4394;$$

$$\gamma_{C2} = 0,7613.$$

С Порог усечения

Этап SS_CL_6. Порог усечения α_C равен

$$\alpha_C = Q^{-1}\left(\frac{P_C}{100}\right), \quad (14)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Д Синтез временных рядов

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

Этап SS_CL_7. Синтезировать временные ряды гауссова белого 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 SS_CL_8. Установить $X_{C1}(0) = 0$; $X_{C2}(0) = 0$.

Этап SS_CL_9. Отфильтровать временной ряд шума $n(kT_s)$ с помощью двух рекурсивных фильтров нижних частот, определяемых следующим образом:

$$\begin{cases} X_{C1}(kT_s) = \rho_{C1} \times X_{C1}((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_{C1}^2} \times n(kT_s); \\ X_{C2}(kT_s) = \rho_{C2} \times X_{C2}((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_{C2}^2} \times n(kT_s); \end{cases} \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \quad (15)$$

где

$$\begin{cases} \rho_{C1} = e^{-\beta_{C1}T_s}; \\ \rho_{C2} = e^{-\beta_{C2}T_s}. \end{cases} \quad (16)$$

Этап SS_CL_10. Вычислить $G_C(kT_s)$ при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$G_C(kT_s) = \gamma_{C1} \times X_{C1}(kT_s) + \gamma_{C2} \times X_{C2}(kT_s). \quad (17)$$

Этап SS_CL_11. Вычислить $A_C(kT_s)$ (дБ) при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$A_C(kT_s) = \begin{cases} \exp\left(Q^{-1}\left[\frac{100}{P_C}Q(G_C(kT_s))\right]\right) \times \sigma_C + m_C & \text{при } G_C(kT_s) > \alpha_C; \\ 0 & \text{при } G_C(kT_s) \leq \alpha_C, \end{cases} \quad (18)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап SS_CL_12. Отбросить первые 5 000 000 выборок синтезированных временных рядов. События ослабления в облаке представлены последовательностями, значения которых превышают 0 дБ для ряда последовательных выборок.

4.2 Конфигурация с несколькими площадками

4.2.1 Обзор

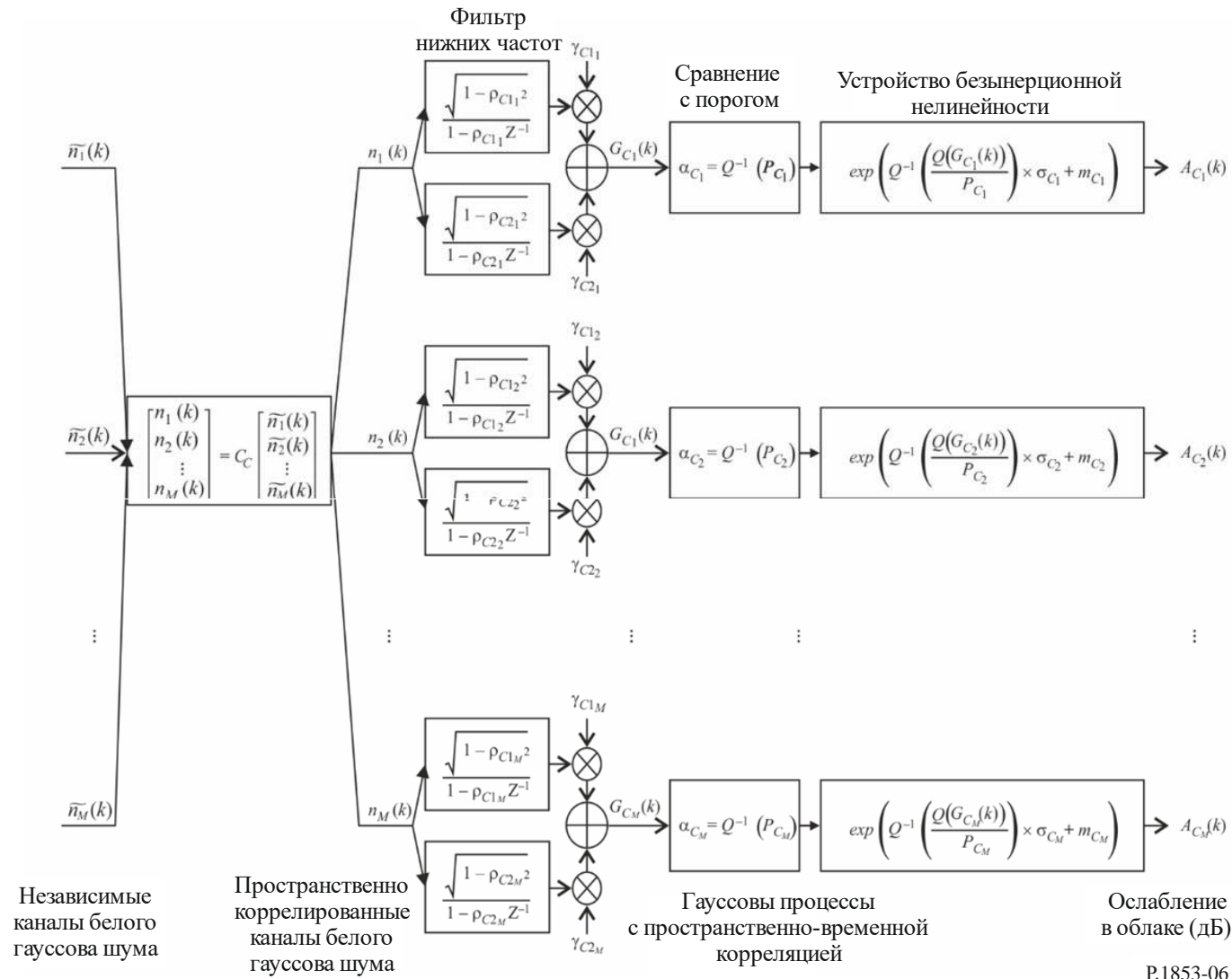
Метод синтеза временных рядов с несколькими площадками предполагает, что долгосрочная статистика ослабления в облаке для каждой площадки (A_{Ci}), где $i = \{1, 2, \dots, M\}$ (M – общее количество площадок), соответствует условному логарифмически нормальному распределению.

При использовании этого метода синтеза временных рядов синтезируется временной ряд, воспроизводящий пространственное изменение, спектральные характеристики и распределение вероятностей ослабления в облаке.

Как показано на рисунке 6, временные ряды ослабления в облаке с несколькими площадками $A_{Ci}(t) = A_{Ci}(kT_s)$, где T_s – время выборки, синтезируются на основе дискретной обработки белого гауссова шума $n_i(t) = n_i(kT_s)$. Для удобства kT_s обозначено на рисунке просто как k . Белый гауссов шум пропускается через фильтр нижних частот, усекается до соответствия заданной вероятности события в облаке и преобразуется из усеченного нормального распределения в условное логарифмически нормальное распределение в устройстве безынерционной нелинейности.

РИСУНОК 6

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в облаке с несколькими площадками



Синтезатор временных рядов для площадки i определяется следующими параметрами:

- m_{Ci} : математическое ожидание условного логарифмически нормального распределения ослабления в облаке;
- σ_{Ci} : стандартное отклонение условного логарифмически нормального распределения ослабления в облаке;
- P_{Ci} : вероятность ослабления в облаке (%);
- α_{Ci} : порог усечения коррелированного гауссова шума;
- β_{C1i} : параметр, описывающий изменение во времени быстрого компонента процесса (с^{-1});
- β_{C2i} : параметр, описывающий изменение во времени медленного компонента процесса (с^{-1});
- γ_{C1i} : параметр, описывающий вес быстрого компонента процесса;
- γ_{C2i} : параметр, описывающий вес медленного компонента процесса;
- D_{ij} : расстояние между площадками i и j (км).

