

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SA.1742

Технические и эксплуатационные характеристики межпланетных систем и систем для исследования дальнего космоса, работающих в направлении космос-Земля на частотах около 283 ТГц

(Вопрос МСЭ-R 235/7)

(2006)

Сфера применения

В данной Рекомендации представлены технические параметры (характеристики частот, канала, сигнала и данных, параметры антенны и т. д.) и эксплуатационные характеристики межпланетных систем и систем исследования дальнего космоса, работающих в направлении космос-Земля на частотах около 283 ТГц, для использования в исследованиях по совместному использованию частот.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что планируются линии электросвязи для использования на некоторых спутниковых системах для радиосвязи в дальнем космосе и в межпланетном пространстве на частотах около 283 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 радиосвязи;
- e) что механизмы помех между спутниками, работающими в системах для исследования дальнего космоса и пассивных системах, таких как астрономия, работающих на частотах выше 20 ТГц, могут отличаться от механизмов помех в радиочастотной зоне спектра,

признавая,

1 что, согласно положению № 78 Статьи 12 Устава МСЭ, функция Сектора радиосвязи включает "... проведение исследований без ограничения диапазона частот и принятие Рекомендаций...";

2 что под Примечанием 2 положения № 1005 в Приложении к Конвенции МСЭ Исследовательские комиссии в процессе проведения исследований и создания проектов новых Рекомендаций могут подразумевать, что "радиосвязь" включает спектр электромагнитных волн выше 3000 ГГц, распространяющихся в космическом пространстве без искусственного проводника;

3 что использование и совместное использование данного сегмента еще не достаточно изучены в МСЭ-R,

рекомендует,

1 чтобы при исследованиях совместного использования, рассматривающие спутники космических исследований, работающие в направлении космос-Земля на частотах около 283 ТГц в дальнем космосе, принимались во внимание технические и эксплуатационные параметры, представленные в Приложениях 1 и 2.

Приложение 1

1 Введение

В условиях возрастающей потребности в применении радиочастотного спектра и достижений развитии современных технологий, все большее значение придается использованию частот выше 3000 ГГц для радиосвязи в свободном космическом пространстве. Линии радиосвязи стали реальностью в полосах частот выше 3000 ГГц в результате многочисленных последних технологических разработок в области оптико-волоконной электросвязи, особенно в области лазеров, технологий модуляции и радиотехнологий. Радиосвязь в свободном космическом пространстве на частотах выше 3000 ГГц может поддерживать более высокие скорости передачи данных при меньшей массе, чем традиционные радиочастотные системы, а также отвечает всем требованиям к коэффициентам усиления и направленности лучей антенн при работе в дальнем космосе.

1.1 Анализ частот

В последнее время особый интерес среди линий радиосвязи выше 3000 ГГц представляют частоты 200, 283, 311 и 353 ТГц¹, соответствующая длина волны которых приблизительно равна 1,5; 1,06; 0,965 и 0,850 мкм. Данные частоты являются такими же, как частоты, которые используются для электросвязи в оптическом волокне. Для межпланетной радиосвязи и радиосвязи в дальнем космосе в направлении космос-Земля большое внимание уделяется использованию иттербиевого (Yb) волоконно-оптического усилителя на 1,06 мкм в конфигурации усилителя мощности задающего генератора (МОРА) с переключателем добротности, лазеры на неодиме: на алюмоиттриевом гранате (Nd:YAG) или неодиме: лазеры, работающие на частотах около 283 ТГц (1,06 мкм), на иттриевом ванадате (Nd:YVO₄), хотя в зависимости от миссии другие частоты тоже подходят. Использование Yb, Nd:YAG и Nd:YVO₄ приоритетно в связи с доступностью и надежностью.

1.2 Основные параметры миссии

Технические параметры, подходящие для анализа помех, должны основываться на общих данных межпланетных миссий на Марс и Юпитер. В целях минимизации веса и потребления мощности, линии связи должны поддерживать требования к радиосвязи, начиная сразу после запуска и затем на протяжении всей миссии, устраняя потребность в дополнительных системах радиосвязи. Поэтому расстояния между линиями будут варьироваться от нескольких тысяч километров до нескольких астрономических единиц длины (а.е.д.²). Расстояния от Земли до Марса или до Юпитера варьируются от 0,5 до 6,2 а.е.д. Основные технические параметры линии связи в дальнем космосе, работающей на частотах около 283 ТГц в направлении космос-Земля, приведены в таблице 1.

2 Анализ линии связи

Линии связи в дальнем космосе, работающие на частотах 283 ТГц в направлении космос-Земля, могут использовать лазеры на Yb, Nd:YAG или Nd:YVO₄. Луч будет передаваться с телескопа с диаметром 30 см на борту космического аппарата и приниматься телескопом на Земле с эффективным диаметром от 4,2 м до 10 м³.

¹ 1 ТГц = 1000 ГГц.

² 1 а.е.д. ≈ 149 597 870 км.

³ В целях электросвязи в свободном космическом пространстве на частоте около 283 ТГц, телескопом фактически является антенна.

