

УДК 621.396.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭСТАФЕТНОЙ СВЯЗИ В КАНАЛЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ “КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ – НАЗЕМНАЯ СТАНЦИЯ СЛЕЖЕНИЯ”

М. Н. Андрианов

Выполнен анализ достоверности передачи данных в условиях логарифмически-нормальных (логнормальных) амплитудных флуктуаций, определяемых дифракцией Фраунгофера на линии передачи сообщений “космический аппарат – наземная станция слежения” при когерентном методе приема сигналов в миллиметровом диапазоне. Канал передачи разбит на два интервала связи: космический аппарат дальнего космоса – околоземный космический аппарат; околоземный космический аппарат – наземная станция слежения через тропосферный канал. Выделены оптимальные частоты передачи сигналов в тропосферном канале по критерию минимизации вероятности ошибок и проанализированы возможности достижения высоких скоростей передачи данных.

Ключевые слова: тропосферный канал, распространение радиоволн, миллиметровые волны, дисперсия, дифракция Фраунгофера, логнормальные амплитудные флуктуации, эстафетная связь.

Введение. В работе [1] рассматривалась возможность работы спутниковых линий связи миллиметрового диапазона в условиях передачи сигнала в научных экспериментах дальнего космоса на наземную станцию слежения (НСС). В работе [2] рассматривалась возможность эстафетной двухинтервальной передачи данных: от космического аппарата дальнего космоса (КА) до летательного аппарата-ретранслятора (ЛА), расположенного на границе тропосферы/стратосферы; и далее от него на НСС. Второй интервал связи (от ЛА к НСС) осуществлялся по тропосферному каналу, в котором

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32; e-mail: mihail-andrian@asc.rssi.ru.

радиус первой зоны Френеля больше внутреннего, но при этом он меньше внешнего масштаба турбулентности. При этом амплитуда сигнала в канале подвержена френелевской дифракции.

В настоящей работе выполнен анализ достоверности передачи данных на спутниковых линиях связи с учетом амплитудных флуктуаций радиоволн в атмосфере, в условиях дифракции Фраунгофера, когда радиус первой зоны Френеля существенно больше внешнего масштаба турбулентности.

Необходимо определить вероятности ошибок данных в канале спутниковой линии связи при наличии амплитудных флуктуаций. Как было показано в [3], применение миллиметрового (мм) диапазона существенно повышает пропускную способность беспроводной передачи данных, обеспечивая тем самым эффективное функционирование наземно-космической радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. В настоящей работе рассматривается эстафетная передача научных данных: от КА до околоземного космического аппарата (ОКА); и далее от него на НСС.

Исследуем линию связи мм диапазона, от ОКА к НСС, протяжённость которой зависит от высоты орбиты ОКА. Интервал от КА к ОКА является линией передачи данных через невозмущенное пространство (гауссовый канал с аддитивными шумами), не вносящий дополнительных ошибок в эффективную транзакцию сообщений. Минимизация размеров приёмной антенны, при сохранении высокого коэффициента усиления, будет обеспечена применением усилителей на лампах бегущей волны (ЛБВ) субмиллиметрового (субмм) диапазона, разработка которых ведётся в настоящее время в России и за рубежом [4]. Более детальное обсуждение данного вопроса выходит за рамки предполагаемой статьи.

Для ретрансляторов ОКА можно выбрать спутниковые аппараты, расположенные на низких и средних орбитах. В качестве низкоорбитальных спутников можно отдать предпочтение станции “МКС”, масса и габариты которой составляют, соответственно, 440 т и $(109 \times 73 \times 27)$ м³, с мощностью 75 кВт. Станция обитаема (постоянный состав 7 чел., временный 13). Представляет интерес создаваемая в настоящее время перспективная национальная станция “РОС” (Российская Орбитальная Станция) с полезным объёмом более 600 м³, массой 60 т и мощностью 55 кВт. Высоты орбит станций составляют 350–400 км. В качестве спутников средних орбит наиболее предпочтителен аппарат “Скиф”, создаваемый в рамках общенациональной программы информкосмоса “Сфера”. Однако, несмотря на более высокую орбиту (8070 км), и, как следствие значимых зон видимости, необходимо тщательно соизмерять его относительно неболь-

шие габариты, вес и мощность ($82 \times 320 \times 88$ см³; 200 кг; 200 Вт) с соответствующими параметрами ретранслятора.

