

Передача информации с низкоорбитальных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли по высокоскоростной космической лазерной связи

А. П. Измуков, А. С. Ланцов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka.mil.ru

Аннотация. Исследована вероятность ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации. Рассмотрено фотодетектирование оптических сигналов в условиях влияния квантовых, избыточных и фоновых шумов, характерное для современных лазерных систем передачи информации. Сравнение результатов точного и приближенного расчетов вероятности ошибочного приема символа показано их близкое совпадение, что позволяет проводить инженерные расчеты с использованием более простых приближенных выражений.

Ключевые слова: лазерный канал передачи информации, фотодетектирование, статистика фотоотсчетов, вероятность ошибочного приема символа

I. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные системы передачи информации обладают высокой пропускной способностью и обеспечивают высокую скрытность и защищенность узконаправленных лазерных каналов передачи информации от организованных помех. В качестве основной области применения лазерных систем передачи информации рассматривается область скоростей передачи информации выше 300 Мбит/с, а предельно достижимые скорости передачи информации в лазерных каналах составляют десятки гигабит в секунду. В настоящее время высокоскоростные лазерные системы передачи информации являются элементом инфраструктуры наземных сетей передачи данных и отрабатываются технологии их применения в космосе [1–3].

Имеются особенности расчета показателей помехоустойчивости лазерных каналов передачи информации, связанные с учетом шумов, действующих при приеме оптических сигналов, а также особенностей элементной базы, используемой при создании передающих и приемных терминалов лазерных систем передачи информации. Вероятность ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации рассчитывается в соответствии с выражениями статистической теории лазерной связи для статистики регистрируемых фотоотсчетов [1, 4, 5]. В настоящее время в качестве основной элементной базы рассматриваются полупроводниковые лазеры для построения передающих лазерных терминалов и лавинные фотодиоды (ЛФД) для построения приемных лазерных терминалов. [6–8]. При этом рабочая длина волны лазерной системы передачи информации лежит в ближней инфракрасной области $\lambda=0,83\text{--}1,55$ мкм.

Лавинный фотодиод осуществляет фотодетектирование оптических сигналов в режиме счета фотонов в условиях влияния квантовых, избыточных и фоновых шумов. Для данного режима приема оптических сигналов в статье анализируются результаты точного и приближенного расчетов вероятности ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Точный расчет вероятности ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации осуществляется на основании статистики фотоотсчетов, регистрируемых оптическим приемником. Процесс фотодетектирования сигналов оптическим приемником на основе ЛФД характеризуется совместным действием квантовых шумов, связанных с сигналом и фоновым шумом, избыточных шумов и внутренних шумов оптического приемника [1]. За счет внутреннего усиления ЛФД могут быть обеспечены условия, при которых внутренние шумы будут пренебрежимо малы, а остальные шумы – квантовые, избыточные и фоновые – определяют статистику регистрируемых фотоотсчетов.

В процессе фотодетектирования оптических сигналов оптическим приемником на основе ЛФД происходит несколько этапов преобразования статистики первичных и вторичных фотоотсчетов. Результирующая функция плотности вероятности распределения вторичных фотоотсчетов на входе решающего устройства, приведенная ко входу оптического приемника, аппроксимируется функцией плотности вероятности гауссовского закона распределения со специально выбранными параметрами. Дискретная условная вероятность регистрации n фотоотсчетов определяется выражением

$$P[n|n_0] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(n-n_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где n_0 – среднее число первичных фотоотсчетов, σ^2 – результирующая дисперсия фотоотсчетов, приведенная к входу оптического приемника и учитывающая все шумы, действующие при приеме оптических сигналов.

В условиях функционирования цифровых лазерных систем передачи информации с оптическими приемниками на ЛФД, характеризуемых совместным влиянием квантового, избыточного и фонового шумов

параметры закона распределения (1) определяются выражениями

$$\begin{cases} n_0 = n_c + n_\phi, \\ \sigma^2 = (n_c + n_\phi)F(G), \end{cases} \quad (2)$$

– при наличии сигнала,

$$\begin{cases} n_0 = n_\phi, \\ \sigma^2 = n_\phi F(G), \end{cases} \quad (3)$$

– при отсутствии сигнала.

