

УДК 621.371.3

## Методика расчета энергетического запаса радиолинии «космический аппарат – станция»

**Г. А. Ерохин**, к. т. н., [ru3dlr@mail.ru](mailto:ru3dlr@mail.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. И. Мандель**, [mandel.vlada@gmail.com](mailto:mandel.vlada@gmail.com)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Ю. А. Нестёркин**, [uriy\\_nesterkin@mail.ru](mailto:uriy_nesterkin@mail.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. П. Струков**, [workbox69@gmail.com](mailto:workbox69@gmail.com)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В настоящее время на предприятиях ракетно-космической промышленности используются различные наборы методов расчета энергетического запаса, при этом не всегда учитываются все факторы, влияющие на энергетику радиолинии, вследствие чего возникают трудности при соотнесении одних расчетов с другими, что приводит к необходимости проведения перерасчетов в последующих этапах, результаты которых могут значительно отличаться от полученных ранее.

В статье приводится методика расчета обобщенного энергетического запаса радиолинии передачи информации с космического аппарата на станцию приема. Большая часть методов оценки влияния атмосферы на сигнал содержится в рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ). Предложенная методика включает методы расчета величины потерь, вызванные влиянием окружающей среды, приведенные в рекомендациях МСЭ, которые дополняются методами учета потерь, вызванных наличием ошибок наведения, эффекта Фарадея и расчетом шумовой температуры приемника.

**Ключевые слова:** спутниковая связь, затухание в атмосфере, радиолиния «космический аппарат – станция», энергетический расчет радиолинии

## The Calculation Methodology for the Energetic Reserve of the Radio Link Space Craft–Station

**G. A. Erokhin**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [ru3dlr@mail.ru](mailto:ru3dlr@mail.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**V. I. Mandel**, [mandel.vlada@gmail.com](mailto:mandel.vlada@gmail.com)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**Yu. A. Nesterkin**, [uriy\\_nesterkin@mail.ru](mailto:uriy_nesterkin@mail.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**A. P. Strukov**, [workbox69@gmail.com](mailto:workbox69@gmail.com)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Nowadays different sets of calculation methods for energetic reserve are used at the factories of the rocket and space industry, meanwhile, not all the factors influencing the energetics of a radio link are taken into consideration. This causes difficulties while comparing some calculations with others and requires further recalculations which are different from the previous ones and usually have negative results.

The article given below includes the methodology for a general calculation of the energetic reserve of a radio link transmitting the information from a spacecraft to a receiving station. Most of the methods of evaluating the effect of the atmosphere on the signal can be found in the recommendations of the International Telecommunication Union (ITU). Methods of calculation of the losses caused by the environment, which are kept in the recommendations of the ITU, are complemented by loss accounting methods resulting from the guidance errors, Faraday effect and receiver noise temperature calculation.

**Keywords:** satellite communication, atmospheric attenuation, radio link “space craft–station”, energy calculation of a radio link

## Введение

Разработка космических систем и космических комплексов на всех стадиях жизненного цикла изделия требует проведения расчета энергетического запаса радиолинии. На этапе предпроекта производится предварительный расчет энергетического запаса радиолинии, на этапе эскизного проекта — анализ нескольких вариантов построения аппаратуры с расчетами энергетического запаса радиолинии для каждого из вариантов, на этапе разработки конструкторской документации — уточняющий расчет выбранного варианта и коррекция расчетов по результатам наземной и экспериментальной отработки, на этапе эксплуатации — анализ и подтверждение проведенных расчетов для коррекции и уточнения примененной методики расчетов на основании получаемой статистики. Важно понимать, что наиболее полный расчет с учетом влияния земной поверхности и атмосферы уже на стадии предпроекта позволит в дальнейшем избежать коррекции требований, предъявляемых к бортовой и наземной аппаратурам. В настоящее время на предприятиях ракетно-космической промышленности отсутствует единая методика оценки влияния потерь (атмосферных, поляризационных и др.), возникающих при распространении сигнала. Вышеприведенные обстоятельства обуславливают актуальность поставленной задачи.