4.2.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в облаке с несколькими площадками $A_{Ci}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, k – индекс каждой выборки, а $i = 1, 2, \dots, M$ (M – общее число площадок), используется следующий поэтапный метод.

А Оценка параметров m_{Ci} , σ_{Ci} и P_{Ci}

Этап MS_CL_1. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ вычисляются значения m_{Ci} , σ_{Ci} и P_{Ci} путем выполнения шагов, указанных в пункте А описания синтезатора временных рядов ослабления в облаке с одной площадкой, приведенного в пункте 4.1.2.

В Параметры фильтра нижних частот

Этап MS_CL_2. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ установить:

$$\beta_{C1i} = 5,7643 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{C2i} = 1,7663 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{C1i} = 0,4394;$$

$$\gamma_{C2i} = 0,7613.$$

С Пороги усечения

Этап MS_CL_3. Пороги усечения α_{Ci} равны

$$\alpha_{Ci} = Q^{-1}\left(\frac{P_{Ci}}{100}\right), \quad (19)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Д Синтез временных рядов

Этап MS_CL_4. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ синтезировать временной ряд белого гауссова шума $\tilde{n}_i(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки T_s , составляющий 1 с.

Этап MS_CL_5. Вычислить матрицу $M \times M \mathbf{R}_n = [r_{n_{ij}}]$ при $i = \{1, 2, \dots, M\}$ и $j = \{1, 2, \dots, M\}$ следующим образом:

$$r_{n_{ij}} = \frac{1}{\gamma_{C_{1i}}\gamma_{C_{1j}} \frac{\sqrt{1-\rho_{C_{1i}}^2}\sqrt{1-\rho_{C_{1j}}^2}}{1-\rho_{C_{1i}}\rho_{C_{1j}}} + \gamma_{C_{2i}}\gamma_{C_{2j}} \frac{\sqrt{1-\rho_{C_{2i}}^2}\sqrt{1-\rho_{C_{2j}}^2}}{1-\rho_{C_{2i}}\rho_{C_{2j}}} + \gamma_{C_{1i}}\gamma_{C_{2j}} \frac{\sqrt{1-\rho_{C_{1i}}^2}\sqrt{1-\rho_{C_{2j}}^2}}{1-\rho_{C_{1i}}\rho_{C_{2j}}} + \gamma_{C_{2i}}\gamma_{C_{1j}} \frac{\sqrt{1-\rho_{C_{2i}}^2}\sqrt{1-\rho_{C_{1j}}^2}}{1-\rho_{C_{2i}}\rho_{C_{1j}}}} \quad (20)$$

где $\rho_{C_{1i}} = e^{-\beta_{C_{1i}}T_s}$, $\rho_{C_{2i}} = e^{-\beta_{C_{2i}}T_s}$, $\rho_{C_{1j}} = e^{-\beta_{C_{1j}}T_s}$ и $\rho_{C_{2j}} = e^{-\beta_{C_{2j}}T_s}$

$$\text{и } r_{G_{C_{ij}}} = r_{G_C}(D_{ij}) = 0,55 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{24}\right) + 0,45 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{700}\right). \quad (21)$$

Этап MS_CL_6. Вычислить факторизацию Холецкого¹ матрицы \mathbf{R}_n , чтобы определить нижнюю треугольную матрицу $\mathbf{C}_c = [C_{cij}]$, где

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{C}_c \mathbf{C}_c^T. \quad (22)$$

Этап MS_CL_7. Вычислить $\mathbf{n}(kT_s) = [n_1(kT_s) \ n_2(kT_s) \ \dots \ n_M(kT_s)]^T$ следующим образом:

$$\mathbf{n}(kT_s) = \mathbf{C}_c \cdot \tilde{\mathbf{n}}(kT_s), \quad (23)$$

где $\tilde{\mathbf{n}}(kT_s) = [\tilde{n}_1(kT_s) \ \tilde{n}_2(kT_s) \ \dots \ \tilde{n}_M(kT_s)]^T$.

Для справок:

$$\begin{cases} n_1(kT_s) = \tilde{n}_1(kT_s); \\ n_2(kT_s) = c_{C_{21}}\tilde{n}_1(kT_s) + c_{C_{22}}\tilde{n}_2(kT_s); \\ \vdots \\ n_M(kT_s) = c_{C_{M1}}\tilde{n}_1(kT_s) + c_{C_{M2}}\tilde{n}_2(kT_s) + \dots + c_{C_{MM}}\tilde{n}_M(kT_s). \end{cases} \quad (24)$$

Этап MS_CL_8. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ выполнить этапы с SS_CL_8 по SS_CL_12 пункта D описания синтезатора временных рядов ослабления в облаке с одной площадкой, приведенного в пункте 4.1.2.

5 Ослабление в дожде

5.1 Конфигурация с одной площадкой

5.1.1 Обзор

Метод синтеза временных рядов ослабления в дожде с одной площадкой предполагает, что долгосрочная статистика ослабления в дожде соответствует логарифмически нормальному распределению, обусловленному вероятностью ненулевого ослабления в дожде. Метод прогнозирования ослабления в дожде МСЭ-R из Рекомендации МСЭ-R P.618 хорошо аппроксимируется условным логарифмически нормальным распределением в наиболее значимом диапазоне вероятностей превышения. Поскольку с помощью метода прогнозирования ослабления в дожде в наземном пространстве прогнозируется ненулевое ослабление в дожде при значениях вероятности превышения, превосходящих вероятность ослабления в дожде, метод синтеза временных рядов позволяет корректировать временные ряды ослабления таким образом, чтобы ослабление в дожде, соответствующее значениям вероятности превышения, превосходящим значения вероятности ослабления в дожде, составляло 0 дБ.

Этот метод действителен для диапазона частот от 4 ГГц до 55 ГГц и углов места от 5° до 90°.

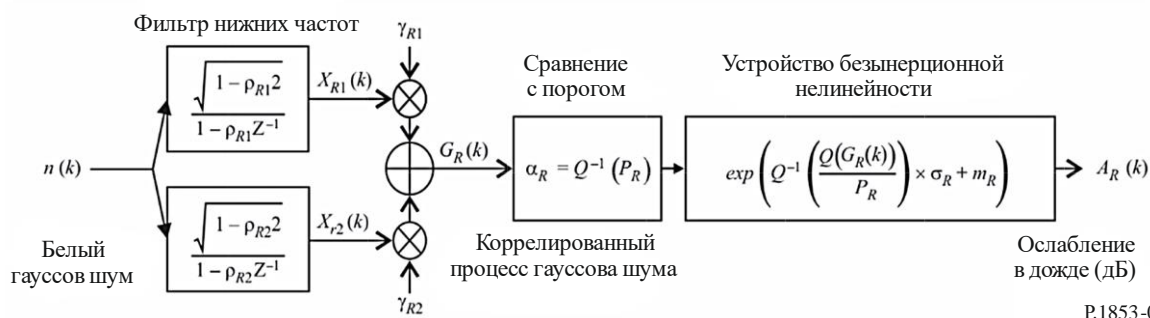
При использовании метода синтеза временных рядов ослабления в дожде с одной площадкой синтезируется временной ряд, воспроизводящий статистические данные о спектральных характеристиках, крутизне замирания и длительности замирания, а также о распределении вероятностей событий ослабления в дожде. Также воспроизводятся статистические данные о

длительности периодов между событиями замирания, но только в рамках отдельных событий ослабления.

