

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SA.1805

**Технические и эксплуатационные характеристики систем электросвязи,
работающих в направлении космос-космос на частотах
около 354 ТГц* и 366 ТГц****

(Вопрос МСЭ-R 235/7)

(2007)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации определяются технические параметры (частоты, наплавления линий, характеристики сигналов и данных, параметры антенн и т. д.) и эксплуатационные характеристики систем электросвязи, работающих в направлении космос-космос на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, которые могли бы использоваться в исследованиях совместного использования частот.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что планируются линии электросвязи для использования в некоторых спутниковых системах для межорбитальной электросвязи на частотах в районе 354 ТГц и 366 ТГц;
- b) что, используя последние технологические разработки, астрономы прилагают все усилия, чтобы совместно разработать телескопы и производить наблюдения в данном сегменте спектра;
- c) что данный сегмент спектра также используется и для других наземных и космических служб;
- d) что данный сегмент спектра также используется в научных и промышленных целях, помимо электросвязи,

рекомендует,

1 что при проведении исследований совместного использования частот спутниками службы космических исследований, работающими в направлении космос-космос на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, должны учитываться технические и эксплуатационные параметры, представленные в Приложении 1.

Приложение 1**1 Введение**

В условиях возрастающей потребности в применении электромагнитного спектра и достижений современных технологий все большее значение придается использованию частот выше 3000 ГГц для электросвязи в свободном космическом пространстве. Системы электросвязи в свободном космическом пространстве на частотах выше 3000 ГГц могут поддерживать более высокие скорости передачи данных при меньшей массе, чем традиционные радиочастотные системы, а также отвечают всем требованиям к усилению и направленности лучей, используемых в применениях в направлении космос-космос.

* 1 ТГц = 1000 ГГц.

** Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 1-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

1.1 Анализ частот

В последнее время особый интерес для линий электросвязи в свободном космическом пространстве на частотах выше 3000 ГГц представляют частоты 200, 283, 311 и 353 ТГц, соответствующие длины волн которых приблизительно равны 1,5; 1,06; 0,965 и 0,850 мкм. Данные частоты являются такими же, как частоты, которые широко используются для электросвязи в оптическом волокне. В межорбитальной электросвязи большое внимание уделяется использованию полупроводниковых лазеров высокой мощности, работающих на длине волны 0,850 мкм, а также лучей полупроводниковых лазеров, усиленных волоконно-оптическими усилителями, легированными эрбием (Er) (EDFA), на длине волны 1,5 мкм. Система на полупроводниковых лазерах, работающая на длине волны около 0,85 мкм, превосходит систему на EDFA по надежности и потреблению энергии для применений с относительно низкой скоростью передачи данных, для которых не требуется высокая мощность передатчика.

1.2 Основные параметры миссии

Технические параметры, пригодные для анализа помех, должны основываться на общих параметрах межорбитальных линий электросвязи в околоземном пространстве. Поэтому длины линий будут составлять от единиц до нескольких сот тысяч километров. Основные технические параметры межорбитальной линии электросвязи в околоземном пространстве на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Технические параметры эталонной межорбитальной системы электросвязи, работающей на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц в направлении космос-космос

Параметр	Прямая линия	Обратная линия
Мощность передатчика (мВт)	10	40
Апертура передатчика (см)	25	26
Частота передатчика (длина волны) (ТГц)	Связь: 366 (0,819 мкм) Радиомаяк: 374 (0,801 мкм)	354 (0,847 мкм)
Модуляция	2PPM	NRZ
Точность наведения (мкрад)	$\pm 2,6 (3\sigma)$	
Дальность действия в свободном космическом (км)	до 40 000	
Скорость передачи данных (Мбит/с)	2,048	493,724
Апертура приемника (см)	26	25
Тип детектора	детектор APD	детектор APD

APD: лавинный фотодиод

NRZ: без возврата к нулю

PPM: частей на миллион

2 Анализ линии связи

Межорбитальные линии связи устанавливаются между спутником на геосинхронной околоземной орбите (ГСО) и спутником на низкой околоземной орбите (LEO) в направлении космос-космос и работают на частотах около 366 ТГц для прямой линии и 354 ТГц для обратной линии. На частоте 374 ТГц излучается сигнал радиомаяка, предназначенный для оказания помощи при наведении и слежении телескопа.

