

Международный союз электросвязи

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.840-8
(08/2019)

Ослабление из-за облачности и тумана

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.840-8

Ослабление из-за облачности и тумана

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017-2019)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описаны методы прогнозирования ослабления из-за облачности и тумана на трассах Земля-космос.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a)* что существует необходимость в обеспечении инженеров руководством по проектированию систем электросвязи Земля-космос на частотах выше 10 ГГц;
- b)* что ослабление из-за облачности может быть важным фактором, особенно для микроволновых систем, работающих на частотах гораздо выше 10 ГГц, или для малодоступных систем;
- c)* что для расчета временных рядов общего ослабления и для методов пространственно-временного прогнозирования необходимо аналитическое выражение статистических данных общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках;
- d)* что данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, могут быть недоступны,

рекомендует

- 1** в случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, недоступны, использовать для прогнозирования ослабления из-за облачности и тумана метод, приведенный в пункте 3.1 Приложения 1;
- 2** в случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, недоступны, использовать для расчета ослабления из-за облачности метод, приведенный в пункте 3.2 Приложения 1;
- 3** использовать информацию, содержащуюся в разделе 4 Приложения 1, для общих расчетов эффектов распространения, которые необходимы, среди прочего, для пространственно-временных моделей каналов, для которых требуется аналитическое выражение статистических данных общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках.

Приложение 1**1 Введение**

На частотах до 200 ГГц для облаков или тумана, полностью состоящих из небольших капелек, размер которых, как правило, меньше 0,01 см, действительна рэлеевская аппроксимация, и погонное ослабление в облачности или тумане может быть записано как:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T)M \quad (\text{дБ/км}), \quad (1)$$

где

γ_c : погонное ослабление (дБ/км) в облачности;

K_l : коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды, содержащейся в облаках ((дБ/км)/(г/м³));

M : плотность жидкой воды в облачности или тумане (г/м³);

f : частота (ГГц);

T : температура жидкой воды, содержащейся в облаках (К).

На частотах порядка 100 ГГц и выше ослабление из-за тумана может быть значительным. Плотность жидкой воды в тумане обычно составляет около 0,05 г/м³ при среднем тумане (видимость порядка 300 м) и 0,5 г/м³ при густом тумане (видимость порядка 50 м).

2 Коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды, содержащейся в облаках

Для вычисления значения K_l для частот до 200 ГГц можно использовать математическую модель, основанную на рэлеевском рассеянии, в которой применяется двумерная модель Дебая для диэлектрической проницаемости $\varepsilon(f)$ воды:

$$K_l(f, T) = \frac{0,819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (\text{дБ/км})/(\text{г/м}^3), \quad (2)$$

где f – частота (ГГц) и:

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}. \quad (3)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость воды задается выражениями:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (f/f_p)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (f/f_s)^2} + \varepsilon_2, \quad (5)$$

где:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3(\theta - 1); \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_0; \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52; \quad (8)$$

$$\theta = 300/T \quad (9)$$

и T – температура жидкой воды (К).

Главная частота релаксации f_p и вторичная частота релаксации f_s определяются следующим образом:

$$f_p = 20,20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (\text{ГГц}); \quad (10)$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{ГГц}). \quad (11)$$

3 Ослабление из-за облачности на наклонных трассах

В случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках L (кг/м² или, эквивалентно, мм), недоступны, следует использовать для прогнозирования ослабления из-за облачности на наклонных трассах метод, приведенный в пункте 3.1. Этот метод прогнозирования основан на данных ERA-40, в которых используется общий столбчатый объем жидкой воды, содержащейся в облаках, с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К, L_{red} (кг/м² или, эквивалентно, мм).

В случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках L , доступны из других источников, например данные радиометрических измерений, наблюдения Земли или метеорологические цифровые данные, для расчета ослабления из-за облачности на наклонных трассах следует использовать метод, приведенный в пункте 3.2.

3.1 Распределение ослабления из-за облачности на наклонных трассах на основе цифровых карт мира

Ослабление из-за облачности на наклонных трассах A для данного уровня вероятности p определяется следующим образом:

$$A = \frac{L_{red} K_l(f, 273,15)}{\sin \varphi} \quad (\text{дБ}) \quad \text{для } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ, \quad (12)$$

где L_{red} – общий столбчатый объем жидкой воды, содержащейся в облаках, с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К, L_{red} (кг/м² или, эквивалентно, мм) для данного уровня вероятности p , φ – угол места, и K_l рассчитывается по уравнениям (2) – (11) для температуры воды 273,15 К.

Годовые значения общего столбчатого объема жидкой воды L_{red} (кг/м²) со сниженной температурой, содержащейся в облаках, превышаемые при уровнях вероятности 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% относительно среднегодовых значений, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт.