ТАБЛИЦА 1

**Технические параметры двух эталонных миссий в дальнем космосе,
работающих на частотах 283 ТГц в направлении космос-Земля**

Параметры	Марс	Юпитер
Мощность передатчика	5 Вт (в среднем)	
Апертура передатчика	30 см	
Частота передатчика (длина волны)	283 ТГц (1,06 мкм)	
Модуляция	Фазоимпульсная модуляция (ФИМ) ($M = 64$ до 256) с каскадным кодированием	
Точность наведения	0,35 мкрад	
Диапазон	от 0,5 до 2,5 а.е.д.	от 4,2 до 6,2 а.е.д.
Скорость передачи данных (в течение дня на земной станции) ⁽¹⁾	от 3 до 30 Мбит/с (4,2 м на земной станции)	от 1,5 до 3 Мбит/с (10 м на станции)
Апертура приемника	от 4,2 до 10 м эквивалентного размера	
Тип детекторного приемника	Антенная решетка Гейгера InGaAsP/InP APD	
Требуемый энергетический запас линии связи	от 2 до 3 дБ	

⁽¹⁾ Скорость передачи данных на Земле в ночное время выше приблизительно на 30% (1,13 дБ).

2.1 Рабочие характеристики линии связи

Как и для системы, работающей в дальнем космосе в традиционном радиочастотном спектре, рабочие характеристики линии связи на частотах 283 ТГц измеряются в показателях скорости передачи данных и частоты ошибочных битов (BER). Рабочие характеристики вычисляются как функция мощности, качества телескопа, параметров распространения, шума и чувствительности приемника. Каждый из данных параметров является функцией дополнительных переменных.

2.1.1 Скорость передачи данных

В отличие от систем, работающих в дальнем космосе в традиционном радиочастотном спектре, когда все другие параметры неизменны, скорость передачи данных не совсем обратно пропорциональна квадрату дальности распространения; тем не менее, это является очень хорошим приближением для линий связи, работающих вблизи Марса и Юпитера, и поэтому хорошим практическим методом. Скорость передачи данных с Марса будет варьироваться в зависимости от многих параметров, включая диапазон линии связи и расположение Солнца. Скорость передачи данных с Марса будет приблизительно на порядок выше величины скорости передачи данных с Юпитера.

2.1.2 BER

Чтобы удерживать кадры данных, BER не должен быть менее чем 10^{-6} после исправления ошибок. Линия связи должна удерживать 99% кадров данных.

2.1.3 Требования к энергетическому запасу линии связи

Обычные требования к энергетическому запасу линии связи в линиях связи, работающих в дальнем космосе и в межпланетном пространстве на частотах 283 ТГц в направлении космос-Земля, составляют от 2 до 3 дБ. Условия зависят от многих факторов, в том числе от погоды, времени дня и угла возвышения.

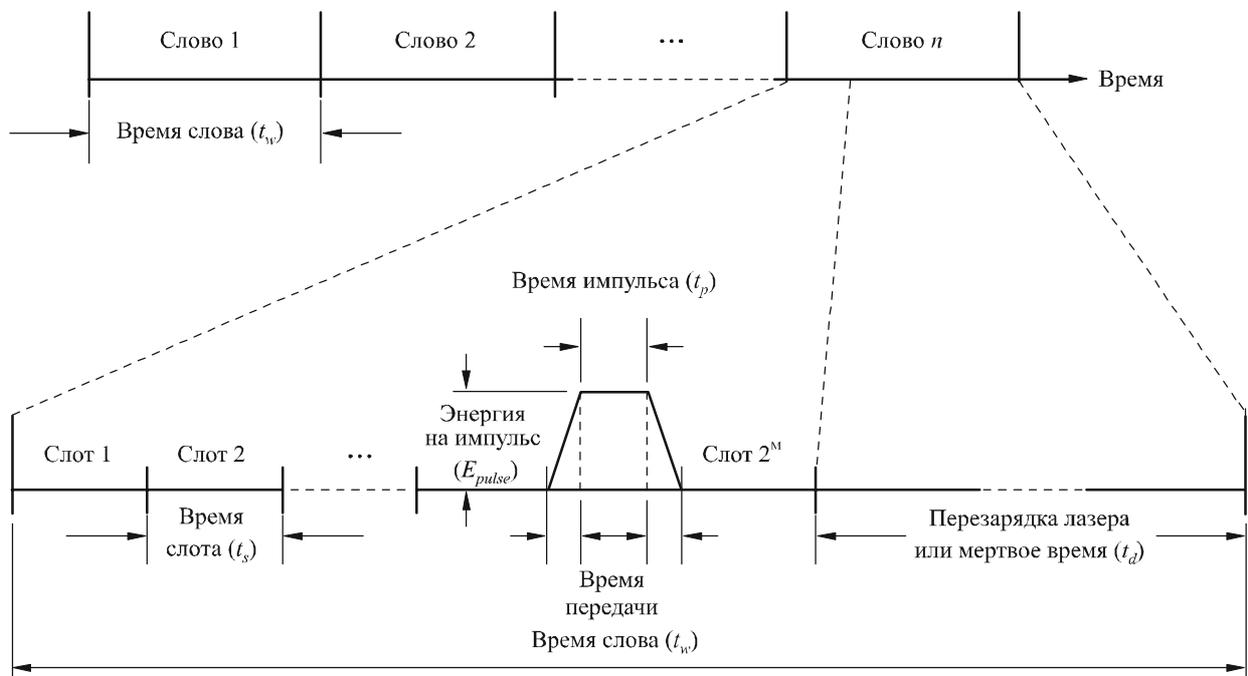
2.2 Модуляция

Линии связи, работающие в дальнем космосе и в межпланетном пространстве на частотах 283 ТГц, будут использовать ФИМ. Данная техника модуляции позволяет осуществлять прямое обнаружение (особенно счет фотонов) приемником, вместо того чтобы реализовывать когерентные приемники. Сигнал ФИМ будет закодирован каскадным кодом.

