11

Повышение помехоустойчивости передачи данных от уровня порога в режиме прерывистого излучения на линии связи космический аппарат–наземная станция слежения

© М.Н. Андрианов, В.И. Костенко

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: mihail-andrian@asc.rssi.ru, mihail-andrian@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 сентября 2024 г.
В окончательной редакции 24 октября 2024 г.
Принято к публикации 27 октября 2024 г.

Рассмотрена зависимость достоверности приема данных в условиях тропосферных логнормальных амплитудных флуктуаций миллиметровых радиоволн на линии космический аппарат–наземная станция слежения от порогового уровня в режиме прерывистого излучения с когерентным приемом сигналов. Показано, что при фиксированной энергии символа сигнала с выхода передающего устройства обеспечивается монотонное снижение вероятности ошибочного приема данных в зависимости от уровня порога.

Ключевые слова: тропосферный канал, миллиметровые волны, логнормальные амплитудные флуктуации, прерывистая связь, коэффициент использования радиолинии, оптимальный уровень порога, энергорасход передатчика.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59842.20131

Как было ранее показано [1,2], применение миллиметрового диапазона и увеличения полосы радиосигнала существенно повышает скорость беспроводной передачи данных в наземно-космической радиоинтерферометрии на линии космический аппарат–наземная станция слежения. Реализация режима прерывистого излучения позволяет повысить помехоустойчивость передаваемых сообщений. В [3] показана зависимость снижения вероятности ошибок от отношения сигнал/шум (ОСШ) при уровне порога (γ_t), нормированном на среднее значение ОСШ (γ_0): $q = \gamma_t/\gamma_0$. Однако на практике возникают ситуации, когда среднее значение ОСШ меняется слабо, например при передаче данных из точки Лагранжа ($L2$), когда расстояние от космического аппарата до наземной станции слежения изменяется медленно.

В этом случае анализ помехоустойчивости передачи данных от q при фиксированной энергии символа сигнала на выходе передатчика актуален и представляет значимый научно-практический интерес.

В настоящей работе плотность вероятности распределения огибающей сигнала миллиметрового диапазона в канале турбулентной тропосферы ввиду малых значений дисперсии (менее единицы) характеризуется логнормальным законом [2].

Определим значение ОСШ на входе приемника для расстояния от космического аппарата в точке Лагранжа ($L2$) до наземной станции слежения $1.75 \cdot 10^9$ m, диаметров передающей и приемной антенн 2.2 и 15 m соответственно и коэффициентов использования их поверхности (КПД) 0.5 и 0.95 соответственно. С помощью основного уравнения радиосвязи [1] при этих параметрах получаем, что мощность сигнала на входе приемника составляет $6.186 \cdot 10^{-10}$ W.

Шумовая температура приемной системы состоит из шумов антенны и собственных шумов приемника.

Шумовая температура антенны в свою очередь включает в себя:

— атмосферный шум, который при характерном угле места антенны 30° составляет в E-диапазоне примерно 97 K [4] (рис. 1);

— шум реликтового излучения с температурой около 3 K;

— планковскую поправку для температуры $h\nu/k$, которая на частоте $\nu = 80$ GHz равна 3.8 K (h и k — постоянные Планка и Больцмана соответственно).

Таким образом, полная шумовая температура антенны составит 103.8 K.

Температура собственных шумов неохлаждаемого приемника (~ 300 K) с учетом потерь от переоблучения рупором зеркала антенны (~ 0.49 dB), потерь в антенном тракте (~ 0.1 dB) и коэффициента шума приемника 0.6 dB [5] составит 94.77 K.

Таким образом, общая шумовая температура приемной системы T_{sys} оказывается равной 198.57 K.

Мощность шума на входе приемника при общей полосе сигнала в E-диапазоне 10 GHz (5 GHz на сегменте 71–76 GHz и 5 GHz на сегменте 81–86 GHz) составит $3.334 \cdot 10^{-11}$ W.