Месячные значения общего столбчатого объема жидкой воды L_{red} (кг/м²) со сниженной температурой, содержащейся в облаках, превышаемые при уровнях вероятности 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% относительно среднемесячных значений, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт.

Эти цифровые карты доступны в дополнительном файле R-REC-P.840-7-Maps.zip.

Данные приведены от 0° до 360° по долготе и от +90° до –90° по широте с разрешением 1,125° по широте и долготе. Общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, в любом заданном местонахождении на поверхности Земли может быть получен с помощью следующего метода интерполяции:

- определить две вероятности p_{above} и p_{below} , большую и меньшую заданной вероятности p , из набора 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% для годовых статистических данных и из набора 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% для месячных статистических данных;
- для двух вероятностей p_{above} и p_{below} определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, L_{red1} , L_{red2} , L_{red3} и L_{red4} в четырех ближайших узловых точках;
- определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, $L_{redabove}$ и $L_{redbelow}$ при вероятностях p_{above} и p_{below} путем выполнения билинейной интерполяции четырех значений общего столбчатого объема жидкой воды со сниженной температурой L_{red1} , L_{red2} , L_{red3} , и L_{red4} в четырех узловых точках, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144;
- определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, L_{red} при заданной вероятности p путем интерполирования $L_{redabove}$ и $L_{redbelow}$ в зависимости от p_{above} и p_{below} к p по линейной шкале L_{red} в зависимости от $\log p$.

3.2 Ослабление из-за облачности на наклонных трассах на основе местных данных

Ослабление из-за облачности на наклонных трассах A определяется следующим образом:

$$A = \frac{LK_1^*(f, 273,15)}{\sin \varphi} \quad (\text{дБ}) \quad \text{для } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ, \quad (13)$$

где L – общий столбчатый объем жидкой воды, содержащейся в облаках ($\text{кг}/\text{м}^2$ или, эквивалентно, мм), φ – угол места, и K_1^* рассчитывается следующим образом:

$$K_1^*(f, T) = \frac{0,819 (1,9479 \cdot 10^{-4} f^{2,308} + 2,9424 f^{0,7436} - 4,9451)}{\varepsilon^n (1 + \eta^2)} \quad (\text{дБ}/\text{км})/(\text{г}/\text{м}^3), \quad (14)$$

где η – определяется в уравнении (3), ε^n – определяется в уравнении (4) и температура жидкой воды T составляет 273,15 К.

4 Аппроксимация L_{red} с помощью логарифмически нормального распределения

Годовые статистические данные общего столбчатого объема жидкой воды со сниженной до фиксированного значения 273,15 К температурой могут быть аппроксимированы с помощью логарифмически нормального распределения Дирака. Цифровые карты средних значений m , стандартного отклонения σ и вероятности ненулевого общего столбчатого объема жидкой воды с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К, P_{CLW} являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в дополнительном файле R-REC-P.840-8-201712-I!!ZIP-E.zip. Данные приведены от 0° в. д. до 360° в. д. по долготе и от $+90^\circ$ с. ш. до -90° с. ш. по широте с разрешением $1,125^\circ$ по широте и долготе.

В данном разделе приведены значения m , σ , и P_{CLW} (%) в заданном местоположении, требуемом синтезатором временных рядов ослабления в облаке, который описан в Рекомендации МСЭ-R P.1853, и соответствующее значение L_{red} приведено только для справки. Во всех других случаях для расчета L_{red} следует использовать раздел 3, а не аппроксимированное значение, рассчитанное согласно данному разделу.

Общий столбчатый объем жидкой воды с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К, L_{red} в любом заданном местонахождении на поверхности Земли для любого среднегодового значения вероятности превышения P (%) от 0,1% до 99% может быть рассчитан следующим образом:

- определить 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 окрестных узловых точках;
- определить значения m, σ и P_{CLW} в заданном местоположении путем осуществления билинейной пространственной интерполяции каждого параметра m, σ и P_{CLW} , используя метод, описанный в Приложении 1 Рекомендации МСЭ-R P.1144;
- для справки, L_{red} – общий столбчатый объем жидкой воды с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К в заданном местонахождении на поверхности Земли, и вероятность превышения P выводится из пространственно интерполированных значений m, σ и P_{CLW} следующим образом:

- если $P \geq P_{CLW}$,

$$L_{red} = 0; \quad (15a)$$

- в других случаях,

$$L_{red} = e^{m + \sigma Q^{-1}\left(\frac{P}{P_{CLW}}\right)} \quad (\text{кг}/\text{м}^2), \quad (15b)$$

где $Q^{-1}(x)$ – обратная дополнительная кумулятивная функция нормального распределения, определенная в Рекомендации МСЭ-R P.1057.