

11

## Оптимизация уровня порога в режиме прерывистого излучения по критерию минимума вероятности ошибочного приема данных 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 18 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 18 декабря 2024 г.

Принято к публикации 28 декабря 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. Сделана оценка оптимального порогового уровня передающего устройства по критерию минимальной вероятности ошибки. Показано, что при оцениваемом уровне обеспечивается не только минимальная вероятность ошибок в принимаемых данных, но и снижение энергетических требований к передатчику. Представленные результаты могут быть использованы при практической реализации эффективных широкополосных каналов связи космический аппарат—наземная станция слежения в миллиметровом диапазоне.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2025.09.60223.20228

Как было показано в [1], режим прерывистой передачи данных по беспроводному каналу связи с фиксированной энергией символа сигнала на выходе передатчика позволяет монотонно снижать вероятность ошибочного приема данных на выходе демодулятора.

Также, как описано в [2,3], использование миллиметрового диапазона существенно повышает скорость беспроводной передачи данных в наземно-космической радиоинтерферометрии на линии космический аппарат—наземная станция слежения. В следующей работе [4] получена зависимость снижения вероятности ошибок от соотношения сигнал/шум (ОСШ) при уровне порога ( $\gamma_t$ ), нормированном на среднее значение ОСШ ( $\gamma_0$ ):  $q = \gamma_t/\gamma_0$ . Следует отметить, что коэффициент использования радиолинии ( $\eta$ ) зависит только от  $q$  и не зависит от  $\gamma_0$  [1]. Плотность вероятности распределения огибающей сигнала для миллиметрового диапазона в канале турбулентной тропосферы ввиду малых значений дисперсии (менее единицы) характеризуется логнормальным законом [3].

В отличие от [1] в настоящей работе выполнен теоретический анализ зависимости вероятности ошибки при когерентном приеме данных от нормированного уровня порога при постоянной мощности передатчика, когда энергия символа сигнала на выходе передатчика варьируется с изменением  $\gamma_t$ .

В [2] было показано, что мощность сигнала на входе приемника для расстояния от космического аппарата (в точке Лагранжа  $L_2$ ) до наземной станции слежения составляет  $6.186 \cdot 10^{-10}$  W.

С учетом атмосферного шума 97 K при характерном угле места антенны  $30^\circ$  [1,5] и коэффициенте шума приемника 0.6 dB [1,6] ОСШ на входе приемника составит 8.8 dB при следующих значениях дополнительных параметров.

— Требуемый энергозапас для компенсации флуктуаций уровня сигнала 3 dB.

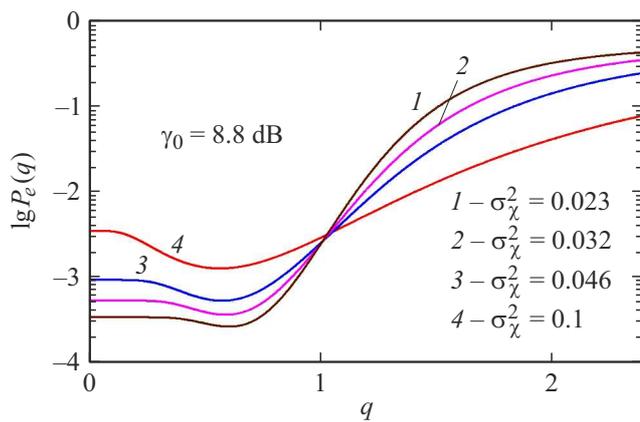
— Максимальное затухание сигнала в тропосфере (1.7 dB) при наклонной дальности 20 km, угле места антенны  $\varphi = 30^\circ$  и тропосферном затухании в зените 0.85 dB [7]. Общая полоса сигнала в E-диапазоне составит в этом случае 10 GHz (5 GHz на сегменте 71–76 GHz и 5 GHz на сегменте 81–86 GHz).

На рисунке показаны зависимости вероятностей ошибок приема сигнала от нормированного уровня порога ( $q$ ) при фиксированной мощности сигнала на выходе передатчика и различных значениях дисперсии, полученные в соответствии с выражением

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

где  $\alpha = 1$  для фазоманипулированных сигналов [8].

Аналитическое выражение (1) получено усреднением вероятности ошибок в гауссовом шуме ( $0.5\operatorname{erfc}\sqrt{\alpha\gamma}$ ) в



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  $\sigma_\chi^2$ .

статистике логнормальных флуктуаций [3] для уровней порога выше  $q\gamma_0\eta(q)$ . Принятое в (1) и соответственно на рисунке значение  $\gamma_0 = 8.8$  dB соответствует среднему значению ОСШ в отсутствие прерывистой связи.

Для сохранения средней скорости передачи необходимо увеличить мгновенную скорость передачи обратно пропорционально коэффициенту использования радиочастоты ( $\eta(q)$ ) [1]. При этом энергозатраты передатчика вследствие его прерывистой работы снижаются прямо пропорционально  $\eta(q)$ .

Увеличение уровня порога обеспечивает более благоприятные условия передачи данных. Поэтому при фиксированной мощности, несмотря на снижение энергии сигнала на выходе передатчика при уменьшении длительности символа сигнала, ОСШ на входе приемника возрастает и вероятность ошибки снижается. При дальнейшем возрастании уровня порога наступает баланс, когда благоприятные условия уже не могут компенсировать снижение энергии символа сигнала, длительность которого продолжает уменьшаться. При определенном значении уровня порога достигается оптимальное (минимальное) значение вероятности ошибки (см. рисунок). ОСШ на входе приемника достигает максимума и далее не возрастает. Несмотря на благоприятные условия передачи, дальнейшее увеличение уровня порога в результате еще большего снижения энергии символа сигнала обеспечивает снижение ОСШ на входе приемника и повышение вероятности ошибки вплоть до значения 0.5.

Применение алгоритма прерывистой передачи данных при фиксированной мощности передатчика в тропосферном канале с логнормальными флуктуациями уровней сигналов позволяет определять оптимальный уровень нормированного порога ( $q_{opt}$ ) по критерию минимизации вероятности ошибочного приема данных.

Полученная оценка оптимального нормированного порога обеспечивает минимум вероятности ошибки, несмотря на снижение потребления энергии передат-

чиком — актуальный фактор для автономных научных систем в условиях дальнего космоса и дефицита энергоресурса проекта. Энергопотребление передатчика уменьшается с ростом нормированного порога  $q$ .

В рассматриваемых случаях обеспечение фиксированной мощности передатчика в условиях дальнего космоса обеспечивает высокую надежность бесперебойной работы передающих устройств.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] М.Н. Андрианов, В.И. Костенко, Письма в ЖТФ, **51** (4), 39 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59842.20131
- [2] 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].
- [3] 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].
- [4] 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].
- [5] 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](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-13-201609-S!!PDF-R.pdf)
- [6] Y. Sabir, S. Majeed Chaudry, Microwaves & RF (September, 2015), p. 50–56. [Электронный ресурс]. <https://www.mwrf.com/technologies/components/activecomponents/article/21846389/60-to-80-ghz-lna-boosts-eband-radios>
- [7] 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](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-R.pdf)
- [8] Ю.Б. Окунев, Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами (Радио и связь, М., 1991).