

УДК 621.396.2

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

М. Н. Андрианов, В. И. Костенко

Выполнен анализ достоверности передачи данных в условиях логарифмически-нормальных (логнормальных) амплитудных флуктуаций, определяемых дифракцией Френеля на линии передачи сообщений космический аппарат – наземная станция слежения при когерентном методе приема сигналов в миллиметровом диапазоне. 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, френелевская дифракция, логнормальные амплитудные флуктуации.

Введение. В работе [1] рассматривалась возможность работы спутниковых линий связи миллиметрового диапазона в условиях передачи сигнала в научных экспериментах в дальнем космосе с соблюдением условий дифракции Фраунгофера, когда радиус первой зоны Френеля в возмущённом тропосферном канале значительно больше внешнего масштаба турбулентности. Однако, на практике возникают условия, когда передача данных реализуется по каналу связи, в котором радиус первой зоны Френеля больше внутреннего, но при этом он меньше внешнего масштаба турбулентности. Например, сигнал может передаваться от границы тропосферного и стратосферного слоёв атмосферы, с высоты 10 км. При этом длина тропосферного пути в зависимости от угла места приёмной антенны наземной станции слежения (НСС) может варьировать от 10 до 40 км, соответственно, 90 и 17.3°.

Астрокосмический центр ФИАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32; e-mail: mihail-andrian@mail.ru.

В настоящей работе выполнен анализ достоверности передачи данных на спутниковых линиях связи с учетом амплитудных флуктуаций радиоволн в атмосфере, в условиях френелевской дифракции, когда радиус первой зоны Френеля “вложен” между внутренним и внешним масштабами турбулентности, что ранее исследовалось мало [2, 3].

В рассматриваемой работе необходимо провести анализ по вероятности ошибок данных в канале спутниковой линии связи при наличии амплитудных флуктуаций. Как было показано в [4], применение миллиметрового (мм) диапазона, вследствие увеличения полосы частот канала связи, существенно повышает спектральную эффективность и пропускную способность беспроводной передачи данных наземно-космической радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (НКРСДБ) до скоростей, соизмеримых со скоростью записи цифровых широкополосных данных в бортовую память космического аппарата (КА). Это существенно увеличивает эффективность функционирования НКРСДБ. В Настоящей работе рассматривается эстафетная передача научных данных: от КА до летательного аппарата (ЛА-ретранслятора), расположенного на границе тропосферы/стратосферы, и далее от него на НСС.

Исследуем линию связи от ЛА к НСС протяжённостью 10 км (при соответствующем угле места приёмной антенны НСС 90°). Интервал от КА к ЛА является линией передачи данных через невозмущенное пространство (гауссовый канал с аддитивными шумами), не вносящей 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 диапазона, разработка которых ведётся в настоящее время в России и за рубежом [5]. Более детальное обсуждение данного вопроса выходит за рамки предполагаемой статьи.

Следует отметить, что данные могут также передаваться эстафетно через КА на околоземной орбите. В этом случае флуктуации сигнала вблизи приёмного устройства, ввиду относительно большого расстояния от КА до НСС, будут соответствовать дифракции Фраунгофера [1].

Дисперсия логнормальных амплитудных флуктуаций в зависимости от физических параметров тропосферы на линии ЛА – НСС. Для определения режимов дифракции в [6, 7] подробно рассмотрены варианты соотношения радиуса первой зоны Френеля (R) с внутренним и внешним масштабами турбулентности.

Поскольку предполагаемое расстояние передачи данных от передатчика ЛА к приёмнику НСС или путь по тропосферному каналу (z) составляет 10 км, при определённой длине волны (частоте) возможны ситуации, когда радиус первой зоны Френеля ($R = \sqrt{\lambda \cdot z}$) больше внутреннего (l_0) и меньше внешнего масштаба турбулентности (L_0). При этом внутренний масштаб турбулентности l_0 соответствует наименьшему размеру неоднородностей и обычно в условиях развитой турбулентности составляет 1–10 мм. Внешний масштаб турбулентности L_0 определяет верхнюю границу инерционного интервала и соответствует расстояниям, на которых сохраняется корреляция между флуктуациями показателя преломления, имеет размер примерно 10 м в приземном слое [7].