Использование частот для систем радиосвязи и вещания строго регламентировано Международным союзом электросвязи и Государственной комиссией по радиочастотам. Требования к увеличению объемов информации, передаваемых с КА, приводят к требованию по увеличению скорости передачи информации, что ведет к увеличению необходимой полосы частот, а это, в свою очередь, с учетом загруженности текущего частотного плана приводит к увеличению значения несущей частоты. Каждый из диапазонов частот обладает своей спецификой набора потерь при распространении сигнала, который необходимо учесть в расчете. Детальных расчетов требуют не только сигналы с заранее известными частотами, такие как ГЛОНАСС, автоматическая идентификационная система АИС (отслеживание судов) и автоматическое зависимое наблюдение-вещание, АЗН-В

(отслеживание воздушных судов), но и вновь разрабатываемые радиолинии — высокоскоростные радиолинии передачи целевой информации и межпутниковые радиолинии.

Оценка ослабления сигнала становится особо актуальной ввиду поиска баланса между снижением мощности радиопередающих устройств и увеличением информативности. Необходимо решить задачу многокритериального выбора параметров радиолинии для передачи информации с заданной скоростью и достоверностью, удовлетворяющей заказчика.

Анализ публикаций позволяет сделать вывод, что в настоящее время нет общепринятой методики оценки влияния потерь (атмосферных, поляризационных и др.), возникающих при распространении сигнала. Наиболее полно вопрос оценки влияния атмосферы на сигнал содержится в рекомендациях Международного союза электросвязи.

Цель настоящей статьи — продемонстрировать и стандартизировать методику расчетов энергетического запаса радиолиний, представляя расчет радиолинии «космический аппарат (КА) – станция».

## 1. Расчет энергетического запаса радиолинии

Для обеспечения передачи информации с требуемой скоростью и заданной вероятностью битовой ошибки необходимо проанализировать физические процессы и провести расчет параметров, влияющих на распространение радиосигнала в естественных радиотрассах. В рамках этой статьи рассматривается случай передачи сигналов по радиолинии «КА–станция».

КА движется в космическом пространстве по заданной орбите, прием сигнала ведется на станции приема, которая может располагаться как непосредственно на поверхности Земли, так и на некоторой высоте над ней. Из параметров движения КА необходимо определить максимальную и минимальную дальности между КА и станцией, а также углы места, под которым КА наблюдается со станции. Расчеты следует проводить для всех возможных граничных случаев — это позволит определить диапазон изменений плотности потока

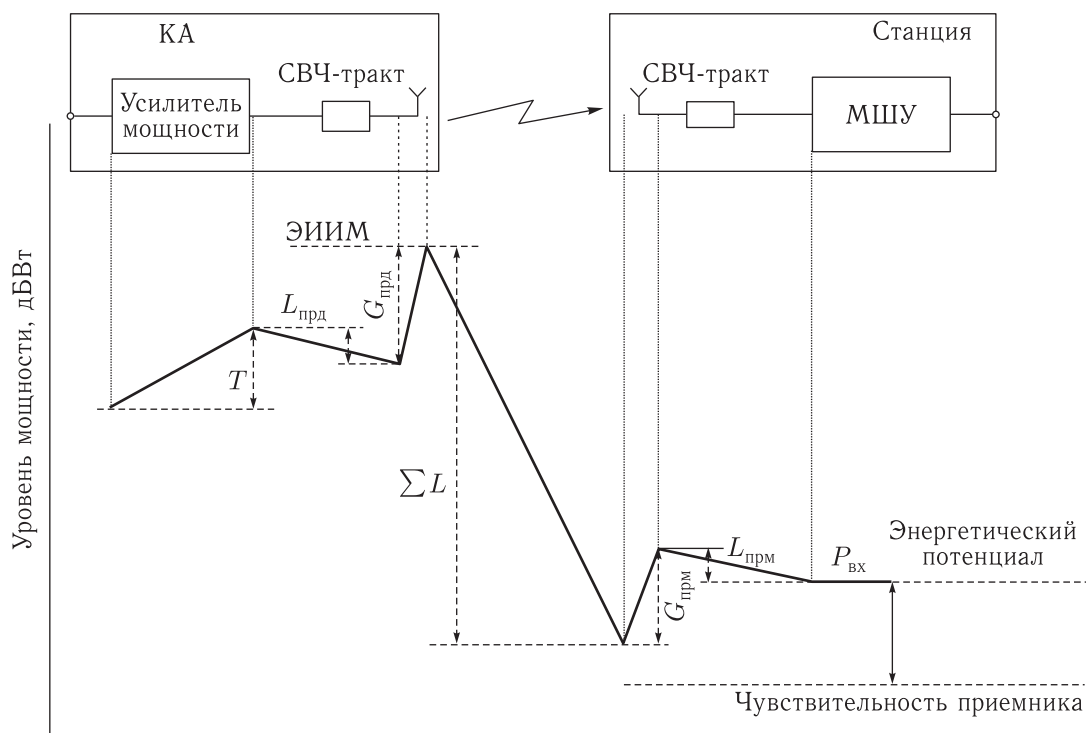


Рисунок. Структурная схема радиолинии «КА–станция»

