

11.1;11.4

Повышение достоверности передачи данных по линии связи космический аппарат–наземная станция слежения: режим прерывистого излучения

© М.Н. Андрианов

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 29 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 29 сентября 2023 г.

Принято к публикации 9 октября 2023 г.

Рассмотрен метод повышения достоверности передачи данных в условиях логнормальных амплитудных флуктуаций миллиметровых радиоволн на линии космический аппарат–наземная станция слежения с использованием режимов прерывистого излучения при когерентном приеме сигналов. Показано, что коэффициент использования радиолинии фиксирован при постоянном соотношении уровня порога и среднего отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: тропосферный канал, миллиметровые волны, дисперсия, дифракция Фраунгофера, логнормальные амплитудные флуктуации, прерывистая связь, коэффициент использования радиолинии.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.01.56920.19747

Известно, что применение миллиметрового (mm) диапазона существенно повышает спектральную эффективность беспроводной передачи данных наземно-космической радиоинтерферометрии по линии космический аппарат (КА)–наземная станция слежения [1,2] до скоростей, соизмеримых со скоростью записи цифровых широкополосных данных в бортовую память КА, что обеспечивает бесперебойную работу наземно-космического интерферометра.

Однако при распространении в турбулентной атмосфере электромагнитные волны mm-диапазона испытывают логнормальные флуктуации амплитуды [3], и плотности вероятности отношения сигнал/шум (ОСШ) γ , так же как и амплитуды сигналов mm-диапазона, описываются логнормальным законом [4].

В свою очередь дисперсия логнормального процесса при передаче данных, например, из точки Лагранжа L_2 , когда радиус первой зоны Френеля существенно больше внешнего масштаба турбулентности [2], будет определяться дифракцией Фраунгофера и линейно возрастать с длиной пути электромагнитной волны по тропосферному каналу. Дисперсия тропосферного канала миллиметрового диапазона длин волн с учетом среднего коэффициента профиля [5] составит

$$\begin{aligned} \langle \chi^2 \rangle &= \sigma_\chi^2 \approx \left(\sqrt{2\pi}/16 \right) (0.714 C_{\varepsilon 0})^2 L_0^{5/3} k^2 z \\ &= \left(\sqrt{2\pi}/16 \right) 0.51 C_{\varepsilon 0}^2 L_0^{5/3} k^2 z. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $C_{\varepsilon 0}$ — структурная постоянная диэлектрической проницаемости в приземном слое, составляющая примерно $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1/3}$; L_0 — внешний масштаб турбулентности (соответствует примерно 10 м); k — волновое число ($2\pi/\lambda$), где λ — длина волны; z — длина пути

электромагнитной волны по каналу с логнормальными флуктуациями (по тропосферному каналу).

Целесообразно передавать данные в моменты отсутствия замираний сигналов. Использование указанного алгоритма обусловлено тем, что огибающие дуплексных сигналов на линии связи от КА к наземной станции слежения и обратно коррелированы, при этом $T \ll \tau$, где T — время распространения сигнала по линии связи, τ — интервал корреляции огибающей сигнала во времени.

Измеритель уровня сигнала на входе приемника КА позволяет принимать решение о включении/выключении передатчика, если этот уровень становится выше/ниже определенного порогового значения.

Поскольку данные в канале передаются только в определенные моменты времени, целесообразно ввести коэффициент использования радиолинии, равный отношению длительности конкретного интервала передачи данных к общей длине сеанса связи. Тогда $\eta(\gamma_i)$ будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \eta(\gamma_i) &= \left(0.5 / \sqrt{2\pi\sigma_\chi^2} \right) \int_{\gamma_i}^{\infty} \gamma^{-1} \\ &\times \exp \left[- \left(\ln \sqrt{\gamma/\gamma_0} + \sigma_\chi^2 \right)^2 / 2\sigma_\chi^2 \right] d\gamma \\ &= 0.5 \operatorname{erfc} \left(\ln \sqrt{\gamma_i/\gamma_0} + \sigma_\chi^2 / \sqrt{2\sigma_\chi^2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) γ соответствует мгновенному значению ОСШ. Из уравнения следует, что коэффициент использования радиолинии не зависит от среднего значения ОСШ только в случаях, когда порог ОСШ γ_i нормирован на среднее значение γ_0 .

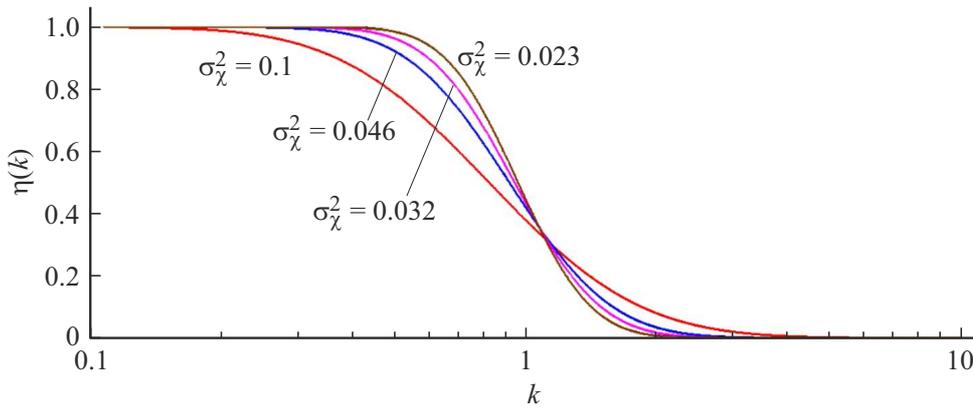


Рис. 1. Зависимости коэффициента использования радиолинии от параметра нормировки k при различных фиксированных значениях дисперсии σ_χ^2 .