Следует отметить, что сигналы первого и второго интервалов (приём на ретранслятор от КА дальнего космоса и передачу с ретранслятора на НСС) декоррелированы, развязаны относительно друг друга, поскольку реализуются в разных частотных диапазонах, соответственно субмм и мм.

Дисперсия логнормальных амплитудных флуктуаций в зависимости от физических параметров тропосферы на линии ОКА – НСС. Поскольку предполагаемое расстояние (z_1) от ОКА до НСС, даже для низкоорбитальных космических аппаратов, составляет не менее $4 \cdot 10^5$ м (400 км), то для длины волны ($\lambda = 4$ мм) радиус первой зоны Френеля ($R = \sqrt{\lambda \cdot z_1}$) вблизи поверхности Земли составит около 40 м, что значительно больше внешнего масштаба турбулентности ($L_0 \approx 10$ м около поверхности Земли).

В этом случае, когда $R \gg L_0$, дисперсия определяется [1, 5] как

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{16} C_\varepsilon^2 L_0^{5/3} k^2 z, \quad (1)$$

где $C_\varepsilon = C_{\varepsilon 0}$ – структурная постоянная диэлектрической проницаемости в приземном слое, составляет примерно $0.5 \cdot 10^{-6}$ м^{-1/3}; константа $N \approx 0.077$; k – волновое число; z – длина пути радиосигнала по тропосфере, при угле места приёмной антенны НСС 14.3° и толщине тропосферы 10 км составляет 40 км.

Средний квадрат уровня χ равен дисперсии, поскольку он распределен нормально, с нулевым средним [5]. При этом влияние френелевской дифракции невелико и преобладает режим дифракции Фраунгофера [5, 6].

Как показано в работе [7], структурная постоянная диэлектрической проницаемости в тропосфере линейно уменьшается с высотой (h) согласно выражению (2)

$$C_\varepsilon(h) = C_{\varepsilon 0} \left(1 - \frac{h - H_0}{H_T - H_0} \right), \quad (2)$$

где H_0 – равно 2–3 км для суши и 5 км для водной поверхности, H_T – равно 10 км. Усредняя высотный профиль структурной постоянной по значениям высоты (h), получим (3) средний коэффициент профиля

$$\int_h^z \left(1 - \frac{\xi - H_0}{H_T - H_0} \right) d\xi = \frac{2 \cdot H_T \cdot h - h^2 + z^2 - 2 \cdot H_T \cdot z}{\frac{2 \cdot (H_0 - H_T)}{z - h}}. \quad (3)$$

С учётом того, что $h = 0$ и $z = 10$ км окончательно получим (4), средний коэффициент профиля определится выражением

$$\frac{H_T}{2 \cdot (H_T - H_0)}. \quad (4)$$

Средний коэффициент профиля для суши ($H_0 = 3$ км) составит 0.714, для водной поверхности ($H_0 = 5$ км), в частности для островов Визе и Врангеля арктического региона [8] указанный коэффициент составит 1. Дисперсия тропосферного канала миллиметрового диапазона волн с учётом среднего коэффициента профиля составит (5)

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{16} (0.714 \cdot C_{\varepsilon_0})^2 L_0^{5/3} k^2 z = \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{16} \cdot 0.51 \cdot C_{\varepsilon_0}^2 L_0^{5/3} k^2 z. \quad (5)$$

Поскольку волновое число $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$, где c – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с); f – частота, то в соответствии с (5) следует, что при $R \gg L_0$ средний квадрат значения χ линейно зависит от длины пути (z) электромагнитной волны в тропосферном канале и квадратично от частоты (f).