мощности (ППМ) в створе приемной антенны, формируя требования к динамическому диапазону приемника. При расчете потерь в атмосфере необходимо проанализировать высоту расположения станции над уровнем моря и сделать вывод, оказывает ли влияние атмосфера Земли на параметры радиосигнала.

Возможность приема сигнала и доступность радиолинии определяются положительным значением энергетического запаса, рассчитываемого как разность между энергетическим потенциалом на входе приемного малошумящего усилителя (МШУ) и его чувствительностью. Расчет энергетического потенциала начинается с определения величины эквивалентной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ) КА и условий распространения сигнала. На рисунке приведена структурная схема радиолинии «КА–станция» и графическое представление уровня мощности сигнала.

Передача начинается с КА, ЭИИМ, которая выражается в децибел-ваттах (дБВт) и вычисляется как [1]

$$\text{ЭИИМ} = G_{\text{прд}} + T - L_{\text{прд}} \text{ (дБВт)}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{прд}}$  — коэффициент усиления передающей антенны, выражается в децибелах относительно изотропного усиления, дБи;  $T$  — величина мощности сигнала на выходе усилителя мощности, дБВт;  $L_{\text{прд}}$  — потери в СВЧ-тракте от выхода усилителя мощности до входа антенны, дБ.

По мере распространения сигнала в среде происходит затухание колебаний волн в свободном пространстве, вызванное рассеиванием сигнала по мере удаления от передатчика. Сигнал поступает на приемную антенну станции с коэффициентом усиления  $G_{\text{прм}}$ , связанную с приемником волноводным трактом с потерями  $L_{\text{прм}}$ . Величина мощности сигнала  $P_{\text{вх}}$  на входе МШУ рассчитывается по формуле

$$P_{\text{вх}} = \text{ЭИИМ} - \sum L + G_{\text{прм}} - L_{\text{прм}} \text{ (дБВт)}, \quad (2)$$

где  $\sum L$  — величина суммарных потерь;  $G_{\text{прм}}$  — коэффициент усиления приемной антенны, выражается в децибелах относительно изотропного усиления, дБи;  $L_{\text{прм}}$  — потери в СВЧ-тракте от выхода антенны до входа МШУ (все — дБ).

Сравнение мощности сигнала на входе МШУ с чувствительностью приемника  $R_x$  определяет

искомую величину энергетического запаса и доступность радиолинии:

$$Z = P_{\text{вх}} - R_{\text{x}} \text{ (дБВт)}. \quad (3)$$

Чувствительность определяет минимальный уровень мощности сигнала на входе приемника, при которой обеспечивается прием информации с требуемой скоростью и заданной вероятностью битовой ошибки. В случае когда мощность сигнала на входе МШУ меньше чувствительности приемника ( $Z < 0$ ), обеспечить прием сигнала с требуемой достоверностью не представляется возможным. Если уровень мощности сигнала на входе МШУ больше чувствительности ( $Z > 0$ ), то прием обеспечивается с требуемой достоверностью.

Чувствительность приемника рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{x}} = k + T_{\text{экв}} + B + \frac{C}{N} \text{ (дБВт)}, \quad (4)$$

где  $k = -228,6 \cdot 10^{-23}$  (дБВт/КГц) — постоянная Больцмана;  $T_{\text{экв}}$  — эквивалентная шумовая температура системы, выражается в децибелах относительно величины 1 К, дБК;  $B$  — ширина полосы сигнала, выражается в децибелах относительно величины 1 Гц, дБГц;  $C/N$  — требуемое отношение сигнал/шум, дБ.

Формула (4) показывает связь чувствительности и требуемого отношения сигнал/шум на входе приемника. Как пример: обеспечение меньшей величины отношения сигнал/шум на входе МШУ приводит к ужесточению требований к приемному устройству (снижение потерь в СВЧ-тракте, уменьшение коэффициента шума приемного тракта и др.).