Тогда при $l_0 \gg R \gg L_0$ дисперсия определяется условиями френелевской дифракции [6]

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \approx NC_\epsilon^2 k^{7/6} z^{11/6}, \quad (1)$$

где C_ϵ – структурная постоянная диэлектрической проницаемости составляет примерно $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2/3}$ в приземном слое; константа $N \approx 0.077$; k – волновое число; z – длина пути радиосигнала по тропосфере.

Средний квадрат уровня χ равен дисперсии, поскольку он распределен нормально, с нулевым средним [6]. При этом влияние дифракции Фраунгофера невелико и преобладает режим дифракции Френеля или даже эффекты геометрической оптики от объектов с масштабом L_0 [6, 7].

Для формулировки условий реализации френелевской дифракции ($l_0 \gg R \gg L$) ограничимся длиной пути радиосигнала в тропосфере 10 км при угле места антенны 30° . Указанные условия будут безусловно соблюдаться, когда частота сигнала более 60 ГГц, и при этом R не превысит 7 м.

Поскольку волновое число $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$, где c – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$); f – частота, то в соответствии с (1) следует, что при $l_0 \gg R \gg L_0$ средний квадрат значения χ зависит от длины пути (z) электромагнитной волны в тропосферном канале почти квадратично и почти линейно от частоты (f).

Поэтому, с одной стороны, возрастание дисперсии (σ_χ^2) с частотой 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 ЛА – НСС. Как показано в [8], отношение сигнал/шум (ОСШ) так же как и амплитуда распределены в канале миллиметрового диапазона по логнормальному закону. Усредняя вероятности ошибок в гауссовом шуме по статистике логнормальных замираний (флуктуаций амплитуды) определим вероятность ошибок (P_e) когерентного приема сигналов ФМ-2/ФМ-4 (QPSK) от частоты (f) при фиксированной длине пути радиосигнала в тропосфере. Длительность логнормальных амплитудных флуктуаций составляет значения десятков секунд и время усреднения составит единицы минут. В отличие от амплитудных флуктуаций, средний квадрат флуктуации фазы ($\langle S^2 \rangle$) при дифракции Френеля определится не только влиянием неоднородностей мелкого масштаба, но в том числе и крупномасштабными неоднородностями, соизмеримыми или большего размера относительно радиуса первой зоны Френеля. Флуктуация при этом будет представлена не только френелевской, но и геометрооптической дисперсиями [6]. Средний квадрат флуктуации фазы составит при длине волны 4 мм на трассе длиной 10 км $5.31 \cdot 10^{-4}$ рад², среднеквадратичная ошибка (СКО), соответственно, $2.3 \cdot 10^{-2}$ рад (1.28°). При этом флуктуация фазы, как и флуктуация амплитуды, носит достаточно медленный характер [7], не приводит к быстрым частотным изменениям и не оказывает существенного влияния на работу демодулятора [9]. В [8] была получена зависимость вероятности ошибок (P_e) от среднего ОСШ (γ_0) для тропосферного канала связи

$$P_e(f) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma} \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0 f}} + \sigma_\chi^2 \right)^2}{2\sigma_\chi^2} \right] \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha\gamma}) d\gamma, \quad (2)$$

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

В (2) при фиксированных дистанциях между передатчиком и приемником, мощности передатчика и дисперсии канала, среднее значение ОСШ (γ_0) зависит только от частоты (3)

$$\gamma_0 f = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi z_1)^2 (P_{\text{Noise}})_f \cdot 2} \lambda^2 \cdot e^{2\sigma_\chi^2} = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi z_1)^2 (P_{\text{Noise}})_f \cdot 2} \left(\frac{c}{f} \right)^2 \cdot e^{2\sigma_\chi^2}, \quad (3)$$

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

определяться выражением:

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

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 (4) в выражении (3) среднее значение ОСШ будет квадратично возрастать с частотой. Зависимость мощности шума от частоты обусловлена изменениями от этого параметра шумовой температуры антенны [10] и планковской поправки температуры.