Поэтому, с одной стороны, возрастание дисперсии (σ_χ^2) от частоты вызовет повышение вероятности ошибок. С другой стороны, увеличение частоты (уменьшение длины волны) при неизменных апертурах приемной и передающей антенн увеличит их кумулятивный коэффициент усиления, сконцентрирует электромагнитную энергию в меньшем телесном угле и, соответственно, повысит значение отношения сигнал/шум (ОШС), что в свою очередь должно приводить к снижению вероятности ошибок.

Вероятности ошибочного приема фазоманипулированных сигналов при когерентной демодуляции в тропосферном канале на линии ОКА – НСС. Как показано в [9], отношение сигнал/шум (ОШС), также, как и амплитуда, распределены в канале миллиметрового диапазона по логнормальному закону. Усредняя вероятности ошибок в гауссовом шуме [10] по статистике логнормальных замираний (флуктуаций амплитуды) определим вероятность ошибок (P_e) когерентного приема сигналов ФМ-2/ФМ-4 (QPSK – **Q**uadrature **P**hase **S**hift **K**ey) от частоты (f) при фиксированной длине пути радиосигнала в тропосфере. В [5] показана незначительная величина флуктуации фазы ($\langle S^2 \rangle$) при дифракции Фраунгофера. В полосе сигнала 10 ГГц, E -диапазоне (71–76; 81–86 ГГц) сигнал с модуляцией QPSK, со спектральной эффективностью 2 бит/с/Гц,

обеспечит скорость передачи данных 20 Гбит/с

$$P_e(f) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma} \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{0f}}} + \sigma_x^{2f} \right)^2}{2\sigma_x^2} \right] \operatorname{erfc}(\sqrt{a\gamma}) d\gamma, \quad (6)$$

где $a = 1$ для фазоманипулированных сигналов, γ и γ_0 , соответственно, мгновенное и среднее значения ОСШ.

В (6) при фиксированных: дистанции между передатчиком и приемником (z_1), мощности передатчика, среднее значение ОСШ (γ_{0f}) зависит только от частоты (7)

$$\gamma_{0f} = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi z_1)^2 (P_{\text{Noise}})_f \cdot 2} \lambda^2 \cdot e^{2\sigma_x^2} = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi z_1)^2 (P_{\text{Noise}})_f \cdot 2} \left(\frac{c}{f} \right)^2 \cdot e^{2\sigma_x^2}, \quad (7)$$

где P_t , $(P_{\text{Noise}})_f$, G_t , G_r – соответственно, мощности передатчика и шума на входе приемника, коэффициенты усиления передающей и приемной антенн. Эти коэффициенты определяются выражением:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_A \nu \eta = \frac{4\pi}{c^2} f^2 S_A \nu \eta, \quad (8)$$

где ν , η – коэффициент использования поверхности и КПД антенны (приняты при расчетах соответственно 0.5 и 0.95), S_A – геометрическая площадь раскрыва антенны. В соответствии с (8) в выражении (7) среднее значение ОСШ будет квадратично возрастать с частотой. Зависимость мощности шума от частоты обусловлена изменениями от этого параметра шумовой температуры антенны [11] и планковской поправки температуры.

Мощность передатчика ОКА составит от 5 Вт, расстояние (z_1) от передатчика ОКА до приёмника при высоте ОКА 400 км и при угле места приёмной антенны НСС 14.3° составит примерно 1208 км.