Отношение мощности сигнала к мощности шума, пересчитанное ко входу МШУ, определяется выражением [1–3]

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} + R - B \text{ (дБ)}, \quad (5)$$

где  $E_b/N_0$  — требуемое отношение энергии информационного бита к односторонней спектральной плотности мощности шума для заданной достоверности приема и скорости передачи информации, дБ;  $R$  — скорость передачи информации, которая выражается в децибелах относительно величины 1 бит/с, дБбит/с.

Подставим (5) в (4):

$$R_{\text{x}} = kT_{\text{экв}} + R + \frac{E_b}{N_0} \text{ (дБВт)}. \quad (6)$$

## 2. Методика расчета эквивалентной шумовой температуры системы

При расчете величины энергетического запаса радиолинии важно определить общую мощность шумов, которые создаются на входе приемного устройства различными источниками — эквивалентную шумовую температуру. Эквивалентная шумовая температура системы рассчитывается по формуле [11]

$$T_{\text{экв}} = T_{\text{А}} \cdot L_{\text{прм}} + 290 \cdot (1 - L_{\text{прм}}) + (F - 1) \cdot 290 \text{ (К)}, \quad (7)$$

где  $T_{\text{А}}$  — шумовая температура антенны, К;  $F$  — коэффициент шума приемника МШУ;  $L_{\text{прм}}$  — потери в СВЧ-тракте от выхода антенны до выхода МШУ.

Эквивалентная шумовая температура для бортовой антенны может быть представлена в виде составляющих

$$T_{\text{ант}} = T_{\text{я.атм}} + T_{\text{я.з}} + 2cT_{\text{я.косм}} \text{ (К)}, \quad (8)$$

где  $T_{\text{я.атм}}$  — шумовая температура атмосферы, К;  $T_{\text{я.з}}$  — яркостная температура Земли, К;  $T_{\text{я.косм}}$  — яркостная температура протяженных космических источников, К;  $c$  — коэффициент, учитывающий усредненный уровень боковых и задних лепестков диаграммы направленности антенны.

Эквивалентная шумовая температура для земной антенны может быть представлена в виде составляющих:

$$T_{\text{ант}} = T_{\text{я.косм}} + T_{\text{я.атм}} + cT_{\text{з}} + T_{\text{об}} \text{ (К)}, \quad (9)$$

$T_{\text{об}}$  — шумовая температура за счет влияния обтекателя антенны, К;  $T_{\text{з}}$  — шумовая температура излучения Земли, К.

Радиоизлучение земной атмосферы имеет тепловой характер и в полной мере обусловлено поглощением сигналов в атмосфере. В силу термодинамического равновесия атмосфера излучает такое же количество энергии на данной частоте,

которое поглощает. Шумовая температура атмосферы определяется по формуле

$$T_{\text{я.атм}} = T_{\text{а.ср}} (1 - 10^{(-A_r - A_e - A_g)/10}) \text{ (K)}, \quad (10)$$

где  $T_{\text{а.ср}}$  — средняя термодинамическая температура стандартной атмосферы;  $A_r$  — ослабление за счет гидрометеоров, дБ;  $A_g$  — ослабление в атмосферных газах, дБ;  $A_e$  — ослабление из-за облачности, дБ.

Значение средней термодинамической температуры стандартной атмосферы приводится в [4]. Подробный расчет потерь в атмосфере приводится в п. 3.4.

Шумы космического происхождения определяются в основном излучениями Галактики, Солнца и Луны. При этом усредненная температура шумов Галактики пренебрежимо мала в диапазоне частот 6/4 ГГц и выше и не превышает нескольких градусов Кельвина на частотах более 2 ГГц при любых углах места 10 град. В то же время излучение Солнца может полностью нарушить связь при попадании в главный лепесток диаграммы направленности антенны. Излучение Луны оказывает еще меньшее влияние, чем шумы Галактики, так как ее шумовая температура на несколько порядков ниже шумовой температуры Солнца.

Коэффициент, учитывающий интегральный уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны, определяется по формуле

$$c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_0^{\Omega_{\text{бок}i}} G_{\text{бок}i}(\alpha, \theta) d\Omega \bigg/ \int_0^{\Omega_{\text{гл}}} G(\alpha, \theta) d\Omega, \quad (11)$$

где  $G_{\text{бок}i}$  — коэффициент усиления антенны в пределах задних и боковых лепестков;  $G$  — коэффициент усиления антенны в пределах главного лепестка.

