

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.14>

УДК 621.396.2

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ТРОПОСФЕРНОГО КАНАЛА НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

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

¹ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,
119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

² Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2020 г.

Аннотация: Рассмотрены алгоритмы обеспечения высокой скорости и достоверности передачи данных в условиях логнормальных амплитудных флуктуаций, обусловленных дифракцией Фраунгофера в тропосферном канале спутниковой связи при когерентном методе приема сигналов. Показана возможность высокоскоростной передачи данных с высокой достоверностью в миллиметровом диапазоне радиоволн в условиях Арктики. Отмечено преимущество когерентного приема сигналов миллиметрового диапазона со случайным помехоустойчивым кодом.

Ключевые слова: спутниковая связь, телекоммуникации, распространение радиоволн, миллиметровые волны, Арктика, широкополосный интернет.

Abstract. Algorithms for ensuring the high speed and reliability of data transmission under conditions of lognormal amplitude fluctuations caused by Fraunhofer diffraction in the tropospheric satellite communication channel with a coherent method of receiving signals are in the focus of the paper. It is shown that the use of millimeter(mm) radio waves in satellite communication lines in the Arctic significantly increases the transmission speed due to the increase in the channel frequency band, especially in comparison with communication lines of the decimeter and centimeter ranges. However, fluctuations in the signal amplitude resulting from tropospheric turbulence reduce noise immunity and data transfer rate. These factors determine the following features of the use of mm-range radio waves when

organizing satellite communication channels. The advantage of using mm radio waves in the Arctic is the fact that the average probability of rain rate, for example, 33 mm/h will be 0.001%, while in the middle and southern latitudes of the Earth, the more intensive rains are more probable. For example, the rain rate 50 mm/h will result in an attenuation of the radio signal by about 10 dB. Compared to an attenuation of 4.7 dB (33 mm/h), this necessitates an almost double increase in transmitter power. Since the probability of rain intensity (33 m/h) is 0.001%, and rain intensity (2 m/h) is 0.1%, it becomes possible to receive a radio signal with a higher signal-to-noise ratio 90% of the time, which in turn allows a significant time interval to disable error-correcting coding. This increases the flexibility of the satellite communication system, increases its reliability and data transmission speed.

Key words: satellite communications, telecommunications, radiowave propagation, millimeter waves, the Arctic meteorological data.

Введение

В статье [1] показана принципиальная возможность спутниковой связи в миллиметровом (мм) диапазоне радиоволн для акваторий арктической зоны Земли. В данной работе предлагается более детальный анализ возможностей повышения скорости и помехоустойчивости (достоверности) передачи информационных сообщений.

Увеличение полосы частот канала связи в мм диапазоне в соответствии с теоремой Шеннона-Хартли [2] существенно повышает спектральную эффективность и пропускную способность беспроводной передачи спутниковых систем связи, обеспечивая тем самым бесперебойную работу теле-радио устройств, автоматических систем управления, командных радиолиний в перспективных районах Арктики и Крайнего севера.

При распространении в турбулентной атмосфере логнормальные флуктуации амплитуды волны $A(t)$ радиосигналов мм и субмм диапазонов могут быть выражены через нормально распределенный уровень χ [3] с нулевым средним. Экспериментальные данные хорошо подтверждают вывод о

нормальности распределения вероятности для χ в тех случаях, когда применимо первое приближение метода плавных возмущений [3] (1)

$$C_\varepsilon^2 k^{1/3} z \ll 1 \quad (1)$$

где C_ε – структурная постоянная (структурная функция диэлектрической проницаемости); k – волновое число ($2 \cdot \pi / \lambda$), где λ – длина волны; z – длина пути электромагнитной волны по каналу с логнормальными флуктуациями (по тропосферному каналу). При $C_\varepsilon = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$; $\lambda = 0.004 \text{ м}$; $z < 400 \cdot 10^3 \text{ м}$ указанное неравенство соблюдается. Указанное значение C_ε является повышенным значением. Поскольку логарифм амплитуды, как и уровень χ , распределен по нормальному закону, то сама амплитуда $A(t)$ и нормированная амплитуда $X(t) = \frac{A(t)}{A_0}$ имеют логарифмически нормальное распределение (A_0 – амплитуда волны в невозмущенной среде).