ФИМ использует единичный импульс энергии в течение передачи одного слова. M битов данных могут быть переданы единичным импульсом энергии, временно находящимся во временных слотах слова 2^M . Часть всего времени передачи слова используется для подзарядки лазера и никогда не будет содержать импульса. Такая подзарядка, или нерабочее время, часто составляет большую часть времени передачи слова при низкой скорости передачи данных, но становится незначительным фактором при высокой скорости передачи данных. Временные характеристики сигнала ФИМ и их соответствующие показатели изображены на рисунке 1.

РИСУНОК 1

Характеристики сигнала ФИМ



1742-01

2.3 Доставляемая мощность

Передатчики на Yb, с переключателем добротности, на Nd:YAG или Nd:YVO₄ производят в среднем 5 Вт мощности. Пиковая мощность варьируется вместе со скоростью передачи данных, но может составлять приблизительно 30–40 дБВт. Чтобы вычислить пиковую мощность, P_{peak} , передатчика ФИМ нужно произвести описанные ниже действия. Требуются следующие параметры:

M : индекс модуляции;

P_{ave} : средняя мощность передатчика (Вт);

t_d : нерабочее время (с);

t_p : длительность импульса передатчика (с);

t_s : временной интервал (с).

Шаг 1: Вычислить время передачи слова, t_w :

$$t_w = M \cdot t_s + t_d \quad \text{с.} \quad (1)$$

Шаг 2: Вычислить энергию на слово, E_{word} :

$$E_{word} = P_{ave} \cdot t_w \quad \text{Дж.} \quad (2)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Так как в течение времени передачи слова поступает только один импульс, энергия на импульс равна энергии на слово (т. е. $E_{pulse} = E_{word}$).

Шаг 3: Вычислить пиковую мощность передатчика, P_{peak} :

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{t_p} \quad \text{Вт.} \quad (3)$$

2.4 Принимаемый сигнал

Основной метод для вычисления уровня сигнала на частотах 283 ТГц, принимаемого земной станцией, точно такой же, как и метод вычисления, использующийся в традиционных высокочастотных системах.

$$P_S = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r + L_p + L_a + L_s \quad \text{дБВт,} \quad (4)$$

где:

P_S : мощность сигнала приемника;

P_t : средняя выходная мощность лазера (типичное значение – от 4,7 до 7,0 дБВт);

G_t : коэффициент усиления антенны передатчика (типичное значение – 119 дБ), подробнее в параграфе 2.6.2;

G_r : коэффициент усиления антенны приемника (типичное значение – от 129 до 149 дБ), подробнее в параграфе 2.6.3;

L_t : потери передатчика;

L_r : потери приемника;

L_p : потери усиления из-за неточного позиционирования антенны;

L_a : атмосферные потери по линии связи космос-Земля;

L_s : потери в свободном пространстве.

2.5 Потери в линии связи

Существует пять основных источников потерь в линии связи:

- внутренние потери передатчика, L_t , которые включают эффекты поглощения, потери на рассеяние, потери на отражение в оптической системе передатчика;
- внутренние потери приемника, L_r , которые включают эффекты поглощения, потери на рассеяние и потери на отражение в оптической системе приемника;
- потери усиления, L_p , которые включают эффекты вибрации антенны и космического аппарата, неточное позиционирование антенны передатчика;
- атмосферные потери, L_a , которые включают эффекты атмосферного рассеивания и турбулентности;
- потери в свободном пространстве, L_s , которые происходят в связи с физическим разделением между передатчиком и приемником.

Значения каждого источника помех варьируются в связи с конструкцией оборудования, изношенностью оборудования, требованиями миссии и этапом миссии. В таблице 2 представлены предложенные значения потерь, которые используются при анализе основных помех.

Распространение волн в атмосфере в данной зоне спектра было подробно рассмотрено 3-й Исследовательской Комиссией Радиосвязи в Рекомендациях МСЭ-R P.1621 и МСЭ-R P.1622.

ТАБЛИЦА 2

Технические параметры двух эталонных миссий в дальнем космосе, работающих на частотах 283 ТГц в направлении космос-Земля

Механизм потер	Типичное значение
Потери передатчика, L_t	0,63 (= -2 дБ)
Потери приемника, L_r	0,63 (= -2 дБ)
Потери усиления, L_p	0,63 (= -2 дБ)
Атмосферные потери, L_a	0,89 (= -0,5 дБ) при 90° 0,56 (= -2,5 дБ) при 30°

Потери в свободном пространстве, L_s , на частотах 283 ТГц вычисляются так же, как и в традиционных радиочастотных системах:

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi f R} \right)^2, \quad (5a)$$

которая на частотах 283 ТГц сокращается до:

$$L_s = \frac{7,169 \times 10^{-15}}{R^2}, \quad (5b)$$

где:

R : расстояние между передатчиком и приемником (м).

2.6 Параметры телескопа передачи и приема

Линии радиосвязи, работающие в дальнем космосе и в межпланетном пространстве на частотах около 283 ТГц используют телескопы в качестве передающих и принимающих антенн. Типичные параметры передающих и принимающих телескопов сильно отличаются друг от друга. Эти отличия влияют на соответствующую диаграмму усиления. 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 для диаграмм направленности усиления передающей и принимающей антенн, работающих на частотах около 283 ТГц, представлены в Приложении 2.