2.1 Показатель качества линии

Как и для системы, работающей в направлении космос-космос в традиционном радиочастотном спектре, показатель качества линии на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц измеряется в показателях скорости передачи данных и коэффициента ошибок по битам (КОБ). Показатель качества вычисляется как функция мощности, качества телескопа, параметров распространения, шума и чувствительности приемника. Каждый из данных параметров является функцией дополнительных переменных.

2.1.2 КОБ

Для сохранения кадров данных КОБ не должен быть менее чем 10^{-6} после исправления ошибок. На линии должно сохраняться 99% кадров данных.

2.1.3 Требования к энергетическому запасу линии связи

Для межспутниковых линий, работающих на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, обычные требования к энергетическому запасу линии связи составляют от 1 до 3 дБ.

2.2 Модуляция

На обратной линии, работающей на частоте около 354 ТГц, используется метод NRZ. На прямой линии, работающей на частоте около 366 ТГц, используется 2PPM. Данный метод модуляции дает возможность прямого детектирования в приемнике, вместо того чтобы использовать когерентные приемники.

2.3 Принятый сигнал

Основной метод для вычисления уровня сигнала на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, принимаемого станцией в направлении космос-космос, точно такой же, как и метод вычисления, использующийся в традиционных радиочастотных системах.

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_S \quad \text{дБВт}, \quad (1)$$

где:

- P_S : мощность принятого сигнала (дБВт)
- P_t : средняя выходная мощность лазера (дБВт)
- G_t : коэффициент усиления антенны передатчика (дБ)
- G_r : коэффициент усиления антенны приемника (дБ)
- L_t : потери передатчика (дБ)
- L_r : потери приемника (дБ)
- L_p : потери из-за неточности наведения (дБ)
- L_S : потери в свободном пространстве (дБ).

2.4 Потери в линии

- L_t , включающие эффекты поглощения, потери на рассеяние, потери на отражение в оптической системе передатчика;
- L_r , включающие эффекты поглощения, потери на рассеяние и потери на отражение в оптической системе приемника;
- L_p , включающие эффекты вибрации антенны или космического аппарата, а также неточное позиционирование передающей антенны;
- L_S , возникающие в связи с физическим разнесением передатчика и приемника.

Значения каждого источника потерь варьируются в зависимости от конструкции оборудования, изношенности оборудования, требований миссии и этапа миссии. В таблице 2 представлены предложенные значения потерь, которые должны использоваться при общем анализе помех.

ТАБЛИЦА 2

Потери в линии для эталонной межорбитальной системы электросвязи, работающей на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц в направлении космос-космос

Механизм потерь	Типовое значение
Потери передатчика, L_t	0,63 (= -2 дБ)
Потери приемника, L_r	0,5 (= -3 дБ)
Потери позиционирования, L_p	0,5 (= -3 дБ)

Потери в свободном пространстве L_s на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц вычисляются так же, как и в традиционных радиочастотных системах:

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2, \quad (2)$$

где

R : расстояние между передатчиком и приемником (м)

λ : длина волны (м)

f : оптическая частота (Гц)

c : скорость света (м/с).

2.5 Параметры передачи и приема телескопа

На линиях электросвязи, работающих на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, в качестве передающих и приемных антенн используются телескопы. Диаграммы направленности антенн передатчика и приемника тоже отличаются, поскольку оптика передатчика обычно освещается лучом с гауссовым распределением, тогда как оптика приемника имеет планарный детектор. Огибающие диаграмм направленности передающей и приемной антенн, работающих на частотах около 354 и 366 ТГц, представлены в Приложении 2 Рекомендации МСЭ-R SA.1742. Диаграмма направленности эталонной антенны для оптических систем, работающих в направлении космос-Земля на частоте 283 ТГц, представлена в Рекомендации МСЭ-R SA.1742. Данная диаграмма направленности также применима к системам, работающим в направлении космос-космос на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц.

2.5.1 Диаметр

В целях анализа помех диаметр оптической антенны должен быть принят равным 26/25 см. Апертура либо не затенена, либо имеет затенение 5 см.