Как показано на рисунке 7, временной ряд ослабления в дожде $A_R(t) = A_R(kT_s)$, где T_s – заданное время выборки, синтезируется на основе дискретной обработки белого гауссова шума $n(t) = n(kT_s)$. Для удобства kT_s обозначено на рисунке просто как k . Белый гауссов шум пропускается через фильтр нижних частот, усекается до соответствия заданной вероятности события ослабления в дожде и преобразуется в устройстве безынерционной нелинейности из усеченного нормального распределения в условное логарифмически нормальное распределение.

РИСУНОК 7

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в дожде



P.1853-07

Синтезатор временных рядов определяется восемью параметрами:

- m_R : математическое ожидание условного логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- σ_R : стандартное отклонение условного логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- P_R : вероятность ослабления в дожде (%);
- α_R : порог усечения коррелированного гауссова шума;
- β_{R1} : параметр, описывающий изменение во времени быстрого компонента процесса (c^{-1});
- β_{R2} : параметр, описывающий изменение во времени медленного компонента процесса (c^{-1});
- γ_{R1} : параметр, описывающий вес быстрого компонента процесса;
- γ_{R2} : параметр, описывающий вес медленного компонента процесса.

5.1.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в дожде $A_R(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется следующий поэтапный метод.

А Оценка параметров m_R , σ_R и P_R

Параметры m_R и σ_R определяются по интегральной функции распределения ослабления в дожде в зависимости от вероятности события. Эти параметры могут быть определены на основании местных данных. Если местные данные отсутствуют, параметры m_R и σ_R можно определить методом прогнозирования ослабления в дожде из Рекомендации МСЭ-R P.618.

Для рассматриваемых значений угла места Земля-космос и частоты производится логарифмически нормальный подбор ослабления в дожде в зависимости от вероятности события следующим образом.

Этап SS_RA_1. Определить вероятность ослабления в дожде на трассе P_R (% времени) по данным местных измерений или, в отсутствие данных измерений, с использованием метода "Прогнозирование вероятности ослабления в дожде на наклонной трассе" из Рекомендации МСЭ-R P.618.

Этап SS_RA_2. Составить множество пар $[P_i/P_R, A_{Ri}]$, где P_i (% времени) – вероятность превышения значения ослабления в дожде A_{Ri} (дБ), $P_i \leq P_R$. Конкретные значения P_i выбираются с учетом заданного диапазона вероятностей; 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% с ограничением $P_i \leq P_R$.

Этап SS_RA_3. Преобразовать множество пар $[P_i/P_R, A_{Ri}]$ во множество пар $\left[Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_R}\right), \ln A_{Ri} \right]$,

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап SS_RA_4. Определить переменные m_R и σ_R путем применения метода наименьших квадратов к величине $\ln A_{Ri} = \sigma_R Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_R}\right) + m_R$ для всех i . Подбор методом наименьших квадратов можно

определить с использованием метода "Поэтапная процедура для аппроксимации дополнительного интегрального распределения посредством логарифмически нормального дополнительного интегрального распределения", описанного в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

В Параметры фильтра нижних частот

Этап SS_RA_5. Установить следующие параметры:

$$\beta_{R1} = 9,0186 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{R2} = 5,0990 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{R1} = 0,3746;$$

$$\gamma_{R2} = 0,7738.$$

С Порог усечения

Этап SS_RA_6. Порог усечения α_R равен

$$\alpha_R = Q^{-1}\left(\frac{P_R}{100}\right), \quad (25)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Д Синтез временных рядов

Временной ряд ослабления в дожде $A_R(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, синтезируется следующим образом.

Этап SS_RA_7. Синтезировать временной ряд гауссова белого 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 SS_RA_8. Установить значения $X_{R1}(0) = 0$; $X_{R2}(0) = 0$.

Этап SS_RA_9. Отфильтровать временные ряды шума $n(kT_s)$ с помощью двух рекурсивных фильтров нижних частот, определяемых следующим образом:

$$\begin{cases} X_{R1}(kT_s) = \rho_{R1} \times X_{R1}((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_{R1}^2} \times n(kT_s); \\ X_{R2}(kT_s) = \rho_{R2} \times X_{R2}((k-1)T_s) + \sqrt{1-\rho_{R2}^2} \times n(kT_s), \end{cases} \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \dots, \quad (26)$$

где

$$\begin{cases} \rho_{R1} = e^{-\beta_{R1}T_s}; \\ \rho_{R2} = e^{-\beta_{R2}T_s}. \end{cases} \quad (27)$$

Этап SS_RA_10. Вычислить $G_R(kT_s)$ при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$G_R(kT_s) = \gamma_{R1} \times X_{R1}(kT_s) + \gamma_{R2} \times X_{R2}(kT_s). \quad (28)$$

Этап SS_CL_11. Вычислить $A_R(kT_s)$ (дБ) при $k = 1, 2, 3, \dots$ следующим образом:

$$A_R(kT_s) = \begin{cases} \exp\left(Q^{-1}\left[\frac{100}{P_R}Q(G_R(kT_s))\right] \times \sigma_R + m_R\right) & \text{при } G_R(kT_s) > \alpha_R; \\ 0 & \text{при } G_R(kT_s) \leq \alpha_R, \end{cases} \quad (29)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап SS_CL_12. Отбросить первые 5 000 000 выборок синтезированных временных рядов. События ослабления в дожде представлены последовательностями, значения которых превышают 0 дБ для ряда последовательных выборок.