2.6.1 Диаметр

В целях анализа помех диаметр передающей антенны должен быть принят за 30 см. Апертура передачи либо не затенена, либо имеет 3 см затенения антенны.

Эффективный диаметр антенны приемника может варьироваться от 1 до 10 м, но для большинства случаев применения составляет, по крайней мере, 4,2 м. В целях анализа помех должны рассматриваться антенны с диаметром 1; 4,2 и 10 м. Первая апертура приемника может иметь дополнительное затенение антенны с диаметром не более 20% от диаметра первой апертуры.

2.6.2 Диаграмма усиления передачи

Передатчик использует телескоп, который снабжается лазером. Такие лазеры обычно работают только на самой низкой волне резонатора, TEM_{00} , в результате луч имеет гауссово распределение энергии с максимальной интенсивностью на осях передачи. Диаграмма луча составляется таким образом, чтобы его интенсивность уменьшалась в амплитуде с угловым разнесением от оси передачи,

теряется лишь несколько процентов мощности луча. Две точки эталона являются углами, на которых амплитуда луча опускается либо до 37%, либо до 13% от амплитуды на осях. Данные точки называются точками $1/e$ и $1/e^2$ соответственно и часто относятся к категоризации диаграмм излучаемой энергии лазера.

Полный угол ширины луча в точке $1/e^2$ приблизительно выражается следующим образом:

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

где:

θ_{1/e^2} : ширина луча (рад);

λ : длина волны (м);

D : диаметр апертуры (м).

В случае с гауссовым лучом на частотах 283 ТГц, передаваемом с апертуры диаметром 30 см, ширина луча в точке $1/e^2$ составляет приблизительно $4,5 \times 10^{-6}$ рад.

Для передающей станции могут быть использованы следующие уравнения для вычисления диаграммы радиации в поле дальней зоны лазера с телескопом, снабжаемым гауссовой планарной волной. Использование данных уравнений предполагает, что:

- лазерный источник характеризуется только гауссовым распределением;
- диаграммы усиления антенны измеряются в поле дальней зоны;
- апертура является круговой.

Диаграмма усиления передающего телескопа с радиусом a , снабжаемого гауссовой планарной волной, имеющей радиус суженной части ω , где ω – это расстояние между центральной осью оптической системы и точкой интенсивности $1/e^2$ и имеющей центральное затенение с радиусом b , представлена в уравнении 7. Показатель G_0 – верхний предел на усилении антенны, который вычисляется для постоянно освещенной незатененной круговой апертуры. Второй показатель $g_t(\alpha, \gamma, X)$ – показатель эффективности усиления, который учитывает затенение, усечение, интенсивность отклонения оси и эффекты дефокусировки.

$$G_t(\alpha, \gamma, X) = G_0 \cdot g_t(\alpha, \gamma, X) \quad \text{дБи,} \quad (7)$$

где:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad \text{дБи,} \quad (8)$$

$$g_t(\alpha, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left| \int_{\gamma^2}^1 J_0(X\sqrt{u}) e^{-\alpha^2 u} du \right|^2, \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{b}{a} \quad (10)$$

A : зона апертуры телескопа (м^2);

a : радиус первой апертуры (м);

b : радиус затенения (м);

J_0 : функция Бесселя первого типа нулевого порядка;

α : отношение α/ω , отношение радиуса апертуры передатчика, a , к радиусу сужения луча, снабжаемого гауссовой волной, ω , в точке $1/e^2$;

u : переменная интегриации;

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

θ : угол отклонения от оптической оси (рад).

Для оси $X = 0$ и показатель эффективности усиления в уравнении 9 становится равным:

$$g_t(\alpha, \gamma, 0) = \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right]. \quad (11)$$

Тогда максимальное усиление осевого главного луча в уравнении 7 становится равным:

$$G_t(\alpha, \gamma, 0) = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\alpha^2} \left[e^{-\alpha^2} - e^{-\gamma^2 \alpha^2} \right]^2 \right] \quad \text{дБи} \quad . \quad (12)$$

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

2.6.3 Принимающая диаграмма усиления

Размер поля видимости относится к физическому размеру детектора и фокусному расстоянию телескопа. Он может быть определен с помощью следующего уравнения:

$$\phi = \frac{d}{F}, \quad (13)$$

где:

ϕ : поле видимости (рад);

d : диаметр детектора (обычно от 10^{-4} до 10^{-3}) (м);

F : фокусное расстояние телескопа (м).

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

Допуская, что апертура приемника находится в поле дальней зоны передающей антенны, получаемая энергия обычно обрабатывается как планарная волна. Принимающая 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 принимающей антенны, G_R , выводится следующим образом:

$$G_R = 10 \log \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) + 10 \log (1 - \gamma^2) + \delta \quad \text{дБи}, \quad (14)$$

где:

A : зона принимающей апертуры (м^2);

λ : длина волны входящего сигнала (м)

и

$$\gamma = \frac{b}{a}, \quad (15)$$

где:

a : радиус первого зеркала (м);

b : радиус второго зеркала (м).