2.5.2 Диаграмма направленности передающей антенны

В передатчике используется телескоп, на который подается луч лазера. Такие лазеры обычно работают только на самой низкой волне резонатора ТЕМ₀₀, в результате луч имеет гауссово распределение энергии с максимальной интенсивностью на оси передачи. Диаграмма луча составляется таким образом, чтобы с уменьшением его интенсивности по амплитуде при угловом разнесении от оси передачи, терялось лишь несколько процентов мощности луча. В качестве двух эталонных точек выступают углы, при которых амплитуда луча опускается либо до 37%, либо до 13% от амплитуды на оси. Данные точки называются точками 1/e и 1/e², соответственно, и на них часто делается ссылка при определении характеристик диаграмм излучаемой энергии лазера.

Полный угол ширины луча в точке $1/e^2$ приближенно выражается как:

$$\theta_{1/e^2} = \frac{4\lambda}{\pi D} \quad \text{рад}, \quad (6)$$

где:

θ_{1/e^2} : угловая ширина луча в точке $1/e^2$ (рад)

D : диаметр апертуры (м).

В случае с гауссовым лучом на частоте 354 ТГц, передаваемым с апертуры диаметром 26 см, ширина луча в точке $1/e^2$ составляет приблизительно $4,1 \times 10^{-6}$ рад.

Для передающего терминала станции могут быть использованы следующие уравнения для вычисления диаграммы направленности в дальней зоне лазера телескопа, на который подается гауссова планарная волна. При использовании данных уравнений сделаны следующие основные предположения:

- лазерный источник характеризуется только одномодовым излучением с гауссовым распределением;
- диаграммы направленности антенны измеряются в поле дальней зоны; и
- апертура является круговой.

Диаграмма направленности передающего телескопа с радиусом a , на который подается гауссова планарная волна, имеющая радиус суженной части ω , где ω – это расстояние между центральной осью оптической системы и точкой интенсивности $1/e^2$, и имеющая центральное затенение с радиусом b , представлена в уравнении (4), ниже. Член G_0 – это верхний предел для усиления антенны, который вычисляется для равномерно освещенной незатененной круговой апертуры. Второй член, $g_t(\alpha, \gamma, X)$ – показатель эффективности усиления, который учитывает затенение, усечение, интенсивность при отклонении от оси и эффекты дефокусировки.

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 g_t(\alpha, \gamma, X), \quad (4)$$

где:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2 \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (7)$$

A : зона апертуры телескопа (м^2)

a : радиус зеркала телескопа (м)

b : радиус второго зеркала (м)

g_t : эффективность усиления

J_0 : функция Бесселя первого рода нулевого порядка

α : отношение a/ω

γ : коэффициент затенения

u : переменная интегрирования

$$X: \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot a \cdot \sin(\theta)$$

θ : угол отклонения от оптической оси (рад).

Для осевого направления $X = 0$ и показатель эффективности усиления в уравнении (6) становится равным:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right]. \quad (8)$$

Тогда максимальное усиление главного луча в осевом направлении в уравнении (4) становится равным:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right]. \quad (9)$$

Любое затенение (b) сокращает усиление главного луча, заполняет нули и увеличивает боковые лепестки.

2.5.3 Диаграмма направленности приемной антенны

Размер зоны видимости определяется физическим размером детектора и фокусным расстоянием телескопа. Его можно определить с помощью следующего уравнения:

$$\varphi = \frac{d}{F}, \quad (10)$$

где:

- φ : зона видимости детектора (рад)
- d : диаметр детектора (обычно от 10^{-4} до 10^{-3}) (м)
- F : фокусное расстояние телескопа (м).

Диаграмма приемной антенны обычно согласуется с детектором. Детектор изолирован от нежелательной энергии с использованием полевых диафрагм и освещается только частью главного луча в пределах φ рад от оси главного луча. Поэтому нежелательная энергия, принимаемая боковыми лепестками диаграммы приемной антенны, не поступает в детектор и может не учитываться при анализе помех.

Предполагается, что апертура приемника находится в поле дальней зоны передающей антенны, и принятая энергия является планарной волной. Приемная система может использовать общие или отдельные от передающей системы апертуры. Ширина луча апертуры приемника также обычно измеряется в показателях относительно точки $1/e^2$.