Составляющая шумов антенны от теплового излучения земли  $T_3$  при углах наклона антенны от 5–7° до 90° обусловлена его приемом боковыми и задними лепестками. За счет боковых лепестков увеличение температуры шумов антенны земной станции можно приближенно оценить по формуле:

$$cT_3 = 23 + 0,2(90^\circ - \theta) \text{ (K)}, \quad (12)$$

где  $\theta$  — угол места приемной антенны, град.

Для бортовой антенны следует принимать  $T_{\text{я.з}} = 290 \text{ K}$ .

В некоторых случаях антенны земных станций укрывают от воздействия осадков радиопрозрачным обтекателем. Потери сигнала и соответствующий прирост шумов обычно невелики и могут практически не учитываться. Но во время интенсивных дождей на поверхности обтекателя образуется водяная пленка, которая является причиной заметного поглощения сигнала и возникновения вторичных шумов.

### 3. Потери радиолинии

При распространении радиоволн по естественным радиотрассам на характеристики радиосигнала влияет окружающая среда. Помимо потерь в свободном пространстве, радиоволна испытывает дополнительные потери: потери при распространении через атмосферу, потери из-за ошибки наведения антенны, поляризационные потери, потери на обтекателе антенны и др.

Общие потери  $\sum L$  в радиолинии вычисляются по формуле

$$\sum L = L_{\text{пр}} + At + L_{\text{пол}} + L_{\text{навпрд}} + L_{\text{навпрм}} + L_{\text{пп}} \text{ (дБ)}, \quad (13)$$

где  $L_{\text{пр}}$  — потери в свободном пространстве,

$At$  — общее суммарное ослабление радиосигналов в атмосфере,

$L_{\text{пол}}$  — поляризационные потери,

$L_{\text{навпрд}}$ ,  $L_{\text{навпрм}}$  — потери, вызванные ошибками наведения передающей и приемной антенн, дБ,

$L_{\text{пп}}$  — прочие потери, вызванные межсимвольной интерференцией, помехами соседнего канала, потерями, связанными с ограничением полосы (так как все системы используют в передатчике фильтры для передачи энергии в ограниченной или выделенной полосах, подобная фильтрация уменьшает общее количество передаваемой энергии, что приводит к ослаблению) и т. д., дБ.

Далее приводится расчет всех компонентов, входящих в формулу (12).



### 3.1. Потери в свободном пространстве

Потери в свободном пространстве рассчитываются согласно формуле (14) [1–3]:

$$L_{\text{пр}} = \left( 4\pi \cdot \frac{d_{\text{прд-прм}}}{\lambda} \right)^2, \quad (14)$$

где  $d_{\text{прд-прм}}$  — дальность радиосвязи, м;  $\lambda$  — длина волны, м.

### 3.2. Потери из-за ошибок наведения

Потери, вызванные ошибкой наведения, обусловлены неточностью наведения антенны и учитываются независимо как для передающей, так и для приемной антенн. Коэффициент усиления антенны рассчитывается в максимуме диаграммы направленности и уменьшается с отступом от него в соответствии с ее характеристикой. Отступ, который определяет снижение коэффициента усиления, — ошибка угла наведения.

Потери, вызванные ошибкой наведения, рассчитываются по формуле

$$L_{\text{нав}} = 12 \cdot \left( \frac{APE}{BW} \right)^2 \text{ (дБ)}, \quad (15)$$

где  $APE$  — ошибка угла наведения, град;  $BW$  — ширина диаграммы направленности антенны по уровню  $-3$  дБ, град.

### 3.3. Поляризационные потери

Поляризационные потери возникают вследствие того, что поляризация приходящей волны отличается от поляризации приемной антенны. При рассмотрении поляризационных потерь следует учитывать эффект Фарадея — вращение плоскости поляризации волны при прохождении через ионосферу. На частотах выше 2 ГГц влияние эффекта незначительно.