Усиление, вычисляемое в уравнении 14, показывает количество падающей энергии на детекторе. Показатель G_R предполагает, что принимающая антенна расположена в поле дальней зоны передатчика, апертура и детектор являются круглыми. Первый показатель уравнения 14 представляет собой классическое усиление антенны, осуществленное идеальной незатененной антенной в зоне A . Второй показатель учитывает потери в связи с затенением от второго зеркала системы Кассегрена. В случае с использованием систем без второго зеркала значение b в уравнении 15 становится нулем, и второй показатель уравнения 14 может не учитываться.

Третий показатель δ уравнения 14 учитывает потери (дБ) в связи с выходом энергии сигнала за пределы границы детектора. Для систем прямого детектирования, таких как ФИМ, δ уменьшается по мере увеличения отношения размера детектора к фокусному расстоянию телескопа. Для большинства практических значений δ составляет не более чем $-0,5$ дБ.

2.7 Наведение и сопровождение

Узкая ширина луча и большой диапазон линии связи, работающей в дальнем космосе и в межпланетном пространстве на частотах около 283 ТГц, требуют точного наведения и сопровождения в системе. Типичные требования к точности наведения составляют приблизительно $1/10$ ширины луча. Для эталонной системы, представленной в таблице 1, это значение равняется $0,35$ микрорадиан (мкрад), и потеря усиления составляет не более чем 2 дБ.

Зона охвата $1/e^2$ линии связи длиной 2 и 6 а.е.д. показана на рисунках 2 и 3, соответственно. Рисунки предполагают, что космический аппарат служил передатчиком вдоль плоскости экватора Земли и направлен на экспериментальные оптические спутниковые установки НАСА, расположенные в Райтвуде, Калифорния, США. Внутренний сплошной контур на каждом рисунке представляет допущение идеального наведения. Внешний пунктированный контур показывает контур диапазона с ошибкой наведения $0,35$ мкрад. Расстояния в 2 и 6 а.е.д. равняются обычным расстояниям до Земли от Марса и Юпитера, соответственно.

РИСУНОК 2

Зона охвата луча 8 мкрад с 2 а.е.д.

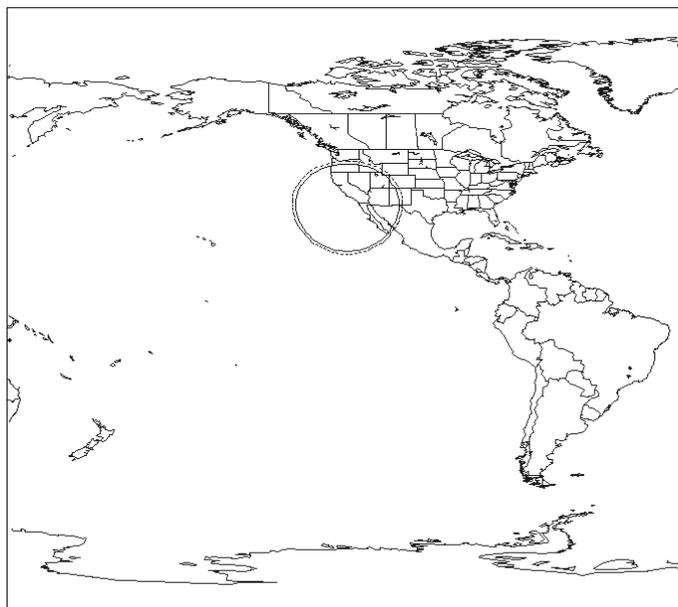
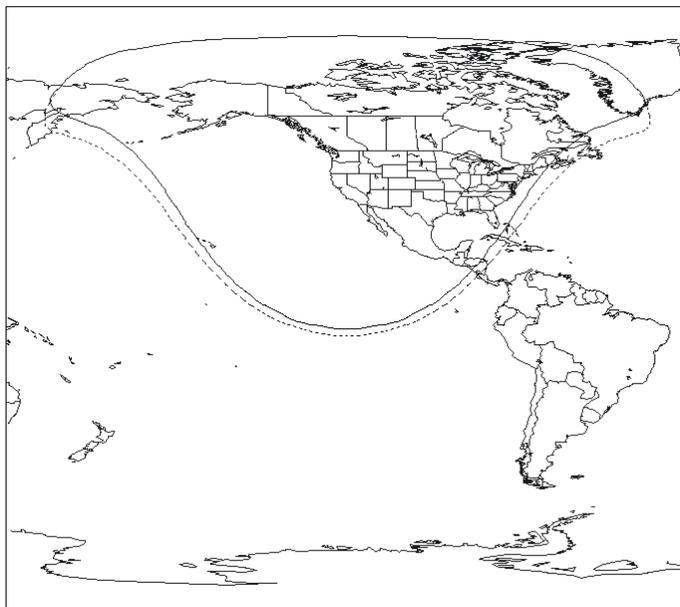


РИСУНОК 3

Зона охвата луча 8 мкрад с 6 а.е.д.



1742-03

3 Отношение сигнал/шум (SNR)

Рабочие характеристики линий связи, работающих в дальнем космосе и в межпланетном пространстве на частотах около 283 ТГц, прямо зависят от достижения высокого отношения сигнал/шум (SNR) на приемнике. Чем выше SNR, тем ниже BER. В общем:

$$SNR = \frac{P_s}{N_t}, \quad (16)$$

где:

P_s : мощность входного сигнала, как дано в уравнении 4;

N_t : мощность шума от всех источников.

Шум поступает от двух независимых источников: шум детектора и фоновый сигнал. Фоновый сигнал, рассмотренный в параграфе 3.1, связан с энергией, поступающей извне от неба, которая достигает детектор. Шум детектора, рассмотренный в параграфе 3.2, связан с шумом, присущим детектору.