Мощность передатчика в точке расположения ЛА составит от 300 до 500 мВт.

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 90° [10], составляет примерно 54 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 (6.626×10^{-34} Дж/Гц);
- ν – частота излучения (~ 80 ГГц) составит 3.8 К.

Таким образом, шумовая температура антенны в целом составит 61 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 446.8 К на частоте 80 ГГц.

Коэффициенты усиления на частоте 80 ГГц при диаметрах передающей и приемной антенн 0.1 и 0.25 м составят, соответственно, 34.7 и 42.6 дБ, коэффициент 2 в знаменателе выражения (3) 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 [11].

Введя в выражение (3) параметр дополнительного ослабления сигнала вследствие затухания, получим уточненные вероятности ошибок в зависимости от частоты в диапазоне от 60 до 350 ГГц (рис. 1). При этом необходимо отметить, что шумовая температура антенны со значительным изменением частоты будет варьироваться в соответствии с рекомендациями [10], например, для частот 130 и 210 ГГц составит, соответственно, 95 и 181 К. Линейно от частоты будет увеличиваться планковская поправка температуры с 3.8 до 16.8 К при изменении частоты от 80 до 350 ГГц. Вероятности ошибок от частоты в пределах от 60 до 350 ГГц показаны для различных значений мощности передающего устройства от 300 до 500 мВт. Нижняя поверхность соответствует значениям вероятностей ошибок в отсутствие общих тропосферных зенитных затуханий, верхняя поверхность показывает вероятности ошибок при учёте этих затуханий [11].