5.2 Конфигурация с несколькими площадками

5.2.1 Обзор

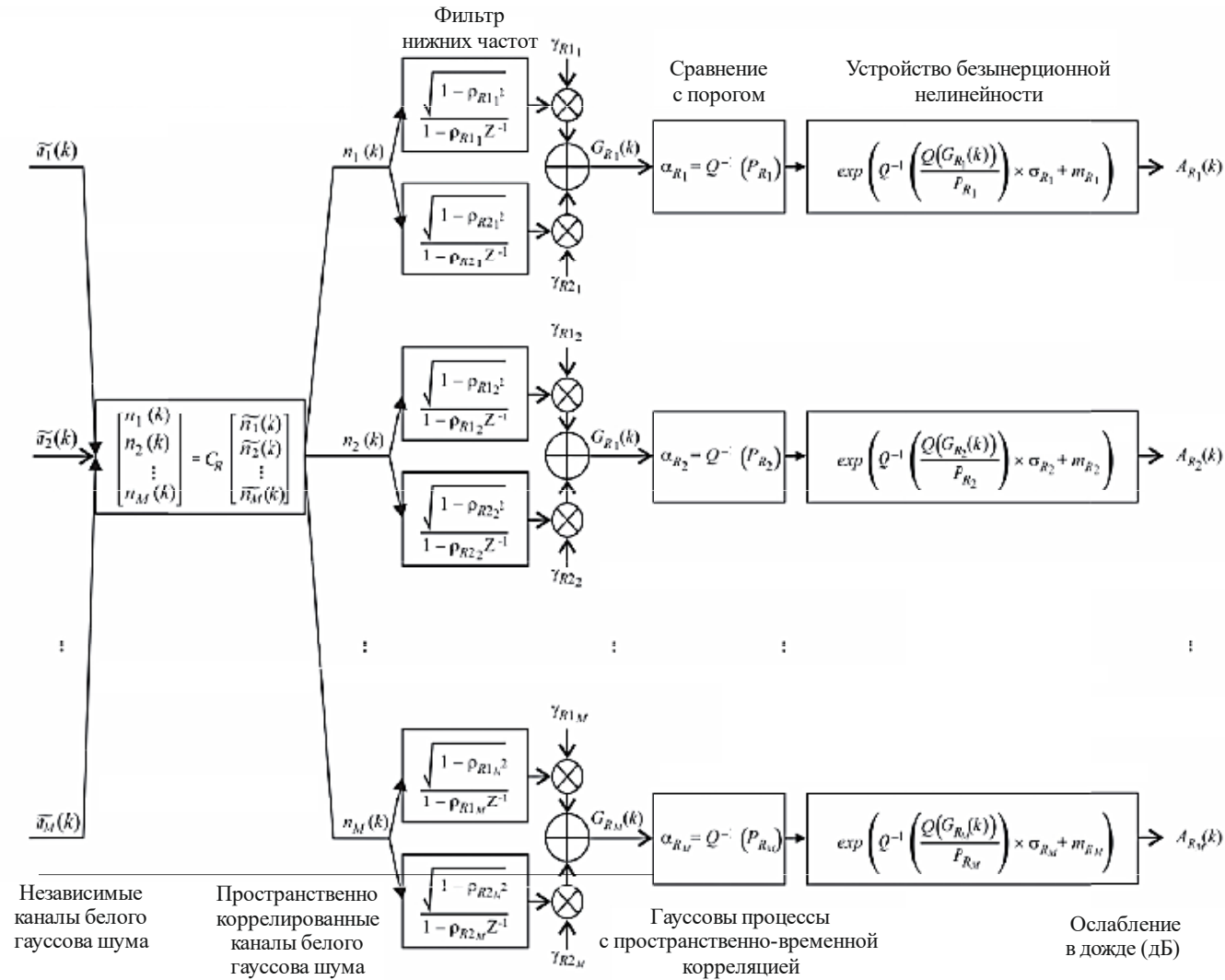
Метод синтеза временных рядов ослабления в дожде с несколькими площадками предполагает, что долгосрочная статистика ослабления в дожде для каждой площадки (A_{Ri}), где $i = \{1, 2, \dots, M\}$ (M – общее количество площадок), соответствует условному логарифмически нормальному распределению.

При использовании метода синтеза временных рядов ослабления в дожде с несколькими площадками синтезируются M временных рядов, воспроизводящих пространственное изменение, спектральные характеристики и распределение вероятностей ослабления в дожде.

Как показано на рисунке 8, временные ряды ослабления в дожде с несколькими площадками $A_{Ri}(t) = A_{Ri}(kT_s)$, где T_s – время выборки, синтезируются на основе дискретной обработки белого гауссова шума $n_i(t) = n_i(kT_s)$. Для удобства kT_s обозначено на рисунке просто как k . Белый гауссов шум пропускается через фильтр нижних частот, отсекается до соответствия заданной вероятности события в облаке и преобразуется из усеченного нормального распределения в условное логарифмически нормальное распределение в устройстве безынерционной нелинейности.

РИСУНОК 8

Блок-схема синтезатора временных рядов ослабления в дожде с несколькими площадками



Синтезатор временных рядов для площадки i определяется следующими параметрами:

- m_{Ri} : математическое ожидание условного логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- σ_{Ri} : стандартное отклонение условного логарифмически нормального распределения ослабления в дожде;
- P_{Ri} : вероятность ослабления в дожде (%);
- α_{Ri} : порог усечения коррелированного гауссова шума;
- β_{R1i} : параметр, описывающий изменение во времени быстрого компонента процесса (с^{-1});
- β_{R2i} : параметр, описывающий изменение во времени медленного компонента процесса (с^{-1});
- γ_{R1i} : параметр, описывающий вес быстрого компонента процесса;
- γ_{R2i} : параметр, описывающий вес медленного компонента процесса;
- D_{ij} : расстояние между площадками i и j (км).

5.2.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов ослабления в дожде с несколькими площадками $A_{Ci}(kT_s)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – временной интервал между выборками, k – индекс каждой выборки, а $i = 1, 2, \dots, M$ (M – общее число площадок), используется следующий поэтапный метод.

А Оценка параметров m_{Ri} , σ_{Ri} и P_{Ri}

Этап MS_RA_1. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ выполнить этапы, указанные в пункте А описания синтезатора временных рядов ослабления в дожде с одной площадкой, приведенного в пункте 5.1.2.

В Параметры фильтра нижних частот

Этап MS_RA_2. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ установить значения:

$$\beta_{R1i} = 9,0186 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{R2i} = 5,0990 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{R1i} = 0,3746;$$

$$\gamma_{R2i} = 0,7738.$$

С Пороги усечения

Этап MS_RA_3. Пороги усечения α_{Ri} равны

$$\alpha_{Ri} = Q^{-1}\left(\frac{P_{Ri}}{100}\right), \quad (30)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Д Синтез временных рядов

Этап MS_RA_4. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ синтезировать временной ряд белого гауссова шума $\tilde{n}_i(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки T_s , составляющий 1 с.

Этап MS_RA_5. Вычислить матрицу $\mathbf{R}_n = [r_{n_{ij}}]$ при $i = \{1, 2, \dots, M\}$ и $j = \{1, 2, \dots, M\}$ следующим образом:

$$r_{n_{ij}} = \frac{1}{\gamma_{R1_i} \gamma_{R1_j} \frac{\sqrt{1-\rho_{R1_i}^2} \sqrt{1-\rho_{R1_j}^2}}{1-\rho_{R1_i} \rho_{R1_j}} + \gamma_{R2_i} \gamma_{R2_j} \frac{\sqrt{1-\rho_{R2_i}^2} \sqrt{1-\rho_{R2_j}^2}}{1-\rho_{R2_i} \rho_{R2_j}} + \gamma_{R1_i} \gamma_{R2_j} \frac{\sqrt{1-\rho_{R1_i}^2} \sqrt{1-\rho_{R2_j}^2}}{1-\rho_{R1_i} \rho_{R2_j}} + \gamma_{R2_i} \gamma_{R1_j} \frac{\sqrt{1-\rho_{R2_i}^2} \sqrt{1-\rho_{R1_j}^2}}{1-\rho_{R2_i} \rho_{R1_j}}} r_{G_{Rij}}, \quad (31)$$

где $\rho_{R1_i} = e^{-\beta_{R1_i} T_s}$, $\rho_{R2_i} = e^{-\beta_{R2_i} T_s}$, $\rho_{R1_j} = e^{-\beta_{R1_j} T_s}$ и $\rho_{R2_j} = e^{-\beta_{R2_j} T_s}$

$$\text{и } r_{G_{Rij}} = r_{G_R}(D_{ij}) = 0,59 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{31}\right) + 0,41 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{800}\right).$$

Этап MS_RA_6. Определить нижнюю треугольную матрицу $\mathbf{C}_R = [c_{R_{ij}}]$ с помощью факторизации Холецкого¹ матрицы \mathbf{R}_n , где

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{C}_R \mathbf{C}_R^T. \quad (32)$$

Этап MS_RA_7. Вычислить $\mathbf{n}(kT_s) = [n_1(kT_s) \ n_2(kT_s) \ \dots \ n_M(kT_s)]^T$ следующим образом:

$$\mathbf{n}(kT_s) = \mathbf{C}_R \cdot \tilde{\mathbf{n}}(kT_s), \quad (33)$$

где $\tilde{\mathbf{n}}(kT_s) = [\tilde{n}_1(kT_s) \ \tilde{n}_2(kT_s) \ \dots \ \tilde{n}_M(kT_s)]^T$.