Основные уравнения, описывающие эффективность лазерной оптической межспутниковой линией связи или линии связи в атмосфере, могут быть упрощены следующими основными допущениями:

- Оптические передающие и принимающие антенны не имеют центральных преград.
- Передаваемые формы волны являются гауссовыми и усекаются в точках $1/e^2$.
- Принимаемые волны являются планарными.
- Диска Эйри усекаются на первом нуле диаграммы диска Эйри.

3.1 Фоновый сигнал

В дневное время эксплуатации или когда освещенный объект появляется в поле видимости детектора, фоновый сигнал является главным источником шума. Мощность фонового сигнала, P_{back} , на детекторе может возникнуть из рассеянной энергии с неба, с планет и со звезд. Шум неба сильнее в дневное время и варьируется с местными метеоусловиями, но всегда присутствует на каком-то определенном уровне. Шум с планет или звезд является фактором, когда они находятся в поле

видимости приемника. Шум от каждого источника может быть суммирован для вычисления фонового сигнала.

Для вычисления уровней фонового сигнала на детекторе земной станции необходимо произвести следующие действия. Требуются следующие параметры:

- D : диаметр апертуры приемника (м);
- γ : затенение телескопа на наземной станции;
- ϕ : поле видимости детектора (рад);
- B : ширина полосы пропускания приемника (мкм).

Шаг 1: Вычислить зону охвата приемника, A_{rec} :

$$A_{rec} = (1 - \gamma^2) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad \text{м}^2. \quad (17)$$

Шаг 2: Вычислить пространственный угол поля видимости детектора приемника, ϕ' :

$$\phi' = 2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \quad \text{ср}, \quad (18a)$$

что приблизительно равно для небольших углов:

$$\phi'_{det} = \frac{\pi \phi^2}{4} \quad \text{ср}. \quad (18b)$$

Шаг 3: Определить значение излучения неба, H_{sky} , на частотах 283 ТГц. Если измеренные значения отсутствуют, выбрать значение в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3

Излучение на частотах 283 ТГц для произвольно выбранных условий освещенности неба, H_{sky} (Вт/м²/мкм/ср)

Источник	Излучение
Яркое дневное солнце	54,45
Обычная дневная освещенность	25,32
Облачный день	17,99
Ночное время	$1,000 \times 10^{-5}$

Шаг 4: Вычислить мощность на детекторе от неба, P_{sky} :

$$P_{sky} = H_{sky} \cdot A_{rec} \cdot \phi' \cdot B \quad \text{Вт}. \quad (19)$$

Шаг 5: Определить значение облученности, N_{star} , от звезды на частотах 283 ТГц, если какая-либо звезда появляется в поле видимости земной станции. Если измеренные значения отсутствуют, выбрать значение в таблице 4. Если в поле видимости звезд нет, то $P_{star} = 0$, и можно перейти к Шагу 7.

ТАБЛИЦА 4

Облученность на частотах 283 ТГц для некоторых звезд, N_{star} (Вт/м²/мкм)

Источник	Облученность	Источник	Облученность
Ахернар	$1,94462 \times 10^{-9}$	Капелла	$1,67642 \times 10^{-8}$
Альдебаран	$2,87647 \times 10^{-8}$	Полюкс	$1,61359 \times 10^{-8}$
Альтаир	$2,68864 \times 10^{-9}$	Просион	$1,22510 \times 10^{-8}$
Арктур	$3,22719 \times 10^{-8}$	Ригель	$4,76926 \times 10^{-9}$
Бетельгейзе	$3,99278 \times 10^{-8}$	Ригиль Кент	$1,67642 \times 10^{-8}$
Канопус	$2,09429 \times 10^{-8}$	Сириус	$2,09013 \times 10^{-8}$

Шаг 6: Вычислить мощность на детекторе от звезды, P_{star} :

$$P_{star} = N_{star} \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{Вт} \quad (20)$$

Шаг 7: Определить диаметр, D_{planet} , сферическое альbedo, χ_{planet} , и спектральную плотность мощности, Ψ_{planet} , планеты в поле видимости приемника с использованием значений, приведенных в таблице 5. Если в поле видимости планет нет, то $P_{planet} = 0$, и можно перейти к Шагу 10.

ТАБЛИЦА 5

Диаметры, альbedo и спектральная плотность планет

Планета	Диаметр (м)	Альbedo планеты	Спектральная плотность на планете (Вт/мкм)
Меркурий	4 866 070	0,119	$8,336 \times 10^{16}$
Венера	12 108 756	0,75	$1,469 \times 10^{17}$
Марс	6 778 400	0,25	$1,043 \times 10^{16}$
Юпитер	142 989 171	0,343	$3,950 \times 10^{17}$
Сатурн	120 582 610	0,342	$8,228 \times 10^{16}$
Уран	51 204 220	0,3	$3,891 \times 10^{15}$
Нептун	49 508 383	0,29	$1,373 \times 10^{15}$
Плутон	2 308 404	0,145	$1,803 \times 10^{12}$

Шаг 8: Вычислить угол, образуемый планетой, как он виден от приемника, θ_{planet} :

$$\theta_{planet} = \frac{D_{planet}}{R_{planet}} \quad \text{рад}, \quad (21)$$

где:

 R_{planet} : расстояние от Земли до планеты (м).