В выражениях (2) и (3) n_c – среднее число сигнальных фотоотчетов, приходящихся на информационный символ, n_ϕ – среднее число фоновых фотоотчетов, приходящихся на информационный символ, $F(G)$ – коэффициент избыточных шумов ЛФД, зависящий от его коэффициента усиления G . Для реальных ЛФД полагают $F(G)=G^\beta$, где $\beta=0.1\dots 0.5$. Параметры n_0 и σ^2 также могут учитывать влияние объемного и поверхностного токов утечки ЛФД. Объемный ток утечки усиливается в процессе лавинного фотоумножения и может быть учтен в количестве фоновых фотоотчетов n_ϕ , а поверхностный ток утечки не усиливается в процессе лавинного фотоумножения и может быть отнесен к внутреннему шуму, влияние которого в данном случае не учитывается в предположении высокого коэффициента усиления ЛФД.

В лазерных передатчиках систем передачи информации с полупроводниковыми лазерами осуществляется высокоскоростная модуляция выходного лазерного излучения прямой инжекцией тока. Это позволяет передавать двоичные символы с использованием импульсных методов модуляции КИМ-АМ и КИМ-ВИМ.

Метод модуляции КИМ-АМ является простейшим методом импульсной модуляции, при котором передача информационных символов осуществляется с помощью ненулевого и нулевого сигналов. При передаче символа «1» лазерным передатчиком излучается импульс, а при передаче символа «0» следует пауза. Приему сигналов с КИМ-АМ соответствует схема порогового детектирования одним детектором [4]. Если число фотоотчетов, зарегистрированных за время накопления, превышает некоторое пороговое значение n_n , то принимается решение о передаче символа «1», в противном случае – о передаче символа «0». Оптимальный порог n_n определяется по критерию идеального наблюдателя и зависит от параметров, определяемых выражениями (2) и (3).

Метод модуляции КИМ-ВИМ является методом импульсной модуляции, при котором передача информационных символов осуществляется ортогональными сигналами с одинаковой энергией. В зависимости от передаваемого символа «1» или «0» лазерным передатчиком излучается импульс, имеющий или не имеющий задержку относительно опорного положения. Приему сигналов с КИМ-ВИМ соответствует схема порогового детектирования двумя детекторами [4]. Если разность отсчетов, соответствующих анализируемым временным интервалам, превышает порог n_n , то принимается

решение о передаче символа «1», в противном случае – о передаче символа «0». При симметричном коде (вероятности передачи информационных символов «1» и «0» равны) порог $n_n=0$ всегда оптимален и не зависит от параметров, определяемых выражениями (2) и (3).

При симметричном коде вероятность ошибочного приема информационного символа, соответствующая среднему числу сигнальных n_c и фоновых n_ϕ фотоотчетов определяется выражениями:

$$p_0 = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{n_n} P[n|(n_c + n_\phi)] + \frac{1}{2} \sum_{n=n_n+1}^{\infty} P[n|n_\phi] \quad (4)$$

при методе модуляции КИМ-АМ, и

$$p_0 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P[n|(n_c + n_\phi)] \sum_{m=0}^{n-1} P[m|n_\phi] \quad (5)$$

при методе модуляции КИМ-ВИМ.

Выражения (4) и (5) определяют величину вероятности ошибочного приема символа p_0 в лазерном канале передачи информации в режиме счета фотонов в виде конечных сумм на основании статистики фотоотчетов, регистрируемых оптическим приемником. При выполнении условий корректной аппроксимации функции плотности вероятности распределения регистрируемых фотоотчетов функцией плотности вероятности гауссовского закона распределения с выбранными параметрами, она позволяет точно рассчитать вероятность ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации.

В определенных случаях для проведения инженерных расчетов желательно иметь более простые выражения для расчета вероятности ошибочного приема символа. При гауссовской аппроксимации функции плотности вероятности распределения регистрируемых фотоотчетов (1) в качестве таких выражений могут быть использованы выражения на основе функций, связанных с гауссовским интегралом ошибок. С учетом определения отношения сигнал/шум на входе оптического приемника лазерного канала передачи информации в режиме ограничения квантовым и фоновым шумом в виде [4]

$$q = \frac{n_c^2}{n_c + n_\phi} \quad (6)$$

и общего вида выражений для вероятности ошибочного приема символа в радиоканалах передачи информации для методов модуляции КИМ-АМ и КИМ-ВИМ [9] в виде функций от \sqrt{q} могут быть использованы следующие приближенные выражения вероятности ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации при симметричном коде:

$$p_0 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{n_c}{2\sqrt{(n_c + n_\phi)F(G) + n_\phi}} \right] \quad (7)$$

при методе модуляции КИМ-АМ и

$$p_0 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{n_c}{\sqrt{2} \sqrt{(n_c + n_\phi) F(G) + n_\phi}} \right] \quad (8)$$

при методе модуляции КИМ-ВИМ.