Максимальное осевое усиление приемной антенны, G_R , задается уравнением:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{дБи}, \quad (11)$$

где:

- A : зона апертуры телескопа (м^2)
- λ : длина волны (м)
- δ : потери, вызванные выходом энергии за пределы границы детектора (дБ)

и

$$\gamma = \frac{b}{a}, \quad (12)$$

где:

a: радиус зеркала телескопа (м)*b*: радиус второго зеркала (м).

Усиление, рассчитываемое из уравнения (11), показывает количество энергии, попадающей на детектор. Член G_R предполагает, что приемная антенна расположена в поле дальней зоны передатчика, а апертура и детектор являются круглыми. Первый член в уравнении (11) представляет собой классическое усиление антенны, достигаемое идеальной незатененной антенной в зоне *A*. Второй член учитывает потери в связи с затенением от второго зеркала системы Кассегрена. В случае с использованием систем без второго зеркала, *b* в уравнении (12) принимает нулевое значение, и второй член в уравнении (11) может не учитываться.

Третий член δ в уравнении (11) учитывает потери (дБ), вызванные выходом энергии сигнала за пределы границы детектора. Для систем прямого детектирования, таких как РРМ, δ уменьшается по мере увеличения отношения размера детектора к фокусному расстоянию телескопа. В большинстве практических случаев значение δ составляет не более чем $-0,5$ дБ.

2.6 Наведение и слежение

В связи с узкой шириной луча и большой дальностью линии связи, работающей в направлении космос-космос на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, к наведению и слежению в системе предъявляются жесткие требования. Типовые требования к точности наведения определяются отклонением луча системы электросвязи. Для эталонной системы, представленной в таблице 1, это значение равняется 2,6 мкрад, а потери из-за неточности наведения составляют не более 3 дБ.

3 Отношение сигнал/шум (*S/N*)

Показатели качества линий, работающих в направлении космосе-космос на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц, напрямую зависят от достижения высокого отношения сигнал/шум (*S/N*) в приемнике. Чем выше *S/N*, тем ниже КОБ.

В общем случае:

$$S/R = \frac{P_s}{N_t}, \quad (13)$$

где:

 P_s : мощность принятого сигнала, согласно уравнению (1) N_t : мощность шума от всех источников.

Шум поступает от двух независимых источников: шум детектора и фоновый сигнал. Фоновый сигнал связан с поступающей извне энергией от альbedo и света Солнца, планет и звезд, которая достигает детектора. Шум детектора, рассмотренный в п. 3.1, связан с шумом, присущим детектору.

Основные уравнения, описывающие эффективность лазерной оптической межспутниковой линии связи, можно упростить за счет следующих основных допущений:

- Оптические передающие и приемные антенны не имеют центральных препятствий.

- Переданные волны являются гауссовыми и усекаются в точках $1/e^2$.
- Принятые волны являются планарными.
- Диска Эйри усекаются на первом нуле диаграммы диска Эйри.

3.2 Шум детектора

В системах электросвязи, работающих на частотах 354 ТГц и 366 ТГц, используется приемник прямого усиления с APD. Детекторы APD обычно работают в одной из двух областей детектирования, ограниченного по шуму. Детекторы, принимающие на входе энергию с высокими уровнями, будут, в основном, ограничены фотонным дробовым шумом. В то же время детекторы, принимающие на входе энергию с низкими уровнями, будут ограничены шумом детектора. Ниже выводится формула для расчета отношения сигнал/шум в системах прямого усиления, в которых обычно используется APD с усилителем в следующем каскаде.

Рассчитаем коэффициент избыточного шума, N_E :

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G}\right)(1 - k), \quad (14)$$

где:

- N_E : коэффициент избыточного шума
- G : усиление
- k : значение электронно-дырочной ионизации.

Тогда S/N можно рассчитать следующим образом:

$$S/N = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L}\right)}, \quad (15)$$

где:

- e : заряд электрона ($1,6 \times 10^{-19}$ кулон)
- P_S : мощность принятого сигнала (Вт)
- R_D : чувствительность APD
- k_B : постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К)
- T : температура (К)
- i_S : поверхностный темновой ток детектора (А)
- i_B : объемный темновой ток детектора (А)
- R_L : сопротивление усилителя напряжения, управляемого током (Ом)
- N_A : коэффициент шума усилителя
- B : полоса пропускания фильтра (мкм)
- B_F : полоса пропускания фильтра (Гц).