Шаг 9: Если $\theta_{planet} < \phi$, вычислить мощность на детекторе от планеты, P_{planet} :

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \quad \text{Вт,} \quad (22a)$$

иначе

$$P_{planet} = \left(\frac{\Psi_{planet} \cdot \chi_{planet}}{R_{planet}^2} \right) \cdot A_{rec} \cdot B \cdot \left(\frac{\phi'}{\theta'_{planet}} \right) \quad \text{Вт,} \quad (22b)$$

где θ'_{planet} – пространственный угол планеты, противоположащий детектору, представлен формулой:

$$\theta'_{planet} = 2\pi \left(1 - \cos \left(\frac{\theta_{planet}}{2} \right) \right) \approx \frac{\pi \theta_{planet}^2}{4} \quad \text{ср.} \quad (23)$$

Шаг 10: Вычислить суммарную мощность фоновых сигналов, P_{back} , которая приходится на детектор:

$$P_{back} = P_{sky} + P_{star} + P_{planet} \quad \text{Вт.} \quad (24)$$

3.2 Шум детектора

Многие планируемые системы для радиосвязи в дальнем космосе и межпланетном пространстве будут использовать систему прямого детектирования на приемнике с лавинным фотодиодом (APD). Детекторы с APD будут работать в одном из двух регионов с детектированием, ограниченным шумами. Детекторы, принимающие высокие уровни входной энергии будут, в основном, ограничены фотоновым дробовым шумом. Тем не менее, детекторы, получающие низкие уровни входной энергии, такие как относящиеся к линиям связи, работающим в дальнем космосе и межпланетном пространстве, будут ограничены шумом детектора. Отношение сигнал/шум (SNR) для обычно используемых APD с усилителем на следующем этапе в системах прямого детектирования описано далее.

Необходимо вычислить значение избыточного шума, N_E :

$$N_E = Gk + \left(2 - \frac{1}{G} \right) (1 - k), \quad (25)$$

где:

G : усиление;

k : значение электронно-дырочной ионизации.

Тогда SNR может быть вычислено следующим образом:

$$SNR = \frac{G^2 R_D^2 P_S^2}{2eG^2 B(N_E)(R_D P_S + i_B) + 2ei_S + 4N_A B_F \left(\frac{k_B T}{R_L} \right)}, \quad (26)$$

где:

e : заряд электрона ($1,6 \times 10^{-19}$ кулон);

P_S : средняя мощность входного 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 : число шумов усилителя;
 B_F : пропускная способность приемника (Гц).

4 Список переменных

- a : радиус зеркала телескопа (м)
 A : зона апертуры телескопа (м²)
 A_{rec} : зона апертуры приемного телескопа (м²)
 α : отношение α/ω
 b : радиус второго зеркала (м)
 B : ширина полосы пропускания фильтра (мкм)
 B_F : пропускная способность фильтра (Гц)
 c : скорость света (м/с)
 χ_{planet} : сферическое альbedo планеты
 d : диаметр детектора (м)
 D : диаметр апертуры (м)
 D_{planet} : диаметр планеты (м)
 δ : потери в связи с выходом энергии за пределы границы детектора (дБ)
 e : заряд электрона (кулон)
 E_{pulse} : энергия на импульс (Дж)
 f : оптическая частота (Гц)
 F : фокусное расстояние телескопа (м)
 ϕ : поле видимости детектора (рад)
 ϕ' : пространственный угол сферы обслуживания детектора (рад)
 G_0 : максимальное усиление осевой антенны (дБи)
 G_r : усиление на приемной антенне (дБи)
 g_i : эффективность усиления
 G_t : усиление на передающей антенне (дБи)
 γ : значение затенения
 H_{sky} : излучение неба (Вт/м²/мкм/ср)
 i_b : объемный темновой ток в детекторе (А)
 i_S : поверхностный темновой ток в детекторе (А)
 k : значение электронно-дырочной ионизации
 k_B : постоянная Больцмана
 L_t : потери передатчика

L_r :	потери приемника
L_p :	потери усиления
L_a :	атмосферные потери на линии связи космос-Земля
L_s :	потери в свободном пространстве
λ :	длина волны (м)
M :	индекс модуляции
N_A :	число шумов усилителя
N_E :	значение избыточного шума
N_{star} :	облученность звезды (Вт/м ² /мкм)
N_t :	мощность шума от всех источников
P_{ave} :	средняя мощность передатчика (Вт)
P_{back} :	суммарная входная фоновая мощность (Вт)
P_{peak} :	пиковая мощность (Вт)
P_{planet} :	входная мощность с освещенной планеты (Вт)
P_S :	мощность входного сигнала (Вт)
P_{sky} :	входная мощность с неба (Вт)
P_{star} :	входная мощность от звезды (Вт)
P_t :	средняя выходная мощность лазера (Вт)
θ :	угол отклонения от оптической оси (рад)
θ_{planet} :	угол, образуемый планетой (рад)
θ_{1/e^2} :	угловая ширина луча в точке $1/e^2$ (рад)
θ'_{planet} :	пространственный угол, образуемый планетой (рад)
R :	расстояние между передатчиком и приемником (м)
R_D :	чувствительность APD
R_L :	сопротивление усилителя, управляемого током
R_{planet} :	расстояние между планетой и приемником (м)
t_d :	нерабочее время передатчика (с)
t_p :	длительность импульса передатчика (с)
t_s :	временной сегмент передатчика (с)
t_w :	время передачи слова передатчика (с)
T :	температура (К)
ω :	размер сужения луча в точке $1/e^2$
Ψ_{planet} :	спектральная плотность мощности Луны и планеты (Вт/мкм).