Следует иметь в виду, что плотность вероятности отношения сигнал/шум(ОШС) сигналов мм диапазона для атмосферного канала также описывается логнормальным законом [4, 5], а его дисперсия, наряду с длиной волны, зависит от дальности распространения по тропосфере, которая в свою очередь зависит угла места антенны [3, 6]. Плотность вероятности ОШС представлена выражением (2)

$$p(\gamma) = \frac{1}{2\gamma \sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0}} + \sigma_\chi^2 \right)^2}{2\sigma_\chi^2} \right] \quad (2)$$

где σ_χ^2 – дисперсия логнормального процесса, γ и γ_0 соответственно мгновенное и среднее значение ОСШ на входе приемного устройства.

Дисперсия в (2) определяется в зависимости от соотношения радиуса (R) первой зоны Френеля (3)

$$R = \sqrt{\lambda \cdot z_1} \quad (3)$$

с внутренним и внешним масштабами турбулентности [3, 6]. В (3) z_I общая длина пути распространения электромагнитной волны от передающей антенны. Известно [7], что внутренний масштаб турбулентности (l_0) определяется кинематической вязкостью воздуха (ν) по формуле

$$l_0 = 4 \sqrt[4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon}} \quad (4)$$

и имеет порядок размерности в приземистом слое примерно 1мм. В (4) ε – скорость диссипации энергии турбулентности [7].

Внешний масштаб турбулентности (L_0) определяется турбулентными вихрями, описываемыми законом Колмогорова-Обухова для изотропных сред и обусловлен неравномерностью нагрева воздуха. Порядок величины L_0 соответствует динамическому диапазону (L_0/l_0) турбулентности [7] 10^3 - 10^4 и составляет примерно 10 м в приземном слое.

Когда радиус первой зоны Френеля значительно меньше внутреннего масштаба турбулентности ($R \ll l_0$), дисперсия определяется методом геометрической оптики в зависимости от случайных фокусировок-расфокусировок (линзирования) объектов размеров порядка l_0 и возрастает кубически (5) в зависимости от расстояния [3]

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 = \frac{z^3}{24} \cdot \int_0^\infty [\Delta_\perp^2 \psi_\varepsilon(\rho, \zeta)]_{\rho=0} d\zeta \quad (5)$$

Если радиус первой зоны Френеля существенно превосходит внутренний масштаб турбулентности и значительно меньше внешнего масштаба $L_0 \gg R \gg l_0$, то в этом случае эффект фокусировки от объектов с размерами порядка l_0 , описываемый методом геометрической оптики, влияет слабо. Для этого случая при определении дисперсии характерный вклад дает не режим дифракции Фраунгофера, а френелевская дифракция [3] или даже геометрическая оптика от объектов размерности L_0 . В этом случае средняя квадратичная флуктуация амплитуды (дисперсия) френелевской дифракции (6) возрастает от расстояния почти квадратично

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 = \psi_\chi(0, z) = N \cdot C_\varepsilon^2 \cdot k^{7/6} \cdot z^{1/6} \quad (6)$$

где N – числовая константа, равная $N = \frac{\pi^2 A}{2} \int_0^\infty \left(1 - \frac{\sin t^2}{t^2}\right) t^{-8/3} dt \approx 0,077$, A – постоянный множитель, равный 0,033 [3].

1. Флуктуации амплитуды электромагнитной волны в тропосферном радиоканале спутниковой связи миллиметрового диапазона как результат фраунгоферовой дифракции

Для систем спутниковой связи мм диапазона радиус первой зоны Френеля, при длине волны 0.01 м, значительно больше внешнего масштаба турбулентности, $R \gg L_0$ даже при минимальном расстоянии от космического аппарата (КА) до приёмника на земной поверхности (1400 км). При этом дисперсия определяется [3] как (7)

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 = \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{8} \cdot \sigma_\varepsilon^2 \cdot k^2 \cdot a \cdot z \cdot \left(1 - \frac{\text{arctg} D}{D}\right) \quad (7)$$

где σ_ε^2 – дисперсия флуктуаций диэлектрической проницаемости; a (поперечник раскрыва излучения) – параметр, характеризующий неоднородность поля внешнего масштаба турбулентности (L_0); D – волновой параметр, определяемый как

$$D = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot z}{l_0^2}. \quad (8)$$