Тогда ОСШ на входе приемника составит 8.8 dB при следующих значениях дополнительных параметров:

— требуемый энергозапас для компенсации флуктуаций уровня сигнала 3 dB;

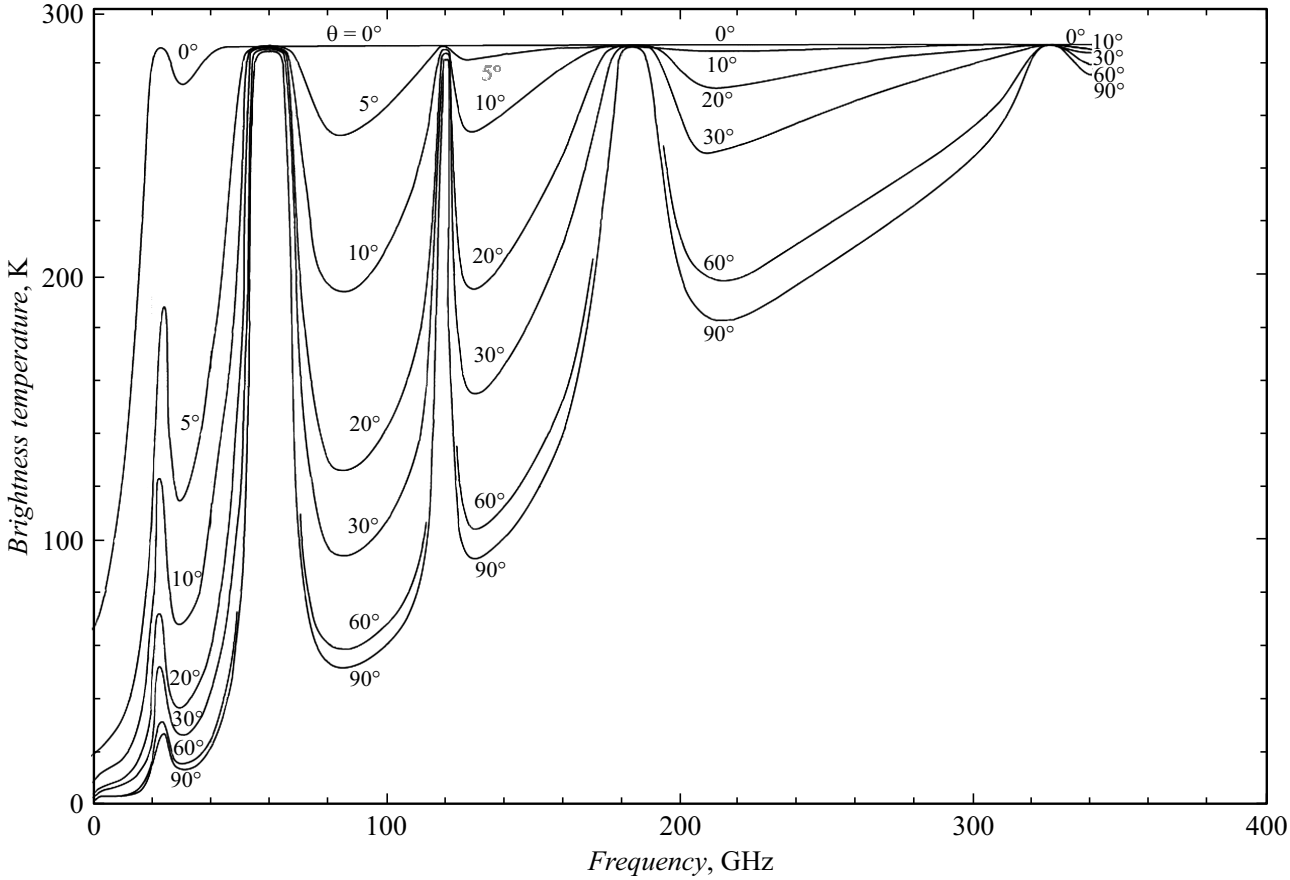


Рис. 1. Яркостная температура атмосферы в зависимости от частоты при различных углах места антенны [4].