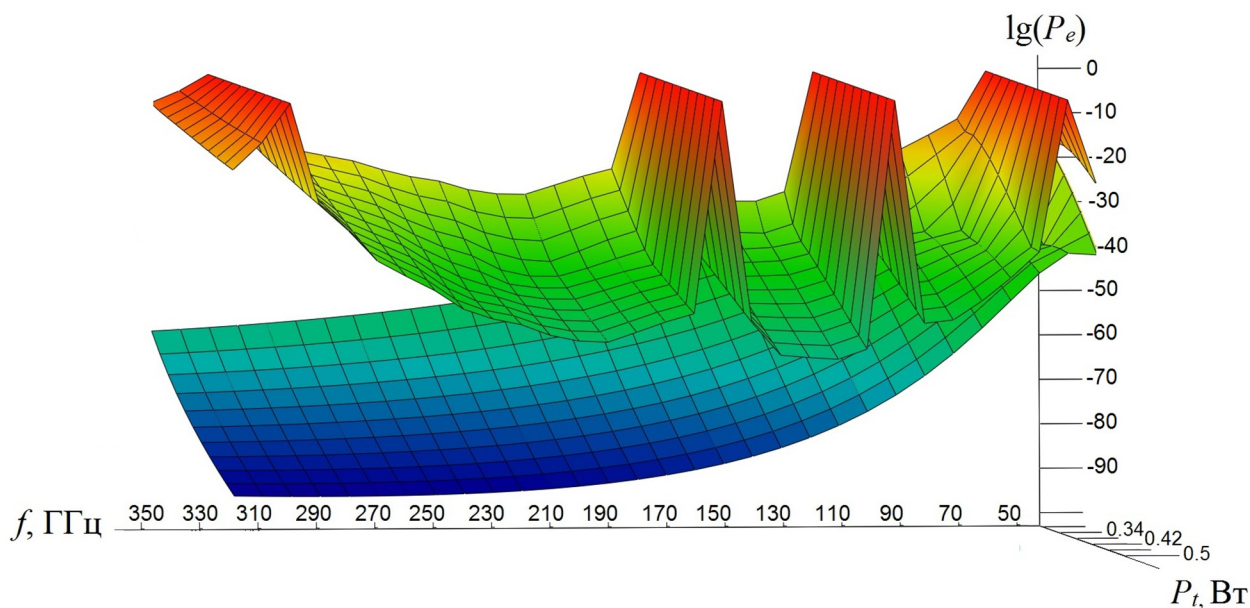


Рис. 1: Вероятности ошибок когерентного приема сигналов в зависимости от частоты в условиях логнормальных амплитудных флуктуаций при длине пути электромагнитной волны в тропосферном канале 10 км, различных мощностях передатчика, без учета затухания сигнала в тропосфере (нижняя поверхность) в сравнении вероятностями ошибок при общих затуханиях сигнала в тропосфере (верхняя поверхность).

Кривые на рис. 1 показывают оптимальные, по критерию минимизации вероятности ошибок, значения несущих частот при вышеуказанных параметрах. Например, при

мощности передатчика 300 и 500 мВт для реального канала связи с учетом затухания сигнала в тропосфере [11], оптимальные значения несущих частот составят 140 ГГц с вероятностями ошибок $1.7 \cdot 10^{-55}$ и $2.5 \cdot 10^{-74}$, соответственно. Однако для относительно безошибочной передачи данных можно реализовать связь в перспективном E -диапазоне. Например, при обозначенных мощностях передатчика вероятности ошибочного приёма данных в диапазоне 70–90 ГГц не превысят, соответственно, $3 \cdot 10^{-34}$ и $3.2 \cdot 10^{-39}$. Значения вероятности ошибок на частотах 60, 120, 180 и 330 ГГц около 0.5 соответствуют сильным (от 40 до 180 дБ) затуханиям сигнала в тропосфере [11].

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

Заключение.

1. Оптимальные частоты по критерию минимизации вероятности ошибок обусловлены: с одной стороны, снижением вероятности ошибок при увеличении частот из-за более высокой концентрации электромагнитной энергии на входе приемной антенны и, соответственно, увеличения ОСШ на входе приемника; с другой стороны, повышением вероятности ошибок вследствие почти линейного роста дисперсии логнормальных амплитудных флуктуаций от частоты и почти квадратичного роста от длины пути радиосигнала по тропосферному каналу.

2. Учет затуханий сигнала в тропосфере показывает целесообразность передачи сигналов не только при оптимальной, по критерию минимизации вероятности ошибок частоте, но и в диапазоне 70–90 ГГц с высокой достоверностью передачи данных.

3. Эстафетная передача данных возможна при использовании в качестве ретранслятора КА на околоземной орбите. В этом случае вследствие существенного увеличения дальности КА от НСС флуктуация сигнала вблизи приёмного устройства будет соответствовать дифракции Фраунгофера.

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 сигнал модуляции QPSK способен обеспечить скорость до 20 Гбит/с. Кроме того, при возможном расширении соответствующих соглашений о доступной полосе сигнала E -диапазона, можно будет пропорционально увеличить скорость передачи данных.

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 48(8), 49 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622080024.

- [2] Ю. А. Чернов, *Распространение радиоволн и прикладные вопросы* (М., Техносфера, 2017).
- [3] А. С. Дмитриев, Автореферат диссертации на соискание уч. ст. к.ф.-м.н. (Радиофизика, Иркутск, 2008).
- [4] М. Н. Андрианов, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, *Космические исследования* **56**(1), 85 (2018). DOI: 10.1134/S001095251801001X.
- [5] 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).
- [6] С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский, *Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля* (М., Наука, 1978).
- [7] В. И. Татарский, *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М., Наука, 1967).
- [8] М. Н. Андрианов, Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. (Московский технический университет связи и информатики, Москва, 2009).
- [9] Б. Скляр, *Цифровая связь* (М., Вильямс, 2003).
- [10] Рек. МСЭ-R P.372-13 (09/2016). Радиошум.
- [11] Рек. МСЭ-R P.676-10 Общее затухание на наклонной трассе.

Поступила в редакцию 14 января 2023 г.

После доработки 6 марта 2023 г.

Принята к публикации 7 марта 2023 г.