Известно, что при $D \gg 1$, в случае фраунгоферовой дифракции и в пределах первой зоны Френеля с радиусом $\sqrt{\lambda \cdot z_1}$, уместается много неоднородностей поля, соответствующих радиусу корреляции L_0 флуктуации диэлектрической проницаемости [7] для внешнего масштаба турбулентности (l_ε). Поэтому в силу центральной предельной теоремы теории вероятностей закон распределения величин a приближается к нормальному. Нормализация этих величин обусловлена «фильтрующим» действием свободного пространства и имеет такую же природу, как и нормализация временных сигналов на выходе

узкополосных фильтров [3]. Соответственно, в среде распространения, при условии $R \gg L_0$ корреляционная функция флуктуации диэлектрической проницаемости описывается (9) гауссовой кривой

$$\psi_\varepsilon(r) = \sigma_\varepsilon^2 \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2 \cdot a}\right), \quad (9)$$

и при этом размер неоднородностей характеризуется единственным масштабом a .

Из (8) следует, что волновой параметр пропорционален соотношению квадратов радиуса первой зоны Френеля и внутреннего масштаба турбулентности и возрастает линейно от z . В этом случае, при условии $R \gg L_0$, влияние френелевской дифракции невелико и преобладает режим дифракции Фраунгофера. В моменты, когда радиус первой зоны Френеля соизмерим с внутренним или внешним масштабами турбулентности, существенно влияние геометрической оптики и френелевской дифракции или френелевской дифракции в сочетании с дифракцией Фраунгофера.

Известно, что при достаточно больших z , когда $z \gg L_0$, структурная функция [3] испытывает насыщение и будет равна удвоенной дисперсии диэлектрической проницаемости

$$D_\varepsilon(z) = D_\varepsilon(\infty) = C_\varepsilon^2 \cdot L_0^{2/3} = 2 \cdot \sigma_\varepsilon^2. \quad (10)$$

С учетом (10) и при условии, что при $D \gg 1$ в (7) членом $\arctg D/D$ можно пренебречь, средний квадрат уровня χ составит (11)

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{16} \cdot C_\varepsilon^2 \cdot L_0^{2/3} \cdot k^2 \cdot a \cdot z. \quad (11)$$

Масштаб неоднородностей a пропорционален радиусу корреляции флуктуации диэлектрической проницаемости и всегда меньше вихрей внешнего масштаба турбулентности (L_0). Примем $a = L_0$ для ограничения сверху среднего квадрата уровня χ . С учетом последнего допущения дисперсия логнормального процесса составит (12)

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \pi}}{16} \cdot C_\varepsilon^2 \cdot L_0^{5/3} \cdot k^2 \cdot z. \quad (12)$$

Из (12) следует, что при $R \gg 1$ средний квадрат уровня χ зависит от длины пути электромагнитной волны по тропосферному каналу (z) линейно. На рис. 1 представлены зависимости указанного среднего квадрата (дисперсии) от длины пути электромагнитной волны по тропосферному каналу (z) при $R \gg L_0$ и при $L_0 \gg R \gg l_0$ для $\lambda = 10$ мм (30 ГГц).