Мощность шума приёмника определяется шумовой температурой приёмной системы, а она, в свою очередь, включает шумы антенны и собственные шумы приемника. Шумовая температура антенны зависит от:

- атмосферного шума, который в E -диапазоне (71–76; 81–86 ГГц), при угле места антенны 14.3° [11], составляет примерно 173 К;
- шума реликтового излучения, около 3 К;
- планковской поправки температуры $\left(\frac{h \cdot f}{k}\right)$ для шумовой температуры, где h и k – соответственно, постоянные Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) и Планка ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц), f – частота излучения (~ 80 ГГц), составит 3.8 К.

Таким образом, шумовая температура антенны в целом составит 180 К.

Температура собственных шумов неохлаждаемого (~ 300 К) приемника с учетом потерь от просачивания в рупор шумов вне раскрыва зеркала антенны составляет (~ 0.49 дБ); потери в волноводах (~ 0.1 дБ) и коэффициента шума приемника 3 дБ составит 386 К.

Таким образом, общая шумовая температура приемной системы (T_{sys}) составит 566 К на частоте 80 ГГц.

Коэффициенты усиления на частоте 80 ГГц при диаметрах передающей и приемной антенн 0.3 и 3 м составят соответственно 44.43 и 64.43 дБ, коэффициент 2 в заместителе выражения (7) соответствует энергозапасу в 3 дБ для уверенного приема сигналов с высокой достоверностью.

Рассмотрим представленную зависимость с учетом зенитного затухания сигнала, определяемого в соответствии с рекомендациями сектора радиосвязи Международного Союза Электросвязи, Рекомендация МСЭ-R P.676-10 от 09/2013 по затуханиям радиосигнала в атмосферных газах [12].

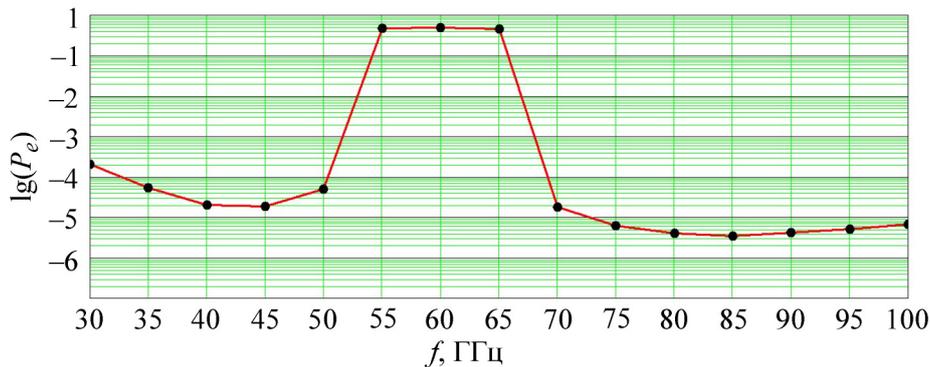


Рис. 1: Вероятности ошибок когерентного приема сигналов модуляции QPSK в зависимости от частоты в условиях логнормальных амплитудных флуктуаций при длине пути электромагнитной волны в тропосферном канале 40 км, расстоянии от ОКА до НСС 1208 км (угол места приёмной антенны НСС 14.3°), 5-ваттной мощности передатчика при общих затуханиях сигнала в тропосфере.

Введя в выражение (7) параметр дополнительного ослабления сигнала вследствие затухания, получим уточненные вероятности ошибок в зависимости от частоты (6) в диапазоне от 30 до 100 ГГц (рис. 1). При этом необходимо отметить, что шумовая температура антенны со значительным изменением частоты будет варьироваться в соответствии с рекомендациями [11], например, для частот 30 и 100 ГГц составит, соответ-

ственно, 60 и 180 К. Линейно от частоты будет увеличиваться планковская поправка температуры, с 1.44 до 4.8 К. Вероятности ошибок от частоты, в пределах от 30 до 100 ГГц, показаны для мощности передающего устройства 5 Вт.