Приложение 2

1 Диаграмма направленности антенны для незатененных круговых передающих апертур

Огибающая диаграммы усиления антенны с незатененной круговой передающей апертурой, работающей на частотах 283 ТГц, приблизительно выражается следующим образом:

$$G_t(\varphi) = G_{\max} - 0,9 - (4,5 \times 10^{-4}) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{дБи} \quad \text{для } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{\max} + 35 - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ,$$

где:

$$G_{\max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \quad \text{усиление главного лепестка (дБи);}$$

$$G_1 = G_{\max} - 25,8: \quad \text{усиление первого бокового лепестка (дБи);}$$

D : диаметр апертуры (м);

λ : длина волны (м);

φ : угол отклонения от оси (градусы);

$$\varphi_r = 5,83 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \quad \text{угол первого бокового лепестка (градусы);}$$

$\varphi_m = 0,75\varphi_r$: угол, при котором усиление главного лепестка равняется усилению бокового лепестка (градусы)

φ_1 : поле видимости, ограниченное оптическими диафрагмами (градусы).

2 Диаграмма направленности антенны для затененных круговых передающих апертур

Огибающая диаграммы усиления антенны с затененной круговой передающей апертурой, работающей на частотах 283 ТГц, приблизительно выражается следующим образом:

$$G_t(\varphi) = G_{\max} - 0,9 + 32 \log(1 - \gamma^2) - \left(4 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{2000} \right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{дБи} \quad \text{для } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{\max} + 40 + 15\gamma - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_1 < \varphi \leq 180,$$

где:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \quad \text{усиление главного лепестка (дБи);}$$

$$G_1 = G_{max} + 2,17 + 15\gamma - 30 \log (5,77 - 2,9\gamma^2): \quad \text{усиление первого бокового лепестка (дБи);}$$

D : диаметр апертуры (м);

λ : длина волны (м);

φ : угол отклонения от оси (градусы);

$$\varphi_r = (5,77 - 2,9\gamma^2) \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \quad \text{угол первого бокового лепестка (градусы);}$$

$$\varphi_m = (0,71 - 0,5\gamma) \cdot \varphi_r: \quad \text{угол, при котором усиление главного лепестка равняется усилению бокового лепестка (градусы);}$$

φ : поле обслуживания, ограниченное оптическими диафрагмами;

$$\gamma = \frac{b}{a}: \quad \text{значение затенения;}$$

a : радиус первой апертуры (м);

b : радиус второй апертуры (м).

3 Диаграмма направленности антенны для незатененных круговых принимающих апертур

Огибающая диаграммы усиления антенны с незатененной круговой принимающей апертурой, работающей на частотах 283 ТГц, приблизительно выражается следующим образом:

$$G_t(\varphi) = G_{max} - (6 \times 10^{-4}) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{дБи} \quad \text{для } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 42 - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log (\varphi) \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ,$$

где:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right): \quad \text{усиление главного лепестка (дБи);}$$

$$G_1 = G_{max} - 17,5: \quad \text{усиление первого бокового лепестка (дБи);}$$

D : диаметр апертура (м);

λ : длина волны (м);

φ : угол отклонения от оси (градусы);

$$\varphi_r = 5,14 \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right): \quad \text{угол первого бокового лепестка (градусы);}$$

- $\varphi_m = 0,65\varphi_r$: угол, при котором усиление главного лепестка равняется усилению бокового лепестка (градусы);
- φ_1 : поле обслуживания, ограниченное оптическими диафрагмами (градусы).

4 Диаграмма направленности антенны для затененных круговых принимающих апертур

Огибающая диаграммы усиления антенны с затененной круговой принимающей апертурой, работающей на частотах 283 ТГц, приблизительно выражается следующим образом:

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 20 \log(1 - \gamma^2) - \left(6 \times 10^{-4} + \frac{\gamma}{3000} \right) \left(\frac{D}{\lambda} \cdot \varphi \right)^{2,5} \quad \text{дБи} \quad \text{для } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G_t(\varphi) = G_1 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_m < \varphi \leq \varphi_r$$

$$G_t(\varphi) = G_{max} + 44 + 8\gamma - 30 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) - 30 \log(\varphi) \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_r < \varphi \leq \varphi_1$$

$$G_t(\varphi) = -10 \quad \text{дБи} \quad \text{для } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ,$$

где:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right) : \text{усиление главного лепестка (дБи);}$$

$$G_1 = G_{max} - 15,15 + 8\gamma : \text{усиление первого бокового лепестка (дБи);}$$

D : диаметр апертуры (м);

λ : длина волны (м);

φ : угол отклонения от оси (градусы);

$$\varphi_r = 5,14 \cdot \left(\frac{180\lambda}{\pi^2 D} \right) : \text{угол первого бокового лепестка (градусы);}$$

$$\varphi_m = (0,62 - 0,3\gamma) \cdot \varphi_r : \text{угол, при котором усиление главного лепестка равняется усилению бокового лепестка (градусы);}$$

φ_1 : поле обслуживания, ограниченное оптическими диафрагмами (градусы);

$$\gamma = \frac{b}{a} : \text{значение затенения;}$$

a : радиус первой апертуры (м);

b : радиус второй апертуры (м).