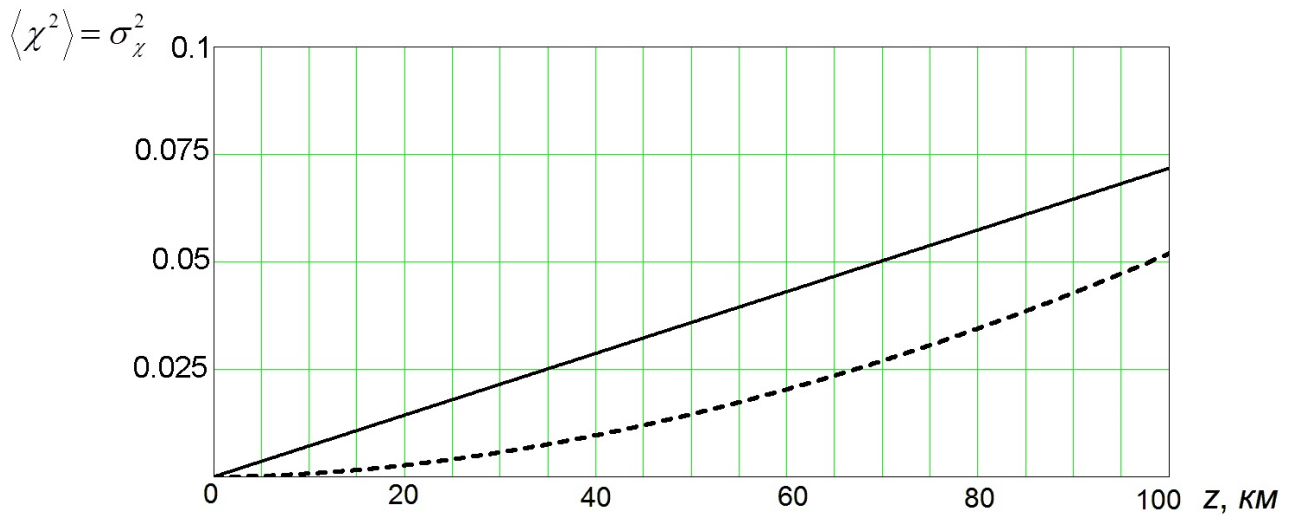


Рис. 1. Зависимость дисперсии уровня χ от z при $R \gg L_0$ (сплошная прямая) и при $L_0 \gg R \gg l_0$.

Как видно из графика и в соответствии с (9), на начальном участке длины пути (z) дисперсия уровня при $R \gg L_0$ существенно превосходит дисперсию для случая, когда радиус первой зоны Френеля существенно отличается от внешнего и внутреннего масштабов турбулентности ($L_0 \gg R \gg l_0$), поскольку несмотря на линейную зависимость от z , коэффициент (волновое число) k^2 для столь малой длины волны велик. Например, при $z = 56.2$ км (угол места 10°) дисперсия составит около 0.04.

При значении z_1 порядка $1.4 \cdot 10^6$ м и длине волны 1 см, радиус первой зоны Френеля вблизи поверхности Земли составит около 118 м, что значительно больше внешнего масштаба турбулентности (L_0). Поэтому в данном случае режим дифракции Фраунгофера обеспечит быстрый рост дисперсии уровня χ от z . При возрастании (z_1) расстояния от КА до наземной приёмной станции

радиус первой зоны Френеля будет только увеличиваться.

2. Вероятности ошибочного приема фазоманипулированных сигналов в тропосферном канале при когерентной демодуляции

Выражение (2) описывает плотность вероятности мгновенного значения ОСШ в тропосферном канале. На рис. 2 представлена указанная плотность при среднем значении ОСШ (γ_0) 10 дБ и разных значениях дисперсии. Из анализа кривых следует, что при возрастании дисперсии вероятность мгновенного значения ОСШ смещается в область низких значений.