Для справок:

$$\begin{cases} n_1(kT_s) = \tilde{n}_1(kT_s); \\ n_2(kT_s) = c_{R_{21}} \tilde{n}_1(kT_s) + c_{R_{22}} \tilde{n}_2(kT_s); \\ \vdots \\ n_M(kT_s) = c_{R_{M1}} \tilde{n}_1(kT_s) + c_{R_{M2}} \tilde{n}_2(kT_s) + \dots + c_{R_{MM}} \tilde{n}_M(kT_s). \end{cases} \quad (34)$$

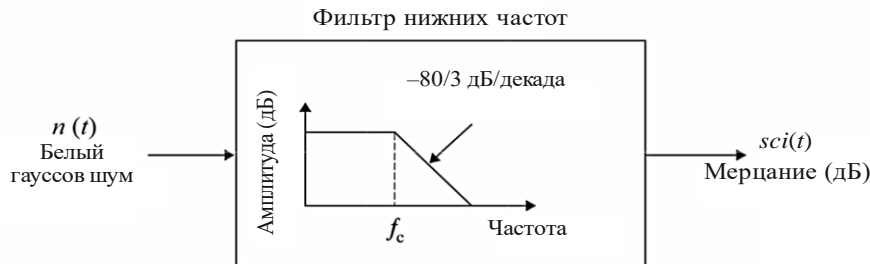
Этап MS_RA_8. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ выполнить этапы с SS_RA_8 по SS_RA_12 пункта D описания синтезатора временных рядов ослабления в дожде с одной площадкой, приведенного в пункте 5.1.2.

6 Тропосферное мерцание с единичной дисперсией

Как показано на рисунке 9, временной ряд мерцания $sci(t)$ можно генерировать 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 усилением ослабления в дожде.

РИСУНОК 9

Блок-схема синтезатора временных рядов мерцания с единичной дисперсией



Приложение 2

Синтез временных рядов общих ухудшений в тропосфере для конфигураций с одной площадкой и несколькими площадками на трассах Земля-космос

1 Введение

Методика, представленная в этом Приложении, обеспечивает методы синтеза общих ухудшений в тропосфере для конфигураций с одной и с несколькими площадками (ослабление в газах, в облаке и в дожде, а также ослабление и усиление из-за тропосферного мерцания) на трассах Земля-космос.

2 Конфигурация с одной площадкой

2.1 Обзор

Временные ряды, создаваемые сочетанием ослабления в газах, ослабления в облаке и ослабления в дожде с одной площадкой, а также ослабления и усиления из-за мерцания синтезируются методом, который представлен на рисунке 10, с использованием методов, описанных в Приложении 1. Введена соответствующая корреляция между ослаблением в облаке и ослаблением в дожде с использованием той же временной корреляции и того же базового гауссова процесса. Временной корреляции ослабления в дожде отдается предпочтение, поскольку ослабление в дожде является доминирующим ухудшением.

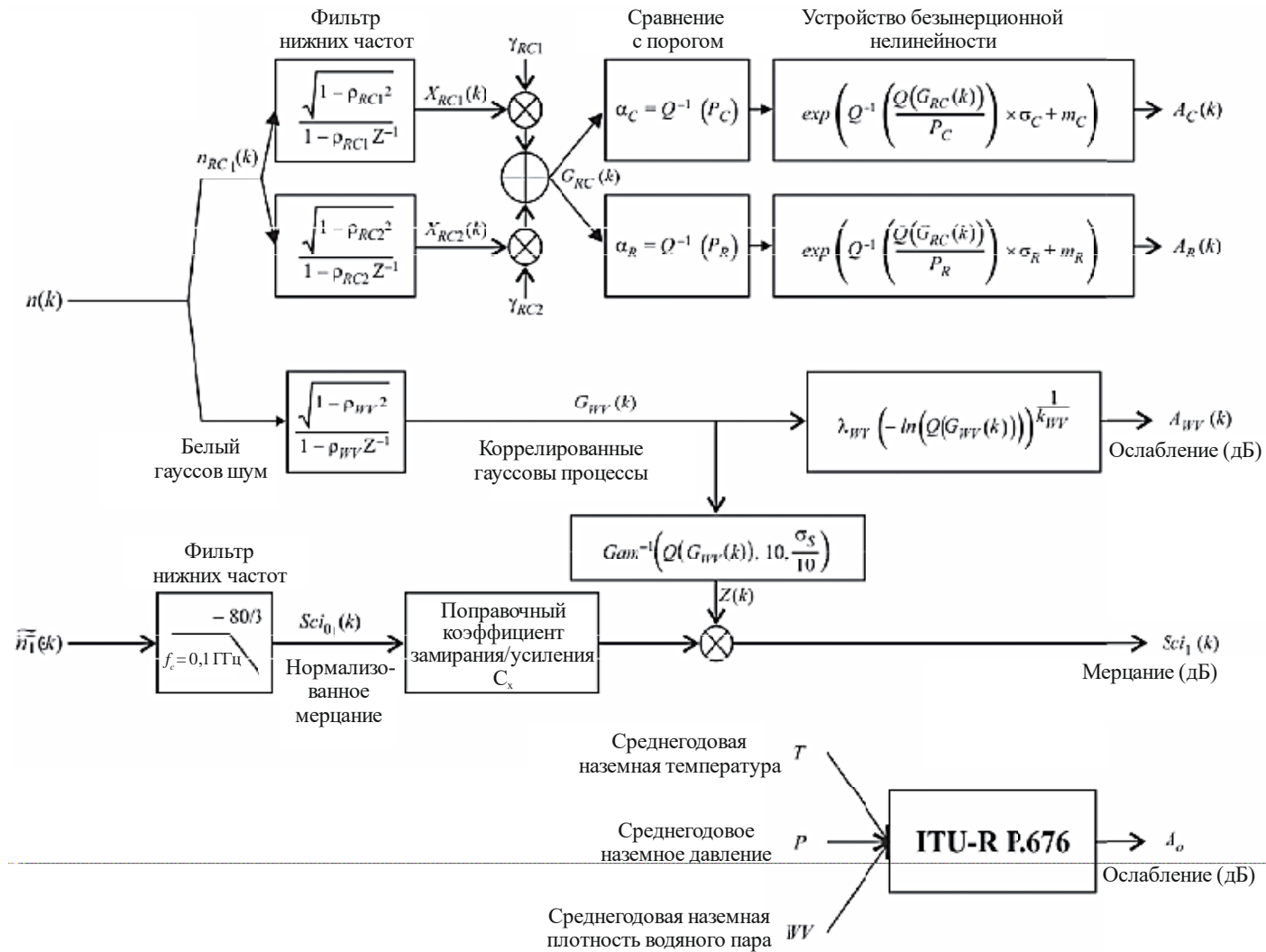
Ослабление в облаке интерполируется, если: а) синтезировано событие дождя со значением ослабления, превышающим 0 дБ; и б) ослабление в облаке превышает порог $A_{C_{thresh}} = \frac{K_l}{\sin \varphi}$, где φ – угол места, а K_l задается на этапе *SS_CL_3* из Приложения 1.

Для трасс Земля-космос метод синтеза временных рядов действителен для диапазона частот от 4 ГГц до 55 ГГц и углов места от 5° до 90°. Для низких частот, средних и высоких углов места и регионов с умеренным климатом общее ослабление можно правильно аппроксимировать с достаточной точностью по одному ослаблению в дожде.