Кривые на рис. 1 показывают оптимальные по критерию минимизации вероятности ошибок, значения несущих частот при вышеуказанных параметрах. Например, при заданной мощности передатчика (5 Вт), для реального канала связи, с учетом затухания сигнала в тропосфере [12], оптимальное значение несущей частоты будет 85 ГГц с вероятностью ошибки $3.5 \cdot 10^{-6}$. При обозначенной мощности передатчика средняя вероятность ошибочного приёма данных в диапазоне 70–90 ГГц (диапазон E) составит $7.13 \cdot 10^{-6}$. Значения вероятности ошибок на частотах 55–65 ГГц около 0.5 соответствуют сильным (до 180 дБ) затуханиям сигнала в тропосфере [12].

Применение модуляции с более высоким индексом, например, сигнал с модуляцией ФМ-16 со спектральной эффективностью 4 бит/с/Гц, обеспечит скорость передачи данных 40 Гбит/с в полосе 10 ГГц при увеличении мощности передатчика до 125 Вт.

Следует отметить, что помехоустойчивость передачи данных тропосферных линий связи может снижаться вследствие ослабления радиоволн в гидрометеорах.

Заключение.

1. Определены оптимальные по критерию минимизации вероятности ошибок частоты при заданных: дисперсии логнормальных флуктуаций амплитуды сигнала и значения ОСШ на входе приёмника.

2. Диапазон частот 70–90 ГГц является оптимальным для передачи данных по критерию минимизации вероятности ошибок.

3. Эстафетная передача данных эффективна при использовании в качестве ретранслятора ОКА. Наиболее предпочтительными для этого являются аппараты низкоорбитальных станций, обеспеченные приемлемыми энергетическими и весогабаритными показателями.

4. Передача данных через тропосферный канал связи в миллиметровом диапазоне может достигать достаточно высоких скоростей. Например, в E -диапазоне, при симплексной передаче, в полосе частот 10 ГГц, возможно обеспечение скорости 40 Гбит/с и выше использованием сигналов с более высоким индексом модуляции или параллельной передачей данных в многолучевом канале, используя антенную решётку с пространственным разделением лучей. В отличие от экспоненциального роста мощности передатчика одного канала при увеличении индекса модуляции, мощность передатчика в последнем случае возрастает линейно, от числа параллельных каналов (лучей).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. Н. Андрианов, Д. А. Корбаков, В. Н. Пожидаев, Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(8), 49 (2022). <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=49030948>.
- [2] М. Н. Андрианов, В. И. Костенко, Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(4), 12 (2023). <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=50396270>.
- [3] М. Н. Андрианов, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, Космические исследования **56**(1), 85 (2018). DOI: 10.1134/S001095251801001X.
- [4] Т. А. Каретникова, Диссертация на соискание уч. ст. к.ф.-м.н., Радиофизика. Физическая электроника (Саратовский национальный исследовательский университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, 2016).
- [5] С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский, *Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля* (М., Наука, 1978).
- [6] В. И. Татарский, *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М., Наука, 1967).
- [7] Т. Е. Рыжкина, Л. В. Федорова, Журнал радиоэлектроники, № 2, 2001. [Электронный ресурс] <http://jre.cplire.ru/jre/feb01/3/text.html>
- [8] М. Н. Андрианов, Д. А. Корбаков, В. Н. Пожидаев, Радиотехника и электроника **66**(8), 805 (2021). DOI: 10.1134/S1064226921080015.
- [9] М. Н. Андрианов, Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н., Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (Московский технический университет связи и информатики, Москва, 2009).
- [10] Б. Скляр, *Цифровая связь* (М., Вильямс, 2003). https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf
- [11] Рек. МСЭ-R P.372-13 (09/2016). Радишум.
- [12] Рек. МСЭ-R P.676-10 Общее затухание на наклонной трассе.

Поступила в редакцию 5 апреля 2023 г.

После доработки 26 мая 2023 г.

Принята к публикации 29 мая 2023 г.