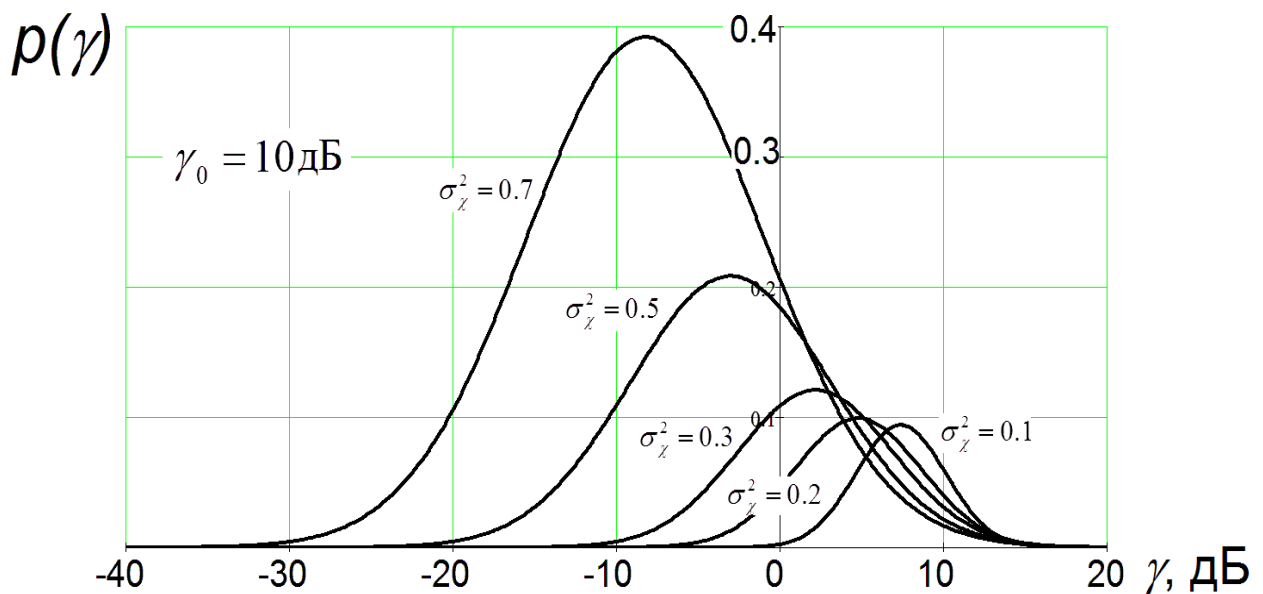


Рис. 2. Плотности вероятности мгновенного значения ОСШ в тропосферном канале при $\gamma_0=10$ дБ и различных значениях дисперсии (σ_χ^2).

Усреднением вероятностей ошибок в гауссовом шуме по статистике логнормальных замираний в тропосферном канале определим вероятность ошибок для когерентного (13) приема сигнала ФМ-2/ФМ-4 от среднего значения ОСШ (γ_0)

$$P_c(\gamma_0) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\ln \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0}} + \sigma_\chi^2 \right)^2}{2\sigma_\chi^2} \right] \cdot \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha\gamma} d\gamma \quad (13)$$

где $\alpha = 1$ для фазоманипулированных сигналов. Зависимости вероятности ошибок когерентного приема сигналов при разных значениях дисперсии представлены рис. 4.

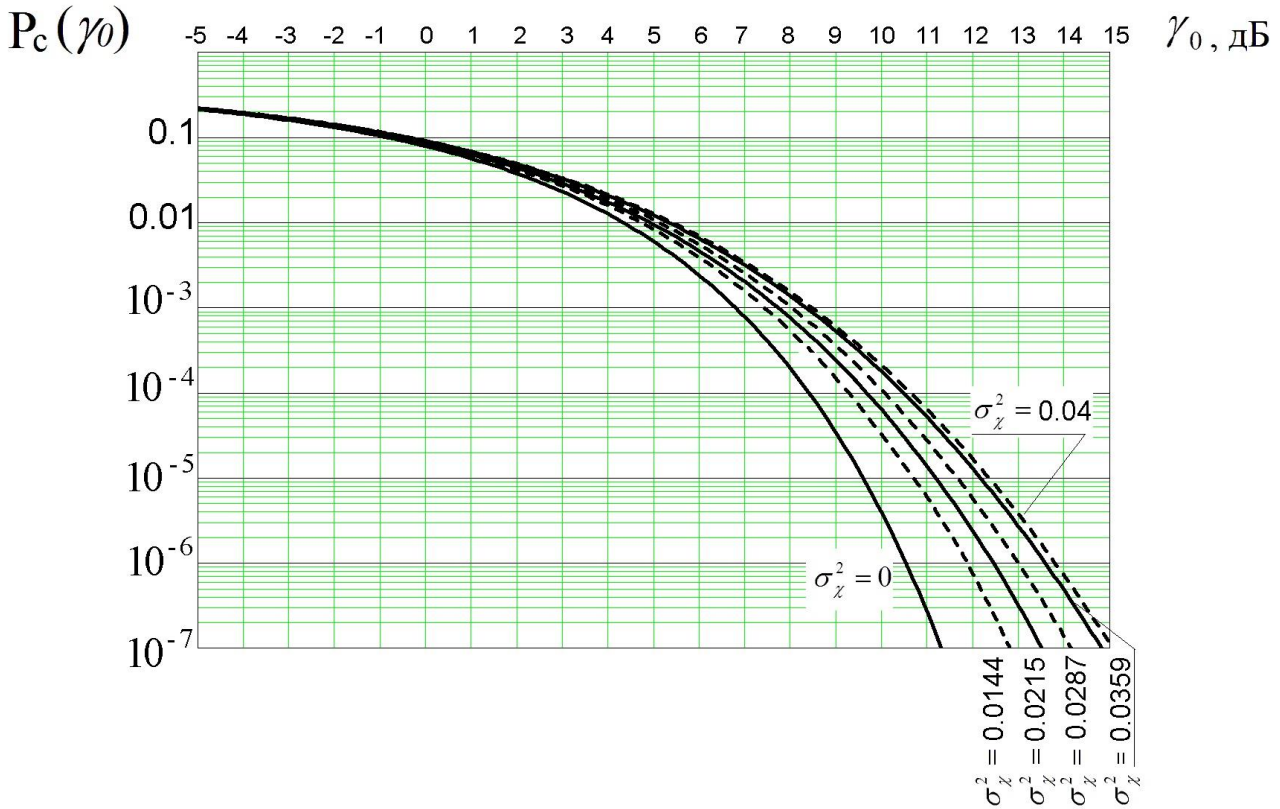


Рис. 4. Вероятности ошибок когерентного приема сигналов при разных значениях дисперсии.