При использовании этого метода синтеза временных рядов синтезируется временной ряд, воспроизводящий статистические данные о спектральных характеристиках, крутизне замирания и длительности замирания событий общего ослабления. Также воспроизводятся статистические данные о длительности периодов между событиями замирания, но только в рамках отдельных событий ослабления.

РИСУНОК 10

Блок-схема синтезатора временных рядов общего ослабления и мерцания с одной площадкой



2.2 Поэтапный метод

Для синтеза временных рядов общих ухудшений в тропосфере (ослабление в газах, ослабление в облаке, ослабление в дожде, а также замирание и усиление из-за мерцания) с одной площадкой $A_{TOT}(kT_s)$ при $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – интервал времени между выборками, а k – индекс каждой выборки, используется следующий поэтапный метод.

Этап SS_TOT_1. Синтезировать 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 SS_TOT_2. Рассчитать среднегодовой временной ряд ослабления в газообразном кислороде A_O в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 2.2 Приложения 1.

Этап SS_TOT_3. Рассчитать временной ряд ослабления в водяном паре $A_{WV}(kT_s)$, начав с временного ряда гауссова шума $n(kT_s)$, в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 3.1.2 Приложения 1.

Этап SS_TOT_4. Рассчитать временной ряд ослабления в облаке $A_C(kT_s)$, начав с временного ряда гауссова шума $n(kT_s)$ в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 4.1.2 Приложения 1, заменив этап *SS_CL_5* следующим этапом.

Установить:

$$\beta_{C1} = \beta_{R1} = \beta_{RC1} = 9,0186 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{C2} = \beta_{R2} = \beta_{RC2} = 5,0990 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{C1} = \gamma_{R1} = \gamma_{RC1} = 0,3746;$$

$$\gamma_{C2} = \gamma_{R2} = \gamma_{RC2} = 0,7738.$$

Этап SS_TOT_5. Рассчитать временной ряд ослабления в дожде $A_R(kT_s)$, начав с временного ряда гауссова шума $n(kT_s)$ в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 5.1.2 Приложения 1, заменив этап *SS_RA_5* следующим этапом.

Установить:

$$\beta_{R1} = \beta_{RC1} = 9,0186 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{R2} = \beta_{RC2} = 5,0990 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{R1} = \gamma_{RC1} = 0,3746;$$

$$\gamma_{R2} = \gamma_{RC2} = 0,7738.$$

Этап SS_TOT_6. Для каждого интервала времени kT_s : если $A_R(kT_s) > 0$ и $A_C(kT_s) > A_{C_{thresh}} = \frac{K_I}{\sin \varphi}$,

то установить $A_C(kT_s) = \frac{K_I}{\sin \varphi}$.

Этап SS_TOT_7. Определить многочлены замирания и усиления из-за мерцания следующим образом:

$$a_{Fade}(P) = -0,061 \times (\log_{10}(P))^3 + 0,072 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,71 \times \log_{10}(P) + 3,0;$$

$$a_{Enhance}(P) = -0,0597 \times (\log_{10}(P))^3 - 0,0835 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,258 \times \log_{10}(P) + 2,672.$$

Этап SS_TOT_8. Синтезировать временной ряд мерцания с единичной дисперсией $Sci_0(kT_s)$ в соответствии с методом, рекомендованным в разделе 6 Приложения 1.

Этап SS_TOT_9. Рассчитать временной ряд поправочных коэффициентов $C_x(kT_s)$, чтобы различать замирание из-за мерцания и усиление из-за мерцания:

$$C_x(kT_s) = \begin{cases} \frac{a_{Fade}(100 \times Q[Sci_0(kT_s)])}{a_{Enhance}(100 \times Q[Sci_0(kT_s)])} & \text{при } Sci_0(kT_s) > 0; \\ 1 & \text{при } Sci_0(kT_s) \leq 0, \end{cases} \quad (35)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 Приложения 1 настоящей Рекомендации и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап SS_TOT_10. Если $C_x(kT_s) < 1$ или $100 \times Q[Sci_0(kT_s)] > 45$, то установить $C_x(kT_s) = 1$.

Этап SS_TOT_11. Рассчитать стандартное отклонение мерцания σ_s методом "Вычисление месячных и долгосрочных статистических данных об амплитудных мерцаниях при углах места более 5°" из Рекомендации МСЭ-R P.618 (для справок: в Рекомендации МСЭ-R P.618 σ_s обозначается как σ).

Этап SS_TOT_12. Промежуточный базовый гауссов процесс $G_{wv}(kT_s)$, рекомендованный для этапа *SS_TOT_3*, преобразуется в распределенный временной ряд с гамма-распределением² $Z(kT_s)$ следующим образом:

$$Z(kT_s) = Gam^{-1} \left[Q(G_{wv}(kT_s)), 10, \frac{\sigma_s}{10} \right], \quad (36)$$

где функция Gam представляет собой дополнительную совокупную функцию гамма-распределения, описанную в Рекомендации МСЭ-R P.1057 и определяемую следующим образом:

$$Gam(x, k, \vartheta) = \int_x^{\infty} \frac{x^{k-1} \exp(-x/\vartheta)}{\Gamma(k)\vartheta^k} dt. \quad (37)$$

Отметим, что $Q(G_{wv}(kT_s)) = \exp \left(- \left(\frac{A_{wv}(kT_s)}{\lambda_{wv}} \right)^{k_{wv}} \right)$.

Этап SS_TOT_13. Рассчитать временной ряд мерцания $Sci(kT_s)$ следующим образом:

$$Sci(kT_s) = \begin{cases} Sci_0(kT_s) \times C_x(kT_s) \times Z(kT_s) \times [A_R(kT_s)]^{5/12} & \text{при } A_R(kT_s) > 1; \\ Sci_0(kT_s) \times C_x(kT_s) \times Z(kT_s) & \text{при } A_R(kT_s) \leq 1. \end{cases} \quad (38)$$

Этап SS_TOT_14. Рассчитать временной ряд общего ухудшения в тропосфере $A_{TOT}(kT_s)$ следующим образом:

$$A_{TOT}(kT_s) = A_R(kT_s) + A_C(kT_s) + A_V(kT_s) + A_O + Sci(kT_s). \quad (39)$$

3 Конфигурация с несколькими площадками

3.1 Обзор

Временные ряды общего ослабления, а также замирания и усиления из-за мерцания с несколькими площадками синтезируются методом, который представлен на рисунке 11, с использованием методов, описанных в предыдущих разделах. Введена соответствующая корреляция между ослаблением в

² Функции гамма-распределения и обратного гамма-распределения реализованы в языках программирования Matlab, Octave и Python.

облаке и ослаблением в дожде с использованием той же временной корреляции и того же базового гауссова процесса. Временной корреляции ослабления в дожде отдается предпочтение, поскольку ослабление в дожде является доминирующим ухудшением. По той же причине отдается предпочтение пространственной корреляции ослабления в дожде.

