

ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОК В КАНАЛЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ЛИНИИ СВЯЗИ “КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ – НАЗЕМНАЯ СТАНЦИЯ СЛЕЖЕНИЯ” С УЧЁТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИКИ

М. Н. Андрианов¹, Д. А. Корбаков², В. Н. Пожидаев²

Выполнен анализ достоверности передачи данных в условиях логарифмически нормальных (логнормальных) амплитудных флуктуаций, определяемых дифракцией Фраунгофера на линии сообщения космический аппарат – наземная станция слежения при когерентном методе приема сигналов в миллиметровом диапазоне. При фиксированных путях радиосигнала по тропосфере показаны оптимальные частоты передачи сигналов по критерию минимизации вероятности ошибок. Показано минимальное влияние гидрометеоров на качество связи в климатических условиях Арктики.

Ключевые слова: спутниковая связь, телекоммуникации, распространение радиоволн, миллиметровые волны, дисперсия, Арктика, дифракция, логнормальные амплитудные флуктуации.

Введение. В работе [1] рассматривалась возможность работы спутниковых линий связи миллиметрового диапазона в условиях Арктики с учетом атмосферного затухания радиоволн. В этой работе выполнен анализ достоверности передачи данных на спутниковых линиях связи с учетом амплитудных флуктуаций радиоволн в атмосфере, что ранее исследовалось довольно мало.

Целью работы является анализ данных по вероятности ошибок в канале спутниковой линии связи из-за амплитудных флуктуаций. Как было показано в [2], применение

¹ Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32; e-mail: mihail-andrian@asc.rssi.ru.

² Институт Радиотехники и Электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009 Россия, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

миллиметрового (мм) диапазона, вследствие увеличения полосы частот канала связи, существенно повышает спектральную эффективность и пропускную способность беспроводной передачи данных наземно-космической радио интерферометрии (НКР) на линии космический аппарат – наземная станция слежения (КА – НСС) до скорости, соизмеримой со скоростью записи цифровых широкополосных данных в бортовую память КА. Это существенно увеличивает эффективность функционирования НКР [3].

В работе рассматривается линия связи передачи данных от космического плеча интерферометра к НСС на расстояние 1.5–1.75 млн км (из точки Лагранжа L_2).

Дисперсия логнормальных амплитудных флуктуаций в зависимости от физических параметров тропосферы на линии КА – НСС. В [4, 5] подробно рассмотрены варианты соотношения радиуса первой зоны Френеля с внутренним и внешними масштабами турбулентности для определения режимов дифракции

Поскольку предполагаемая дальность (z_1) КА порядка $1.5 \cdot 10^9$ м (т. Лагранжа L_2) [3], то для длины волны ($\lambda = 4$ мм) радиус первой зоны Френеля ($R = \sqrt{\lambda \cdot z_1}$) вблизи поверхности Земли составит около 2450 км, что значительно больше внешнего масштаба турбулентности ($L_0 \approx 10$ м около поверхности земли).

В этом случае, когда $R \gg L_0$, дисперсия определяется [4] как

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

где C_ε – структурная постоянная (структурная функция диэлектрической проницаемости) составляет примерно $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2/3}$ в приземном слое; z – длина пути радиосигнала по тропосфере.

Средний квадрат уровня χ равен дисперсии, поскольку он распределен нормально, с нулевым средним [4]. При этом влияние френелевской дифракции невелико и преобладает режим дифракции Фраунгофера [4, 5]. Масштаб неоднородностей a пропорционален радиусу корреляции флуктуаций диэлектрической проницаемости [4] и всегда меньше вихрей внешнего масштаба турбулентности (L_0). Например, в [6] сообщается, что “в локально однородном поле турбулентной атмосферы, для которого структурная функция пространственной флуктуации диэлектрической проницаемости подчиняется закону “двух третей” Колмогорова–Обухова, радиус показателя преломления составляет $0.35L_0$ ”.

Примем $a = L_0$ для ограничения сверху среднего квадрата уровня χ . В этом случае дисперсия, и, соответственно, вероятность ошибки, определенная при $a < L_0$, не превысит вероятность ошибки, определенной при $a = L_0$. С учетом последнего допущения

[6] дисперсия логнормальных амплитудных флуктуаций составит

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

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 (2) следует, что при $R \gg L_0$ средний квадрат уровня χ зависит от длины пути электромагнитной волны по тропосферному каналу (z) линейно и квадратично от частоты.

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 коэффициент усиления, сконцентрирует электромагнитную энергию в меньшем телесном угле и, соответственно, повысит значение отношения сигнал/шум (ОШС), что в свою очередь должно привести к снижению вероятности ошибок.