Некогерентный прием сигналов отличается от когерентного приема более простым демодулятором, в котором не происходит выделение несущей частоты сложными схемами с использованием узкополосного полосового фильтра [8, 9]. Определение значения бита/символа происходит сравнением n и $n+1$ символов. Кроме того, некогерентный демодулятор менее инерционен, при появлении сигнала достаточно быстро, начиная со второго символа выполняется его демодуляция [8].

Когерентный прием сигналов обеспечивается выделением несущей когерентной опоры, относительно которой происходит выделение фазы принимаемого сигнала [8, 9]. Этот демодулятор более сложен и инерционен, поскольку схема выделения несущей опорной частоты содержит узкополосный

полосовой фильтр, обеспечивающий фильтрацию принятого сигнала от шумов, что в свою очередь обеспечивает большую помехоустойчивость (меньшую вероятность ошибки при заданном значении ОСШ). Узкая полоса фильтра определяет точность выделения когерентной опоры, при этом предъявляются дополнительные требования к каналу передачи данных [9].

Интервал корреляции флуктуации амплитуды и фазы сигнала определяется изменением диэлектрической проницаемости, которая в свою очередь влияет на вариации показателя преломления [7], составляет от единиц до десятков секунд. Исходя из этого, канал передачи данных является относительно спокойным. В этом случае целесообразно применять когерентный демодулятор, который, несмотря на относительную сложность, более помехоустойчив относительно некогерентного.

Например, для значения ОСШ 13.57 дБ (при скорости передачи данных в симплексе до 8 Гбит/с в полосе частот 4 ГГц с модуляцией сигнала ФМ-4), для случая нахождения передатчика в максимальной дальности от приемника (3484 км), при угле места антенны 10° , длине пути по тропосферному каналу (z) 56.2 км дисперсия составит (σ_χ^2) около 0.04 (рис. 2). При этих условиях вероятность ошибки когерентного приема (рис. 4) составит менее $2 \cdot 10^{-6}$, что вполне пригодно для передачи аудиовизуальных данных. Применение помехоустойчивого кодирования, например, используя случайный помехоустойчивый евклидово-геометрический LDPC код с линейным расширением и итеративным SPA (Sum-Product Algorithm) декодированием [10] позволит снизить вероятность ошибки до 10^{-11} и менее, что особенно актуально для передачи максимально достоверных данных по командным радиолиниям к автоматическим и роботизированным системам управления.

Плотность вероятности логнормального процесса для флуктуации амплитуды и мгновенного значения ОСШ получены, когда применимо первое приближение метода плавных возмущений [3], при этом экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими вплоть до значений дисперсии

$\sigma_{\chi}^2 \leq 1$. В представленных примерах (рис. 2) это соблюдается.

Структурная функция диэлектрической проницаемости (C_{ε}) для расчётов была принята равной $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$, что соответствует её значению в летний период [11]. Экспериментальные исследования, выполненные в Дмитровском районе Московской области совместно ИРЭ РАН и МГТУ им. Баумана на базе радиотелескопа ММ диапазона РТ-7,5 ($\lambda=7.5$ мм) [11] показали измеренные значения структурной постоянной не более $0.091 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$ для середины января ($t^{\circ} = -8.6^{\circ}\text{C}$) и не более $0.28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$ для середины мая ($t^{\circ} = +17.6^{\circ}\text{C}$). Как показано в [1], характерные приземные значения среднемесячных температур воздуха в июле месяце для островов Визе и Врангеля соответственно равны 0 и 2.1°C , что существенно ниже майской температуры, при которой были выполнены измерения структурной постоянной [11], представленные выше. Это позволяет допустить представленные расчёты вероятностей ошибок спутниковой системы связи в условиях логнормальных амплитудных флуктуаций как верхнюю границу.