В выражениях (7) и (8) величина вероятности ошибочного приема символа p_0 в лазерном канале передачи информации определяется через одну из форм гауссова интеграла ошибок – дополнительную функцию

ошибок $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^\infty \exp(-u^2) du$. В знаменателе

аргумента дополнительной функции ошибок произведение $(n_c + n_\phi) F(G)$ учитывает квантовый и избыточный шум, величина n_ϕ учитывает фоновый шум, а коэффициенты 2 и $\sqrt{2}$ соответствуют пороговому детектированию одним детектором при приеме сигнала КИМ-АМ и пороговому детектированию двумя детекторами при приеме сигнала КИМ-ВИМ.

На рис. 1 и 2 приведены результаты точного и приближенного расчетов вероятности ошибочного приема символа p_0 в лазерном канале передачи информации в зависимости от среднего числа сигнальных фотоотсчетов n_c при различном среднем числе фоновых фотоотсчетов n_ϕ . Рис. 1 соответствует методу модуляции КИМ-АМ, рис. 2 соответствует методу модуляции КИМ-ВИМ. На обоих рисунках сплошные кривые соответствуют точному расчету величины p_0 с использованием выражений (4) и (5), пунктирные кривые соответствуют приближенному расчету величины p_0 с использованием выражений (7) и (8). Кривые 1 соответствуют $n_\phi=1$, кривые 2 – $n_\phi=10$, кривые 3 – $n_\phi=20$, кривые 4 – $n_\phi=50$. Задавались параметры ЛФД $G=200$, $\beta=0.1$.

Как следует из приведенных на рис. 1 и 2 зависимостей, для рассмотренных условий приема оптических сигналов результаты точного и приближенного расчетов вероятности ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации дают достаточно близкие результаты, в том числе в представляющей практический интерес области значений $p_0=10^{-5}-10^{-6}$. При фиксированных значениях n_c и n_ϕ величина p_0 при методе модуляции КИМ-ВИМ всегда меньше, чем при методе модуляции КИМ-АМ, что является следствием более высокой потенциальной помехоустойчивости порогового детектирования двумя детекторами по сравнению с пороговым детектированием одним детектором. В то же время скорость передачи информации при методе модуляции КИМ-ВИМ оказывается в 2 раза меньше.

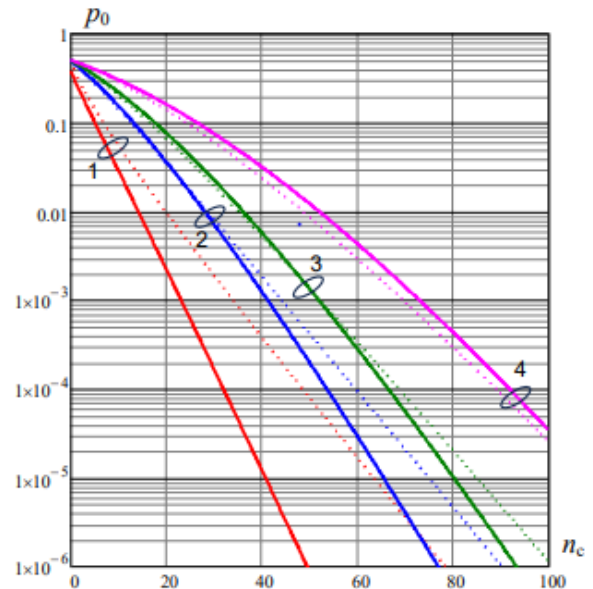


Рис. 1. Зависимости вероятности ошибочного приема символа от среднего числа сигнальных фотоотсчетов при методе модуляции КИМ-АМ