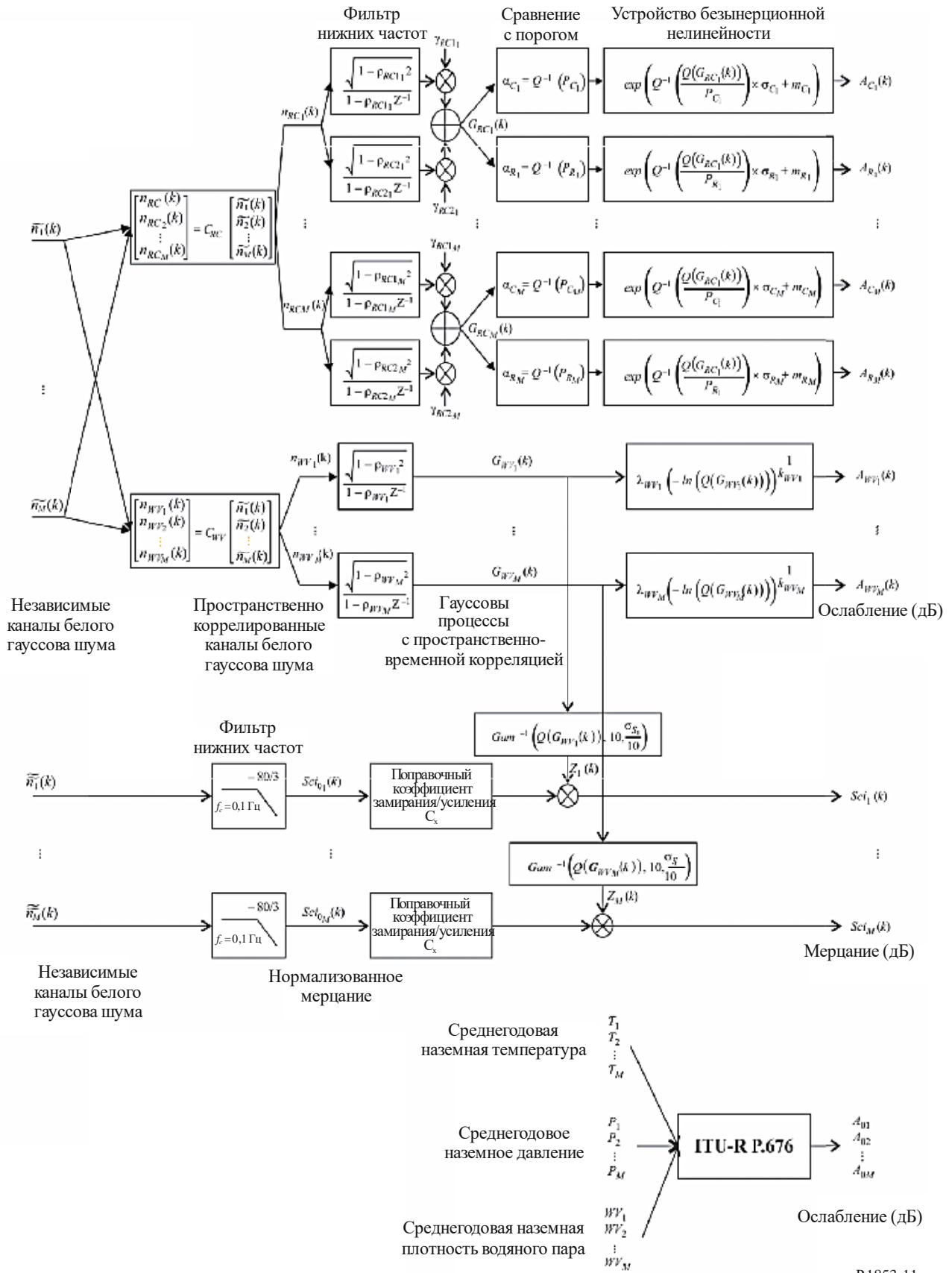
Если а) возникло событие дождя (ослабление в синтетическом дожде больше 0 дБ) и б) ослабление в облаке превышает порог $A_{C_{thresh}} = \frac{K_l}{\sin \varphi}$, где φ – угол места, а K_l задается на этапе *SS_CL_3*, то интерполируется ослабление в облаке.

Для трасс Земля-космос метод синтеза временных рядов действителен для диапазона частот от 4 ГГц до 55 ГГц и углов места от 5° до 90°. В некоторых обстоятельствах (например, при низких частотах, средних и высоких углах места и в регионах с умеренным климатом) общее ослабление можно аппроксимировать с достаточной точностью по одному ослаблению в дожде.

При использовании этого метода синтеза временных рядов синтезируется временной ряд, воспроизводящий статистические данные о пространственных изменениях, спектральных характеристиках, крутизне замирания и длительности замирания событий общего ослабления. Также воспроизводятся статистические данные о длительности периодов между событиями замирания, но только в рамках отдельных событий ослабления.

РИСУНОК 11

Блок-схема синтезатора временных рядов общего ослабления и мерцания с несколькими площадками



3.2 Поэтапный метод

Следующий поэтапный метод используется для синтеза временных рядов общих ухудшений в тропосфере (ослабление в газах, ослабление в облаке, ослабление в дожде, а также замирание и усиление из-за мерцания) с несколькими площадками $A_{TOTi}(kT_s)$ при $k = 1, 2, 3, \dots$, где T_s – интервал времени между выборками, k – индекс каждой выборки, а $i = 1, 2, \dots, M$ (M – общее количество площадок).

Этап MS_TOT_1. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ синтезировать временной ряд белого гауссова шума $\tilde{n}_i(kT_s)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией в период выборки T_s , составляющий 1 с.

Этап MS_TOT_2. Рассчитать временной ряд ослабления в газообразном кислороде A_{O_i} в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 2.3 Приложения 1.

Этап MS_TOT_3. Рассчитать временной ряд ослабления в водяном паре $A_{WV_i}(kT_s)$ начиная с временного ряда гауссова шума $\tilde{n}_i(kT_s)$ в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 3.2 Приложения 1.

Этап MS_TOT_4. Рассчитать временной ряд ослабления в облаке $A_{C_i}(kT_s)$ начиная с временного ряда гауссова шума $\tilde{n}_i(kT_s)$ в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 4.2 Приложения 1, с заменой этапа *MS_CL_2* следующим этапом.

Установить:

$$\beta_{C1i} = \beta_{R1i} = \beta_{RC1i} = 9,0186 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{C2i} = \beta_{R2i} = \beta_{RC2i} = 5,0990 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{C1i} = \gamma_{R1i} = \gamma_{RC1i} = 0,3746;$$

$$\gamma_{C2i} = \gamma_{R2i} = \gamma_{RC2i} = 0,7738$$

и заменить формулы для расчета $r_{G_{C_{ij}}}$ на этапе *MS_CL_5* следующей формулой:

$$r_{G_{C_{ij}}} = r_{G_{R_{ij}}} = r_{G_{RC_{ij}}} = 0,59 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{31}\right) + 0,41 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{800}\right). \quad (40)$$

Этап MS_TOT_5. Рассчитать временной ряд ослабления в дожде $A_{R_i}(kT_s)$ начиная с временного ряда гауссова шума $\tilde{n}_i(kT_s)$ в соответствии с процедурой, рекомендованной в пункте 5.2.2 Приложения 1, с заменой этапа *MS_RA_2* следующим этапом.

Установить:

$$\beta_{R1i} = \beta_{RC1i} = 9,0186 \times 10^{-4} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\beta_{R2i} = \beta_{RC2i} = 5,0990 \times 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$\gamma_{R1i} = \gamma_{RC1i} = 0,3746;$$

$$\gamma_{R2i} = \gamma_{RC2i} = 0,7738$$

и заменить формулы для расчета $r_{G_{R_{ij}}}$ на этапе *MS_RA_5* следующей формулой:

$$r_{G_{R_{ij}}} = r_{G_{RC_{ij}}} = 0,59 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{31}\right) + 0,41 \cdot \exp\left(-\frac{D_{ij}}{800}\right). \quad (41)$$

Этап MS_TOT_6. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ и для каждой метки времени $k_i T_s$ если $A_{R_i}(kT_s) > 0$ и $A_{C_i}(kT_s) > A_{C_i}^{\text{thresh}} = \frac{K_l}{\sin \varphi_i}$, то установить $A_{C_i}(kT_s) = \frac{K_l}{\sin \varphi_i}$.