В настоящее время наряду с изотропной Колмогоровой турбулентностью, именуемой некогерентной, интенсивно изучается когерентная турбулентность [12]. Спектр когерентной турбулентности более узкий, быстроспадающий относительно спектра некогерентной структуры. Благодаря этому когерентная турбулентность представляет собой солитонный тип от уединенной упорядоченной ячейки Бенара, до систем, периодически распределенных в пространстве гидродинамических возмущений, типа систем разнообразных валов. Причем наиболее крупными, с радиусом до 5000 км, являются ячейки Ферреля и Гадлея (Ferrell, Hadley) [12]. Их можно рассматривать как разновидность ячеек Бенара в тонком сферическом слое (в масштабах Земли). В этом типе когерентной турбулентности нормальности распределенного уровня χ уже не будет и параметры случайного сигнала в данном типе турбулентности

необходимо определять экспериментально методом индуктивной статистики по выборке случайных величин [13].

Заключение

Применение мм радиоволн в спутниковых линиях связи в условиях Арктики существенно увеличивает скорость передачи вследствие увеличения полосы частот канала, особенно в сравнении с линиями связи дециметрового и сантиметрового диапазонов. Однако флуктуации амплитуды сигнала, возникающие вследствие турбулентности тропосферы, снижают помехоустойчивость и скорость передачи данных. Указанные факторы определяют следующие особенности использования радиоволн мм диапазона при организации спутниковых каналов связи:

1. преимуществом применения мм диапазона радиоволн в Арктике является тот факт, что средняя вероятность интенсивности дождя, например, 33 мм/ч составит 0.001, в то время как в средних и южных широтах Земли дожди возникают с большей вероятностью и выпадают более интенсивно. Например, интенсивность дождя 50 мм/ч приводит к ослаблению радиосигнала примерно на 10 дБ. В сравнении с ослаблением 4.7 дБ (33 мм/ч) это вызывает необходимость почти двукратного увеличения мощности передатчика;
2. поскольку вероятность интенсивности дождя (33 м/ч) составляет 0.001, а интенсивности дождя (2 м/ч) 0.1, то появляется возможность приёма радиосигнала при более высоком отношении сигнал/шум в 90% времени, что в свою очередь позволяет в существенный интервал времени отключить помехоустойчивое кодирование. Это повышает гибкость спутниковой системы связи, увеличивает её надёжность и скорость передачи данных;
3. при возникновении на пути следования радиосигнала структур когерентной турбулентности солитонного типа, уровень которых не распределен по нормальному закону, статистические параметры сигнала необходимо определять экспериментально.

Литература

1. Андрианов М.Н., Корбаков Д.А., Пожидаев В.Н. Возможные спутниковые линии связи в условиях Арктики. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.13>
2. Скляр Б. «Цифровая связь» // М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
3. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. – М.: Наука, 1978 – 463 с.
4. Андрианов М.Н. Разработка субоптимальных алгоритмов повышения эффективности систем подвижной радиосвязи. Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. Москва, 2009. С. 69-75;114-117.
5. Andrianov M., Kiselev I. Application of the Mode Intermittent Radiation in Fading Channels. Chapter in the book “Digital Communication”, Publishing house InTech. 2012. P.139-160.
6. Андрианов М.Н., Костенко В.И., Лихачев С.Ф. О повышении спектральной эффективности и пропускной способности в канале передачи данных на линии космический аппарат – наземная станция слежения. // Космические исследования. 2018. Т.56. №1. С.85-92.
7. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
8. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами // М.: Радио и связь, 1991 – 296 с.
9. Прокис Дж. «Цифровая связь» // М.: Радио и связь, 2000 – 800 с.
10. Kou Y., Linand S., Fossorier M.P.C. Low-Density Parity-Check Codes Based on Finite Geometries: A Rediscovery and New Results // IEEE Trans. On Inform. Theory. 2001. Vol.47. No.7. P.2711-2736.
11. Загорин Г.К., Зражевский А.Ю., Коньков Е.В., Соколов А.В., Титов С.В., Хохлов Г.И., Чёрная Л.Ф. Факторы, влияющие на распространение мм волн в приземном слое атмосферы // Журнал радиоэлектроники. 2001. №7. <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/9/text.html>

12. Носов В.В., Григорьев В.М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Е.В. Носов, Торгаев А.В. Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика. 2009. Вып.14. С.97-113.
13. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем // М.: Мир, 1989 – 376 с.

Для цитирования:

Андрианов М.Н., Корбаков Д.А., Пожидаев В.Н. Влияние турбулентности тропосферного канала на пропускную способность спутниковых систем связи в условиях Арктики. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.14>