Поляризационные потери рассчитываются по формуле [3]:

$$L_{\text{пол}} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4e_{\text{прд}} \cdot e_{\text{прм}}}{(1 + e_{\text{прд}}^2)(1 + e_{\text{прм}}^2)} + \frac{(1 - e_{\text{прд}}^2)(1 - e_{\text{прм}}^2) \cos(2 \cdot \text{pol})}{(1 + e_{\text{прд}}^2)(1 + e_{\text{прм}}^2)} \right] \right) \text{ (дБ)}, \quad (16)$$

где  $e_{\text{прд}}$ ,  $e_{\text{прм}}$  — коэффициент эллиптичности поляризации передающей и приемной антенн (отношение малой полуоси эллипса к большой),  $\text{pol}$  — вид поляризации, рад.

### 3.4. Ослабление в атмосфере

При распространении радиоволн в земной атмосфере происходит ослабление напряженности поля за счет поглощения в газах, рассеяния и поглощения в гидрометеорах (дожде, граде, снеге, тумане, облаках), а также за счет поглощения в ионизированных областях. Основное поглощение радиоволн вызывает кислород и водяной пар.

При рассмотрении влияния тропосферы на распространение радиоволн необходимо учитывать основные факторы: рефракцию радиоволн, переизлучение гидрометеорами тропосферы, ослабление газами и гидрометеорами и деполяризацию.

Также необходимо учитывать такое явление, как поглощение в ионосфере. Оно обусловлено столкновениями свободных заряженных частиц с нейтральными молекулами и атомами. В процессе таких столкновений энергия, приобретенная заряженными частицами за счет возникновения упорядоченной скорости при воздействии электромагнитного поля, передается нейтральным молекулам и атомам, то есть имеют место тепловые потери. Поглощение в ионосфере существенно уменьшается при увеличении частоты  $f$  (обратно пропорционально квадрату частоты) из-за инерционности заряженных частиц и, следовательно, меньшей энергии, отнимаемой от воздействующего поля. Оно становится пренебрежимо малым на частотах выше 100–150 МГц, то есть его можно не учитывать в тех диапазонах частот, которые применяются в современных системах связи и вещания с использованием космических аппаратов.

Все перечисленные явления имеют зависимость от частоты, географического положения и угла места. Зависимость явлений, возникающих в атмосфере, от частоты содержится в табл. 1. В левом столбце приводится тип ослабления, в правом — зависимость данного явления от различных факторов влияния.

Таблица 1. Явления ослабления в атмосфере

Вид ослабления	Фактор влияния
Ослабление из-за облачности $A_c$ , дБ [5]	На частотах ниже 10 ГГц им обычно можно пренебречь. На частотах выше 10 ГГц по мере их увеличения ослабление становится все более важным фактором, особенно для малых углов места
Поглощение, рассеяние и депolarизация за счет гидрометеоров (капель воды и частиц льда в осадках) $A_r$ , дБ [4, 6]	Эти явления особенно заметны на частотах выше 10 ГГц
Ослабление радиоволн в атмосферных газах на наклонных трассах $A_g$ , дБ [7]	Диапазон частот 1–1000 ГГц
Ослабление из-за тропосферных мерцаний $A_s$ , дБ [4, 8, 9]	При низких углах места ( $\leq 10^\circ$ ) и на частотах выше приблизительно 10 ГГц тропосферные мерцания могут иногда вызвать серьезное ухудшение рабочих характеристик. При очень малых углах места ( $\leq 4^\circ$ для трасс, проходящих над сушей, и $\leq 5^\circ$ для трасс, проходящих над водой или вдоль побережья) замирания, вызванные многолучевым распространением, могут быть особенно сильными. В некоторых местах ионосферное мерцание может играть важную роль на частотах ниже приблизительно 6 ГГц

Общее суммарное ослабление радиосигналов в атмосфере вычисляется по формуле [4]:

$$At = A_g + \sqrt{(A_r + A_c)^2 + A_s^2} \text{ (дБ)}. \quad (17)$$

### 3.4.1. Ослабление в облаках

Величину ослабления вследствие влияния облачности на наклонных трассах рассчитаем по следующей формуле [5]:

$$A_c = \frac{L \cdot K_l}{\sin(\theta)} \text{ (дБ)}, \quad (18)$$

где  $\theta$  — угол места,  $L$  — статистика общего столбчатого объема жидкой воды над Россией, берется из Р.840-5,  $K_l$  — коэффициент погонного ослабления, подробный расчет которого приведен в [5].