Этап MS_TOT_7. Определить многочлены замирания и усиления из-за мерцания:

$$a_{Fade}(P) = -0,061 \times (\log_{10}(P))^3 + 0,072 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,71 \times \log_{10}(P) + 3,0;$$

$$a_{Enhance}(P) = -0,0597 \times (\log_{10}(P))^3 - 0,0835 \times (\log_{10}(P))^2 - 1,258 \times \log_{10}(P) + 2,672.$$

Этап MS_TOT_8. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ синтезировать временной ряд мерцания с единичной дисперсией $Sci_{0i}(kT_s)$ в соответствии с методом, рекомендованным в разделе б Приложения 1.

Этап MS_TOT_9. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ рассчитать временной ряд поправочных коэффициентов $C_{x_i}(kT_s)$, чтобы различать замирание и усиление из-за мерцания:

$$C_{x_i}(kT_s) = \begin{cases} \frac{a_{Fade}(100 \times Q[Sci_{0i}(kT_s)])}{a_{Enhance}(100 \times Q[Sci_{0i}(kT_s)])} & \text{при } Sci_{0i}(kT_s) > 0; \\ 1 & \text{при } Sci_{0i}(kT_s) \leq 0, \end{cases} \quad (42)$$

где функция Q определена в пункте 3.1.2 Приложения 1 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап MS_TOT_10. Если $C_{x_i}(kT_s) < 1$ или $100 \times Q[Sci_{0i}(kT_s)] > 45$, то $C_{x_i}(kT_s) = 1$. (43)

Этап MS_TOT_11. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ рассчитать стандартное отклонение мерцания σ_{s_i} методом "Вычисление месячных и долгосрочных статистических данных об амплитудных мерцаниях при углах места более 5°" из Рекомендации МСЭ-R P.618.

Этап MS_TOT_12. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ преобразовать промежуточный базовый гауссов процесс $G_{wv_i}(kT_s)$, определенный на этапе MS_TOT_3, в гамма-распределенный временной ряд $Z_i(kT_s)$ следующим образом:

$$Z_i(kT_s) = Gam^{-1} \left[Q(G_{wv_i}(kT_s)), 10, \frac{\sigma_{s_i}}{10} \right], \quad (44)$$

где функция Gam представляет собой дополнительную совокупную функцию гамма-распределения, описанную в Рекомендации МСЭ-R P.1057 и определяемую следующим образом:

$$Gam(x, k, \vartheta) = \int_x^{\infty} \frac{x^{k-1} \exp(-x/\vartheta)}{\Gamma(k)\vartheta^k} dt. \quad (45)$$

Отметим, что $Q(G_{wv_i}(kT_s)) = \exp \left(- \left(\frac{A_{wv_i}(kT_s)}{\lambda_{wv_i}} \right)^{k_{wv_i}} \right)$.

Этап MS_TOT_13. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ рассчитать временной ряд мерцания $Sci_i(kT_s)$ следующим образом:

$$Sci_i(kT_s) = \begin{cases} Sci_{0i}(kT_s) \times C_{x_i}(kT_s) \times Z_i(kT_s) \times [A_{R_i}(kT_s)]^{1/2} & \text{при } A_{R_i}(kT_s) > 1; \\ Sci_{0i}(kT_s) \times C_{x_i}(kT_s) \times Z_i(kT_s) & \text{при } A_{R_i}(kT_s) \leq 1. \end{cases} \quad (46)$$

Этап MS_TOT_14. Для каждого номера площадки $i = \{1, 2, \dots, M\}$ рассчитать временной ряд общего ухудшения в тропосфере $A_{TOT_i}(kT_s)$ следующим образом:

$$A_{TOT_i}(kT_s) = A_{R_i}(kT_s) + A_{C_i}(kT_s) + A_{V_i}(kT_s) + A_{O_i} + Sci_i(kT_s). \quad (47)$$

Приложение 3

Синтез временных рядов ослабления в дожде на единичных наземных трассах

Для синтеза временных рядов ослабления в дожде на единичных наземных трассах следует использовать приведенный ниже метод. Для единичных наземных трасс можно использовать метод синтеза временных рядов ослабления в дожде на трассах Земля-космос с одной площадкой, описанный в разделе 5 Приложения 1, со следующими изменениями.

Аналогично трассам Земля-космос:

- предполагается, что долгосрочная статистика ослабления в дожде на наземных трассах представляет собой условное логарифмически нормальное распределение;
- метод прогнозирования ослабления в дожде МСЭ-R из Рекомендации МСЭ-R P.530 хорошо аппроксимируется условным логарифмически нормальным распределением в наиболее значимом диапазоне вероятностей превышения;
- ввиду того, что с помощью метода прогнозирования ослабления в дожде для наземных трасс прогнозируется ненулевое ослабление в дожде при значениях вероятности превышения, превосходящих вероятность ослабления в дожде, метод синтеза временных рядов позволяет корректировать временные ряды ослабления таким образом, чтобы ослабление в дожде, соответствующее значениям вероятности превышения, превосходящим значения вероятности ослабления в дожде, составляло 0 дБ;
- для наземных трасс метод синтеза временных рядов действителен для диапазона частот от 4 ГГц до 40 ГГц и значений длины трассы от 2 км до 60 км.

Для синтеза временных рядов ослабления в дожде с одной площадкой на наземных трассах следует выполнить все этапы, описанные в пункте 5.1.2, заменив пункт *A* следующим пунктом *A'*.

A Оценка параметров m_R , σ_R и P_R

Параметры m_R и σ_R определяются по интегральной функции распределения ослабления в дожде в зависимости от вероятности события. Статистические параметры ослабления в дожде можно определить по местным данным, или, в отсутствие местных данных, с использованием метода прогнозирования ослабления в дожде из Рекомендации МСЭ-R P.530.

Для заданных значений длины трассы и частоты производится логарифмически нормальный подбор ослабления в дожде в зависимости от вероятности события следующим образом.

Этап SS_RA_1'. Определить вероятность ослабления в дожде на трассе P_R (% времени) по данным местных измерений, или, в отсутствие данных измерений, можно использовать вероятность дождя $P_{0_{annual}}$, указанную в Рекомендации МСЭ-R P.837.

Этап SS_RA_2'. Составить множество пар $[P_i/P_R, A_{Ri}]$, где P_i (% времени) – вероятность превышения значения ослабления в дожде A_{Ri} (дБ), $P_i \leq P_R$. Конкретные значения P_i выбираются с учетом заданного диапазона вероятностей; однако предлагается следующий набор значений процента времени: 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5 и 10% с ограничением $P_i \leq P_R$.

Этап SS_RA_3'. Множество пар $[P_i/P_R, A_{Ri}]$ преобразуется во множество пар $\left[Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_R}\right), \ln A_{Ri} \right]$, где функция Q определена в пункте 3.1.2 и описана в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

Этап SS_RA_4. Определить переменные m_R и σ_R путем подбора методом наименьших квадратов таким образом, чтобы $\ln A_{Ri} = \sigma_R Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_R}\right) + m_R$ для всех значений i . Подбор методом наименьших квадратов можно определить с использованием метода "Поэтапная процедура для аппроксимации дополнительного интегрального распределения посредством логарифмически нормального дополнительного интегрального распределения", описанного в Рекомендации МСЭ-Р Р.1057.