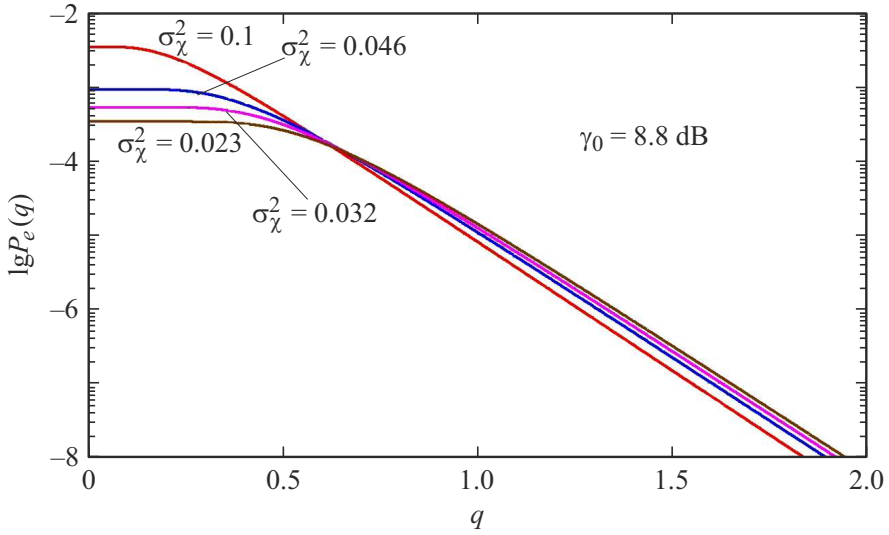


Рис. 2. Вероятности ошибок приема сигнала в режиме прерывистого излучения в зависимости от нормированного уровня порога q при постоянной энергии символа сигнала на выходе передатчика и различных значениях дисперсии σ_χ^2.

— максимальное затухание сигнала в тропосфере 1.7 dB при наклонной дальности 20 km, угле места антенны $\theta = 30°$ и тропосферном затухании в зените 0.85 dB [6].

На рис. 2 показаны зависимости вероятностей ошибок приема сигнала от нормированного уровня порога q при фиксированной энергии символа сигнала на выходе передатчика и различных значениях дисперсии, получен-

ные в соответствии с выражением

$$P_e(q) = \left[\frac{1}{4\eta(q)\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}}\right] \int\limits_{q\gamma_0}^{\infty} \frac{1}{\gamma} \times \exp\left[-\frac{\left(\ln\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0}} + \sigma_\chi^2\right)^2}{2\sigma_\chi^2}\right] \mathrm{erfc}\sqrt{\alpha\gamma}\, d\gamma, \qquad (1)$$

где $\alpha = 1$ для фазоманипулированных сигналов [7].

Аналитическое выражение (1) получено усреднением вероятности ошибок в гауссовом шуме $(0.5\mathrm{erfc}\sqrt{\alpha\gamma})$ в статистике логнормальных флуктуаций [2] для уровней порога выше $q\gamma_0$. В формуле (1) и на рис. 2 значение $\gamma_0 = 8.8\,\mathrm{dB}$ соответствует среднему значению ОСШ в отсутствие прерывистой связи.

Из рис. 2 следует, что при $q \approx 1.31$ вероятность ошибок снижается до значений менее 10^{-5}. Однако в этом случае коэффициент использования радиолинии [3] составляет не более $\eta(q) = 0.23$, а время передачи данных сокращается более чем в 4 раза.

Для реализации высокопроизводительного сценария работы в рассматриваемом канале связи [3] необходимо увеличивать мгновенную скорость передачи данных обратно пропорционально изменениям $\eta(q)$. В этом случае длительность символа сигнала сокращается пропорционально $\eta(q)$, а для сохранения его энергии требуется соответственно увеличивать мощность передачи обратно пропорционально этому коэффициенту. При этом энергия символа сигнала с выхода передатчика остается неизменной и при более благоприятных условиях распространения сигнала (повышение уровня порога) энергия символа на входе приемника и ОСШ увеличиваются, а вероятность ошибки снижается в соответствии с (1) (рис. 2).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] М.Н. Андрианов, В.И. Костенко, С.Ф. Лихачев, Космические исследования, **56** (1), 85 (2018). DOI: 10.7868/S0023420618010090 [M.N. Andrianov, V.I. Kostenko, S.F. Likhachev, Cosmic Res., **56** (1), 75 (2018). DOI: 10.1134/S001095251801001X].

[2] М.Н. Андрианов, В.И. Костенко, С.Ф. Лихачев, Космические исследования, **57** (4), 278 (2019). DOI: 10.1134/S0023420619040010 [M.N. Andrianov, V.I. Kostenko, S.F. Likhachev, Cosmic Res., **57** (4), 261 (2019). DOI: 10.1134/S0010952519040014].

[3] М.Н. Андрианов, Письма в ЖТФ, **50** (1), 23 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.01.56920.19747 [M.N. Andrianov, Tech. Phys. Lett., **50** (1), 18 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.01.57826.19747].

[4] *Радиошум*, рек. МСЭ-R P.372-13 (09/2016) [Электронный ресурс]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-13-201609-S!!PDF-R.pdf

[5] Y. Sabir, S. Majeed Chaudry, Microwaves & RF (September, 2015), p. 50–56. [Электронный ресурс]. https://www.mwrf.com/technologies/components/active-components/article/21846389/60-to-80-ghz-lna-boosts-e-band-radios

[6] *Затухание в атмосферных газах*, рек. МСЭ-R P.676-10 (09/2013). [Электронный ресурс]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-R.pdf

[7] Ю.Б. Окунев, *Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами* (Радио и связь, М., 1991).