### 3.4.2. Ослабления в дожде

Ослабление сигнала в гидрометеорах вызвано, во-первых, рассеянием электромагнитной энергии частицами. Под влиянием воздействующего поля каждая частица становится вторичным излучателем, рассеивающим электромагнитную энергию в различных направлениях, в результате чего уменьшается доля энергии, распространяющейся на точку приема. Вторая причина ослабления

напряженности поля в гидрометеорах — нерезонансное поглощение в частицах, также зависящее от их количества, электрических свойств и частоты. Это явление зависит от частоты, угла места и интенсивности осадков.

Влияние дождя вычисляется следующим образом [4]:

$$A_r = A_{0,01} \times (p/0,01)^{-(0,655+0,033 \ln(p)-0,045 \ln(A_{0,01})-\beta(1-p) \sin \theta)} \text{ (дБ)}, \quad (19)$$

где  $A_{0,01}$  — прогнозируемое значение ослабления, дБ;  $p$  — процент времени среднего года, %.

Процент времени среднего года, при котором проводится расчет потерь в атмосфере, например 0,01 %, означает, что в течение 99,99 % времени года ослабление на радиолинии не будет превышать рассчитанную величину и доступность радиолинии будет составлять 99,99 %.

Прогнозируемое значение ослабления  $A_{0,01}$ , превышаемое в течение 0,01 % времени среднего года, определяется по следующей формуле:

$$A_{0,01} = \gamma_r \cdot L_e \text{ (дБ)}, \quad (20)$$

где  $L_e$  — эффективная длина трассы, км;  $\gamma_r$  — погонное ослабление, подробный расчет которого приведен в [4], дБ/км.

Эффективная длина трассы рассчитывается по следующей формуле:

$$L_e = L_r \cdot \nu_{0,01} \text{ (км)}, \quad (21)$$

где  $L_r$  — вертикальная проекция длины наклонной трассы, км;  $\nu_{0,01}$  — коэффициент подстройки по вертикали для 0,01 % времени.

Подробный расчет коэффициента подстройки по вертикали,  $\nu_{0,01}$  для 0,01 % времени, коэффициента ослабления по горизонтали и остальных параметров приведены в [4].

Если высота станции над уровнем моря выше высоты слоя дождя, то прогнозируемое ослабление в дожде для любого процента времени равно нулю и дальнейших вычислений не требуется. Расчет высоты слоя дождя приводятся в [10].

Оценка ослабления, превышаемого для других процентов времени среднего года в диапазоне от 0,001 % до 5 %, определяется пересчетом по значению ослабления 0,01 % времени среднего года.

### 3.4.3. Ослабления в атмосферных газах

Ослабление сигнала вызвано явлением поглощения в атмосферных газах и зависит от частоты, угла места, высоты над уровнем моря и плотности водяных паров.

Ослабление на трассе для систем связи можно рассчитать, разделив атмосферу на горизонтальные слои, определяющие профиль изменения таких параметров, как давление, температура и влажность вдоль трассы.

Полные потери в атмосферных газах вычисляются по формуле [7]

$$A_g = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_r \text{ (дБ)}, \quad (22)$$

где  $a_n$  — длина участка трассы в слое, км.

Погонное затухание  $\gamma_r$  рассчитывается путем суммирования спектральных линий по формуле:

$$\gamma_r = 0,1820 f_{\text{вниз}} (N''_{\text{кислород}}(f_{\text{вниз}}) + N''_{\text{вод.пар}}(f_{\text{вниз}})) \text{ (дБ/км)}, \quad (23)$$

где  $N''_{\text{кислород}}(f_{\text{вниз}})$ ,  $N''_{\text{вод.пар}}(f_{\text{вниз}})$  — мнимая часть частотно-зависимой комплексной преломляющей способности, расчет которых приведен в [7].

Для расчета общего затухания на спутниковой линии необходимо знать не только погонное затухание в каждой точке линии, но и длину трассы, на которой возникает погонное затухание такой величины. Чтобы определить эту длину, необходимо учесть искривление луча, распространяющегося над Землей.

### 3.4.4. Ослабление из-за тропосферных мерцаний

Величина тропосферных мерцаний зависит от величины и структуры изменений индекса рефракции, увеличиваясь с возрастанием частоты и длины трассы, проходящей через среду распространения, и уменьшаясь по мере сужения диаграммы направленности антенны за счет усреднения ее апертуры.

Глубина замираний рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$A_s = a(p) \cdot \sigma \text{ (дБ)}, \quad (24)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение сигнала для рассматриваемого периода и трассы распространения, дБ;  $a(p)$  — коэффициент процента времени.

