

Рекомендация МСЭ-R P.525-5

(11/2024)

Серия Р: Распространение радиоволн

Расчет ослабления в свободном пространстве

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/ru>, 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: <https://www.itu.int/publ/R-REC/ru>.)

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, 2024 г.

© ITU 2024

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.525-5

Расчет ослабления в свободном пространстве

(1978-1982-1994-2016-2019-2024)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены методы расчета ослабления в свободном пространстве.

Ключевые слова

Свободное пространство, ослабление, линии электросвязи

Соответствующие Рекомендации МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.341

Рекомендация МСЭ-R P.368

ПРИМЕЧАНИЕ. – В каждом случае следует использовать последнюю действующую редакцию Рекомендации.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

что распространение радиоволн в свободном пространстве является фундаментальным эталоном в радиотехнике,

рекомендует,

чтобы для расчета ослабления в свободном пространстве использовались методы, изложенные в Приложении.

Приложение**1 Введение**

Применительно к целям радиосвязи свободное пространство определяется как абсолютный вакуум, который можно считать бесконечным во всех направлениях; таким образом распространение в свободном пространстве означает распространение радиоволн, излучаемых в свободном пространстве¹.

Поскольку распространение радиоволн в свободном пространстве часто используется как эталон в других текстах, в данном Приложении приведены соответствующие формулы.

¹ В электротехническом словаре Международной организации по стандартизации (ИСО) (электропедии) приводится более общее определение:

Распространение в свободном пространстве – распространение электромагнитной волны в однородной идеальной диэлектрической среде, которую можно считать бесконечной во всех направлениях.

ПРИМЕЧАНИЕ. – При распространении в свободном пространстве на некотором расстоянии от источника, определяемом размером источника и длиной волны, величина каждого вектора электромагнитного поля уменьшается в любом заданном направлении пропорционально обратной величине расстояния от источника.

2 Основные формулы для линий электросвязи

Расчеты, связанные с распространением радиоволн в свободном пространстве, можно провести двумя различными способами, каждый из которых применяется к определенному типу служб.

2.1 Линии связи пункта с зоной

Если имеется передатчик, обслуживающий несколько приемников, размещенных случайным образом (радиовещание, подвижная служба), то в точке, расположенной на некотором соответствующем расстоянии от передатчика, электрическое поле рассчитывается по формуле:

$$e = \frac{\sqrt{30p}}{d}, \quad (1)$$

где:

- e : среднеквадратичное значение напряженности поля (В/м) (см. Примечание 1);
- p : эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) передатчика в направлении рассматриваемой точки (Вт) (см. Примечание 2);
- d : расстояние от передатчика до рассматриваемой точки (м).

Уравнение (1) часто заменяется уравнением (2), в котором используются практические единицы:

$$e_{\text{мВ/м}} = 173 \frac{\sqrt{p_{\text{кВт}}}}{d_{\text{км}}}, \quad (2)$$

где:

- $e_{\text{мВ/м}}$: среднеквадратичное значение напряженности поля (мВ/м);
- $p_{\text{кВт}}$: эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) передатчика в направлении рассматриваемой точки (кВт);
- $d_{\text{км}}$: расстояние от передатчика до рассматриваемой точки (км).

Для антенн, работающих в условиях свободного пространства, волнодвижущую силу можно рассчитать путем перемножения e и d в уравнении (1). Она измеряется в вольтах.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Если волна является эллиптически поляризованной и нелинейной и если составляющие электрического поля вдоль двух ортогональных осей обозначены как e_x и e_y , то левую часть уравнения (1) следует заменить на $\sqrt{e_x^2 + e_y^2}$. e_x и e_y можно рассчитать, только если известно осевое отношение. В случае круговой поляризации e следует заменить на $e\sqrt{2}$.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В том случае если антенны расположены на уровне земли (как правило, в случае относительно низких частот) при вертикальной поляризации, обычно рассматривается излучение только в верхнем полупространстве. Если поверхность земли принимается плоской и идеально проводящей, значение плотности потока мощности для данной излучаемой мощности удваивается по сравнению с антенной в свободном пространстве. (Либо, если рассматривается напряженность поля, значение напряженности поля аналогичным образом увеличивается на 3 дБ.) Это должно учитываться при определении излучаемой мощности (и уже включено в Рекомендацию МСЭ-R P.368 и в Приложение 3 к Рекомендации МСЭ-R P.341).