Вероятности ошибочного приема фазоманипулированных сигналов при когерентной демодуляции в тропосферном канале на линии КА – НСС. Как показано в [7] ОШС, как и амплитуда, в канале миллиметрового диапазона распределено по логнормальному закону. Усреднением вероятностей ошибок в гауссовом шуме по статистике логнормальных замираний (флуктуаций амплитуды) в тропосферном канале определим вероятность ошибок (P_e) для когерентного приема сигналов ФМ-2/ФМ-4 (QPSK) от частоты (f) при фиксированном расстоянии (длине пути радиосигнала по тропосфере). Длительность логнормальных амплитудных флуктуаций составляет до десятков секунд, поэтому время усреднения составит единицы минут. Средний квадрат флуктуации фазы ($\langle S^2 \rangle$) при дифракции Фраунгофера определяется [4] дисперсией уровня (2), и, например, при длине пути радиосигнала по тропосфере 10 км составит 0.045 рад. (2.57°). При этом флуктуация фазы, как и флуктуация амплитуды, носит достаточно медленный характер [5], не приводит к быстрым частотным изменениям и не оказывает существенного влияния на работу демодулятора [8]. В [7] была получена зависимость вероятности ошибок (P_e) от среднего ОШС (γ_0) для тропосферного канала связи

$$P_e(f) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma} \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0 f}} + \sigma_\chi^2 f \right)^2}{2\sigma_\chi^2} \right] \operatorname{erfc}(\sqrt{a\gamma}) d\gamma, \quad (3)$$

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

В (3) при фиксированных: расстоянии (между передатчиком и приемником) и мощности передатчика, среднее ОСШ зависит только от частоты. При этом среднее значение ОСШ (γ_{0f}) составит

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

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

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_A \nu \eta = \frac{4\pi}{c^2} f^2 S_A \nu \eta, \quad (5)$$

где ν , η – коэффициент использования поверхности и КПД антенны (приняты при расчетах соответственно 0.5 и 0.95), S_A – геометрическая площадь раскрытия антенны. В соответствии с (5) в выражении (4) среднее значение ОСШ будет квадратично возрастать с частотой.

Мощность передатчика в точке Лагранжа составит 200 Вт, мощность шума в полосе частот 5 ГГц, при температуре приемника 50 К, коэффициенте шума приемника 3 дБ составит $7 \cdot 10^{-11}$ Вт, коэффициенты усиления на частоте 75 ГГц (E -диапазон, 71–76; 81–86 ГГц) при диаметрах передающей и приемной антенн 2 и 15 м составят соответственно 60.7 и 78.2 дБ, коэффициент 2 в знаменателе выражения (4) соответствует энергозапасу в 3 дБ для уверенного приема сигналов с высокой достоверностью. Выбор E -диапазона обусловлен с одной стороны относительно малой величиной зенитного затухания сигнала [9], с другой стороны более высоким коэффициентом усиления антенн в сравнении с более низкими частотами миллиметрового диапазона (30–40 ГГц).

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 [9].

Введя в выражение (4) параметр дополнительного ослабления сигнала вследствие затухания, с учетом различных длин путей электромагнитной волны по тропосферному каналу (z) получим уточненные вероятности ошибок от частоты в диапазоне от 30 до 100 ГГц (рис. 1). Вероятности ошибок представлены в сравнении с вероятностями ошибок при отсутствии затухания сигнала для соответствующих углов наклона антенны, при которых длины путей электромагнитной волны по тропосферному каналу (z) соответственно составят 10; 20; 30 и 40 км. Вероятности ошибок определены при фикс-

сированных мощности передатчика и длины линии связи $1.5 \cdot 10^9$ м (из т. Лагранжа L_2). Зависимости представлены на рис. 1.