Подробный расчет составляющих, входящих в формулу (24), представлен в [4, 8, 9].

## 3.5. Результаты расчета

Исходные данные и результаты расчета могут быть представлены в виде таблицы, шаблон которой приведен ниже (табл. 2).

## Заключение

В статье представлена методика расчета энергетического запаса в радиолинии точка-точка («КА-Станция»), перечислены все факторы, оказывающие влияние на величину запаса в радиолинии, показано, из каких составляющих складывается величина потерь в атмосфере Земли, и представлены аналитические выражения для проведения соответствующих расчетов, приведены ссылки на рекомендации МСЭ. Также приведены формулы расчета эквивалентной шумовой температуры приемника. Таким образом устранены пробелы в расчетах, возникающие из-за неполного учета



Таблица 2

Параметр	Обязательно/Желательно для расчета
Информационная скорость передачи данных, Мбит/с	Обязательно
Полоса частот, МГц	Желательно
Требуемое отношение $E_b/N_{0\text{треб}}$ , дБ	Обязательно
Частота, ГГц	Обязательно
<b>ЭИИМ передатчика, дБВт</b>	Обязательно
Коэффициент усиления ПРД антенны, дБ	Желательно
Потери в СВЧ-тракте, дБ	Желательно
Мощность передатчика, Вт	Желательно
<b>Потери наведения ПРД антенны, дБ</b>	Обязательно
Ширина ДН ПРД антенны, град	Желательно
Ошибка угла наведения, град	Желательно
<b>Потери в свободном пространстве, дБ</b>	Обязательно
Дальность связи, км	Желательно
Угол места, град	Обязательно
Высота ПРМ над уровнем моря, км	Обязательно
Широта ПРМ, град	Обязательно
Коэффициент процента времени, %	Обязательно
Интенсивность осадков, км	Обязательно
<b>Потери в атмосфере, дБ</b>	Обязательно
Ослабление в дожде, дБ	Обязательно
Ослабление в атмосферных газах, дБ	Обязательно
Ослабление в облаках, дБ	Обязательно
Ослабление из-за мерцаний, дБ	Обязательно
Диаметр ПРМ антенны, м	Обязательно
Коэффициент использования ПРМ антенны	Обязательно
<b>Потери наведения ПРМ антенны, дБ</b>	Обязательно
Ширина ДН ПРМ антенны, град	Желательно
Ошибка угла наведения, град	Желательно
<b>Потери на обтекателе ПРМ антенны, дБ</b>	Обязательно
<b>Добротность (G/T)</b>	Обязательно
Коэффициент усиления ПРМ антенны, дБ	Желательно
Шумовая температура системы, К	Желательно
Потери в СВЧ-тракте, дБ	Желательно
<b>Запас, дБ</b>	Обязательно

составляющих, что приводит к завышению результатов, последующим исправлениям и корректировкам.

Методика будет полезна специалистам, занимающимся расчетами радиолиний, а ее использование на предприятиях ракетно-космической промышленности позволит легко соотносить расчеты и проводить экспертные оценки по единым правилам.

## Список литературы

1. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. *Марков Г. Т., Сазонов Д. М.* Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М: Энергия, 1975. 523 с.
3. *Спутниковая связь и вещание / Под ред. Л. Я. Кантора.* 2-е изд. М: Радио и связь, 1988.
4. ITU-R Recommendations. P.618-13. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems, Geneva, 2017. 27 с.
5. ITU-R Recommendations. P.840-5 Attenuation due to clouds and fog, Geneva, 2017. 8 с.
6. ITU-R Recommendations. P.838-3 Модель погонного ослабления в дожде, используемые в методах прогнозирования, Женева, 2005. 9 с.
7. ITU-R Recommendations. P.676-11 Attenuation by atmospheric gases, Geneva, 2016. 23 с.
8. ITU-R Recommendations. P.835-6 Reference standard atmospheres, Geneva, 2017.
9. ITU-R Recommendations. P.453-13 The radio refractive index: its formula and refractivity data, Geneva, 2017
10. ITU-R Recommendations. P.839-4 Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования, (1992-1997-1999-2001-2013). 1 с.
11. *Сомов А. М., Корнев С. Ф.* Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов / Под ред. А. М. Сомова. М.: Горячая линия–Телеком, 2012. 244 с.