2.2 Соотношения между характеристиками плоской волны

Существуют также соотношения между характеристиками плоской волны (или волны, которую можно считать плоской) в точке:

$$s = \frac{e^2}{120\pi} = \frac{30p}{120\pi d^2} = p \times \frac{1}{4\pi d^2}, \quad (3)$$

где:

- s : плотность потока мощности (Вт/м²);
- e : среднеквадратичное значение напряженности поля (В/м);
- p : эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) передатчика в направлении рассматриваемой точки (Вт).

2.3 Линии связи пункта с пунктом

Для линии связи пункта с пунктом между изотропными антеннами необходимо учитывать мощность на выходе приемной изотропной антенны p_r в рассматриваемой точке:

$$p_r = s \times a = \frac{p}{4\pi d^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (4)$$

где:

a : эффективная апертура приемной изотропной антенны (м^2).

Ослабление в свободном пространстве между изотропными антеннами, называемое также основными потерями передачи в свободном пространстве (обозначения L_{bf} или A_{bf}), можно рассчитать следующим образом (см. Рекомендацию МСЭ-R P.341):

$$L_{bf} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi d^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad \text{дБ}, \quad (5)$$

где:

L_{bf} : основные потери передачи в свободном пространстве (дБ);

d : расстояние;

λ : длина волны; и

d и λ выражены в одинаковых единицах.

Уравнение (5) можно также записать, используя вместо длины волны частоту:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d \quad \text{дБ}, \quad (6)$$

где:

f : частота (МГц);

d : расстояние (км).

3 Основные потери передачи в свободном пространстве для радиолокационной системы (обозначения L_{br} или A_{br})

Радиолокационные системы представляют собой особый случай, так как потери в сигнале происходят при распространении как от передатчика до цели, так и от цели до приемника. В случае радиолокаторов, использующих общую антенну и для передатчика, и для приемника, основные потери передачи радиолокатора в свободном пространстве L_{br} можно представить следующим образом:

$$L_{br} = 103,4 + 20 \log_{10} f + 40 \log_{10} d - 10 \log_{10} \sigma \quad \text{дБ}, \quad (7)$$

где:

σ : поперечное сечение радиолокационной цели (м^2);

d : расстояние от радиолокатора до цели (км);

f : частота системы (МГц).

Поперечное сечение объекта, являющегося радиолокационной целью, представляет собой отношение общей изотропной эквивалентной рассеиваемой мощности к плотности потока падающей мощности.

4 Формулы перевода

На основе распространения радиоволн в свободном пространстве можно использовать следующие формулы перевода:

напряженность поля при заданной изотропно излучаемой мощности передатчика:

$$E = P_t - 20 \log_{10} d + 74,8; \quad (8)$$

имеющаяся мощность, подводимая посредством сопряженно-согласованной изотропной антенны приемника при заданной напряженности поля:

$$P_r = E - 20 \log_{10} f - 167,2; \quad (9)$$

основные потери передачи в свободном пространстве при заданной изотропно излучаемой мощности передатчика и напряженности поля:

$$L_{bf} = P_t - E + 20 \log_{10} f + 167,2 \quad \text{дБ}; \quad (10)$$

плотность потока мощности при заданной напряженности поля:

$$S = E - 145,8, \quad (11)$$

где:

P_t : изотропно излучаемая мощность передатчика (дБ(Вт));

P_r : имеющаяся мощность, подводимая посредством сопряженно-согласованной изотропной антенны приемника (дБ(Вт));

E : напряженность электрического поля (дБ(мкВ/м));

f : частота (ГГц);

d : протяженность радиотрассы (км);

L_{bf} : основные потери передачи в свободном пространстве (дБ);

S : плотность потока мощности (дБ(Вт/м²)).

Следует заметить, что из уравнений (8) и (10) можно получить уравнение (6).