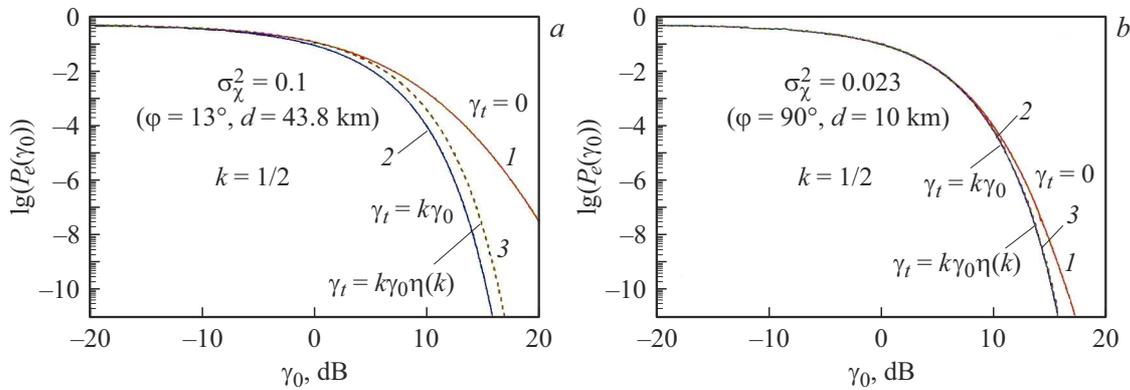


Рис. 2. Вероятности ошибок приема сигналов в режиме прерывистого излучения в сравнении с вероятностью ошибки в отсутствие прерывистого излучения (1) для случаев фиксированной энергии бита (2) и фиксированной мощности передатчика (3). Параметр нормировки $k = 1/2$ и $\sigma_\chi^2 = 0.1$ (a) и 0.023 (b).

Параметр нормировки k соответственно равен $k = \gamma_t/\gamma_0$. Зависимость коэффициента использования радиолинии от параметра нормировки k при фиксированных σ_χ^2 в Е-диапазоне (71–76, 81–86 GHz) описывается выражением (3) (рис. 1)

$$\eta(k) = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\ln \sqrt{k} + \sigma_\chi^2 / \sqrt{2\sigma_\chi^2} \right). \quad (3)$$

При наклонных дальностях 43.8 km ($\sigma_\chi^2 = 0.1$) и 10 km ($\sigma_\chi^2 = 0.023$) угол места антенн φ равен 13 и 90° соответственно.

Усредняя вероятности ошибок сигналов BPSK/QPSK в гауссовом шуме по статистике логнормальных замираний в тропосферном канале при значениях ОСШ выше порогового уровня, можно получить зависимость вероятности ошибок когерентного приема от γ_0

$$P_{c,t}(\gamma_0) = (1/4\eta(k)) \sqrt{(2\pi\sigma_\chi^2)} \int_{\gamma_t}^{\infty} \gamma^{-1} \times \exp \left[-(\ln \sqrt{\gamma/\gamma_0 z} + \sigma_\chi^2)^2 / 2\sigma_\chi^2 \right] \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha \gamma} d\gamma. \quad (4)$$

Определим нормированный на среднее значение ОСШ γ_0 порог $\gamma_t = k\gamma_0$. Отметим, что для передачи полного массива данных скорость передачи должна возрастать обратно пропорционально коэффициенту использования радиолинии $\eta(k)$. При этом представляют интерес два случая:

1) $\gamma_t = k\gamma_0$, $z = 1$, когда энергия бита (ОСШ) на входе приемника не зависит от коэффициента использования радиолинии $\eta(k)$ и соответственно мощность передатчика должна возрастать обратно пропорционально $\eta(k)$;

2) $\gamma_t = \eta(k)k\gamma_0$, $z = \eta(k)$, когда мощность передатчика зафиксирована и ОСШ (энергия бита) на входе приемника зависит от $\eta(k)$.

Кривые вероятностей ошибок (4) для дисперсий $\sigma_\chi^2 = 0.1$ и 0.023 представлены графически на рис. 2, a и b соответственно.

На рис. 2 φ и d — угол места антенны и наклонная дальность соответственно. При $k = 1/2$, дисперсиях 0.1 и 0.023 коэффициенты использования радиолиний (3) составят соответственно 0.782 и 0.983 (рис. 1).

Из рис. 2 видно, что выигрыш в режиме прерывистого излучения возрастает с увеличением дисперсии и среднего значения ОСШ, когда логнормальные флуктуации амплитуды сигнала в тропосфере значимы. Кроме того, различия вероятностей ошибок в режимах прерывистого излучения при фиксированных энергии бита сигнала и мощности передатчика незначительны, особенно при малом значении дисперсии (рис. 2, *b*). Поэтому режим прерывистого излучения при неизменной мощности передатчика более предпочтителен, поскольку фиксация его параметров обеспечивает более надежное длительное автономное функционирование передающего устройства.

Следует отметить, что в режиме прерывистого излучения (с QPSK-модуляцией сигнала) скорость передачи данных в E-диапазоне (71–76, 81–86 GHz) может составлять до 20 Gb/s.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него 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] С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский, *Введение в статистическую радиофизику* (Наука, М., 1978), ч. II.
- [4] М.Н. Андрианов, *Разработка субоптимальных алгоритмов повышения эффективности систем подвижной радиосвязи*, канд. дис. (Моск. техн. ун-т связи и информатики, М., 2009).
- [5] Т.Е. Рыжкина, Л.В. Федорова, *Журн. радиоэлектроники*, № 2 (2002) [Электронный ресурс]. <http://jre.cplire.ru/jre/feb01/3/text.html>