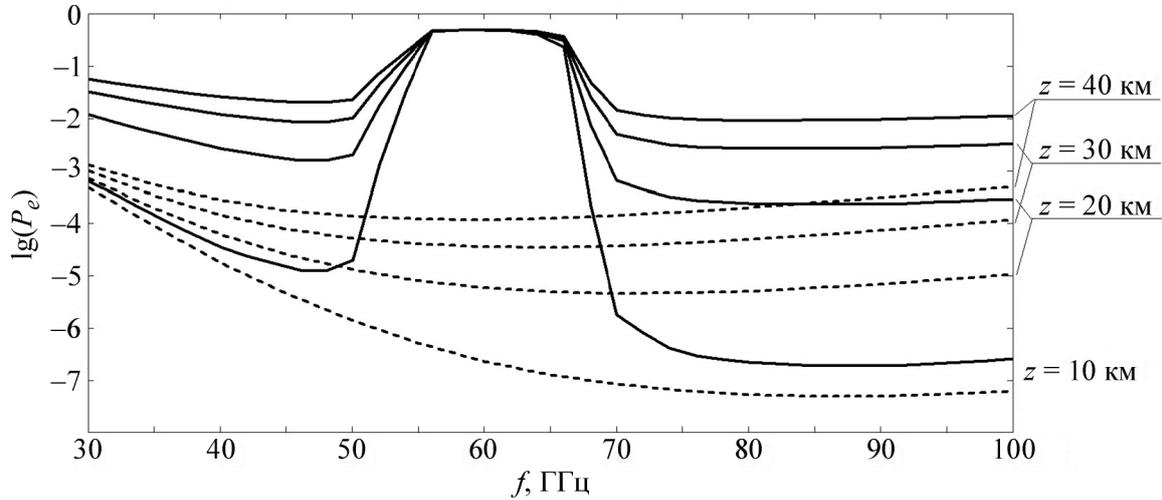


Рис. 1: Вероятности ошибок когерентного приема сигналов от частоты в условиях логнормальных амплитудных флуктуаций при различных длинах путей электромагнитной волны по тропосферному каналу с учетом затухания сигнала в тропосфере (сплошные кривые) в сравнении вероятностями ошибок без учета затухания сигнала в тропосфере (пунктирные).

Кривые на рис. 1 показывают оптимальные, по критерию минимизации вероятности ошибок, значения несущих частот при вышеуказанных параметрах. Например, для реального канала связи, с учетом затухания сигнала в тропосфере [9], оптимальные значения несущих частот при z , равном 10, 20, 30, 40 км, составят соответственно 88, 86, 84, 80 ГГц с вероятностями ошибок $1.89 \cdot 10^{-7}$, $2.29 \cdot 10^{-4}$, $2.61 \cdot 10^{-3}$, $9 \cdot 10^{-3}$.

Оптимальные значения частот сосредоточены преимущественно в перспективном (с точки зрения высокого коэффициента усиления антенн, широкой полосы частот для обеспечения высокой скорости передачи сообщений) E -диапазоне.

Вероятности ошибок можно дополнительно снизить применением высокоэффективных современных случайных кодов [10], сделав их пренебрежительно малыми. Однако рассмотрение данной тематики, несмотря на её актуальность, выходит за рамки статьи.

Помехоустойчивость передачи данных для случая НКР из точки Лагранжа L_2 и для спутниковых линий связи может снизиться вследствие ослабления радиоволн в гидрометеорах.

Как показано в [1] воздушные массы в арктическом регионе достаточно сухие. Например, вероятность даже небольшой интенсивности дождя 0.1 мм/ч составляет всего 1% и снижается по мере возрастания интенсивности. В связи с этим для обеспечения более высоконадёжной передачи данных НКР в миллиметровом диапазоне от КА к НСС, станции слежения целесообразно, по мере возможности, размещать в высокоширотных зонах Арктики.

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 увеличением ОСШ на входе приемника; с другой стороны, повышением вероятности ошибок вследствие квадратичного роста дисперсии логнормальных амплитудных флуктуаций от частоты и линейного роста от длины пути радиосигнала по тропосферному каналу.

2. Учет затуханий сигнала в тропосфере показывает нецелесообразность передачи сигналов в диапазоне 50–70 ГГц, при этом вероятность ошибок приема сигналов в диапазоне 55–65 ГГц близка к 0.5.

3. Оптимальное значение частот на линии связи КА–НСС предполагает передачу данных на частотах перспективного *E*-диапазона. Снижение помехоустойчивости передачи данных вследствие возможного ослабления радиоволн в гидрометеорах является незначительным из-за малой концентрации водяного пара в атмосфере арктического региона. По этой причине в арктической зоне целесообразно размещать не только станции слежения, но и наземные радиотелескопы для приёма научных астрофизических данных.

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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Н. Андрианов, Д. А. Корбаков, В. Н. Пожидаев, Радиотехника и электроника **66**(8), 805 (2021). DOI: 10.1134/S1064226921080015.

- [2] М. Н. Андрианов, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, *Космические исследования* **56**(1), 85 (2018). DOI: 10.1134/S001095251801001X.
- [3] И. Д. Новиков, С. Ф. Лихачёв, Ю. А. Щекинов и др., *Успехи физических наук* **191**(4), 404 (2021). DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.12.038898>.
- [4] С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский, *Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля* (М., Наука, 1978).
- [5] В. И. Татарский, *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М., Наука, 1967).
- [6] Я. М. Цейтлин, *Нормальные условия измерений в машиностроении* (Л., Машиностроение, 1981).
- [7] М. Н. Андрианов, Разработка субоптимальных алгоритмов повышения эффективности систем подвижной радиосвязи. Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н., Радиотехника в том числе системы и устройства телевидения (Московский технический университет связи и информатики, Москва, 2009).
- [8] Б. Скляр, *Цифровая связь* (М., Вильямс, 2003).
- [9] Рек. МСЭ-R P.676-10 Общее затухание на наклонной трассе. Rec. ITU-R P.676-10 Attenuation by atmospheric gases. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf
- [10] *Moon Error Correction Coding* (Wiley Interscience, 2005).

Поступила в редакцию 23 июня 2022 г.

После доработки 7 июля 2022 г.

Принята к публикации 8 июля 2022 г.