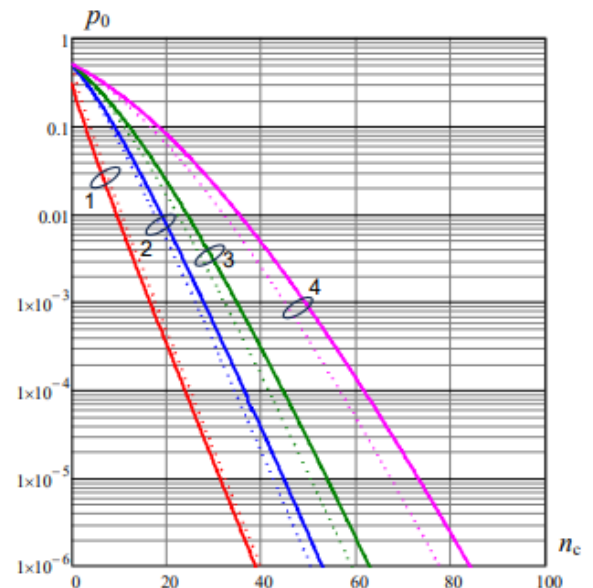


Рис. 2. Зависимости вероятности ошибочного приема символа от среднего числа сигнальных фотоотсчетов при методе модуляции КИМ-ВИМ

Для метода модуляции КИМ-АМ расхождение результатов точного и приближенного расчетов более заметно. Это обусловлено в том числе тем, что при точных расчетах в соответствии с выражением (4) задается оптимальный порог n_n , определяемый по критерию идеального наблюдателя, а выражение (7), используемое при приближенных расчетах, соответствует неоптимальному в рассматриваемых условиях порог $n_n=n_c/2$. Наибольшее расхождение результатов точного и приближенного расчетов имеет место при малых уровнях фонового шума, увеличением уровня фонового шума расхождение результатов расчетов уменьшается.

Для метода модуляции КИМ-ВИМ расхождение результатов точного и приближенного расчетов менее заметно. Это обусловлено в том числе тем, что как точных расчетах в соответствии с выражением (5), так и при приближенных расчетах в соответствии с выражением (8) полагается использование оптимального при симметричном коде порога $n_n=0$. Наибольшее расхождение результатов точного и приближенного расчетов имеет место при больших уровнях фонового шума, с увеличением уровня фонового шума расхождение результатов расчетов увеличивается.

Рассмотренный диапазон значений уровня сигнала, фонового и избыточного шума, характеризуемый средним числом сигнальных n_c и фоновых n_f фотоотсчетов, приходящихся на информационный символ, и коэффициентом избыточных шумов ЛФД $F(G)$, соответствуют реальным условиям приема оптических сигналов в лазерных каналах передачи информации. При этом для большинства значений n_c и n_f приближенные расчеты могут рассматриваться как нижняя граница для вероятности ошибочного приема символа в лазерном канале передачи информации.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование наземных и космических лазерных систем передачи информации для высокоскоростной передачи данных и реализации магистральных каналов глобального Интернета является в настоящее время чрезвычайно перспективным. Полученные результаты показывают возможность проведения инженерных расчетов показателей помехоустойчивости лазерных каналов передачи информации и их граничных значений на основе приближенных выражений для вероятности ошибочного приема символа. Данный показатель является исходным при определении показателей помехоустойчивости систем передачи информации, с учетом используемых в них методов кодирования и протоколов передачи информации. Результаты расчетов вероятности ошибочного приема символа позволяют определить энергетический потенциал лазерных каналов передачи информации, необходимый для обеспечения требуемой помехоустойчивости.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность научному руководителю Мальцеву Г.Н. за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гауэр Дж. Оптические системы связи / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
- [2] Лазерная космическая связь / М. Кацман, Дж. Мейнард, Г. Эванз и др.; пер. с англ., под ред. М. Кацмана. М.: Радио и связь, 1993. 240 с.
- [3] Румянцев К.Е. Стратегия и аппаратура поиска источников оптического излучения. Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2018. 246 с.
- [4] Пратт В.К. Лазерные системы связи: пер с англ. М.: Связь, 1972. 232 с.
- [5] Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь: пер с англ. М.: Связь, 1978. 424 с.
- [6] Гавриленко С.В., Феоктистов Н.Н., Хегай Д.К. Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи // Изв. Вузов. Приборостроение. 2008. №3. С. 54–60.
- [7] Казанцев С.Г. Лазерные технологии для телекоммуникационной платформы малого космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2018. №2. С. 29–47.
- [8] Мурашкин В.В., Петушков С.В., Бояров Д.А. Терминалы высокоскоростной космической лазерной связи как наиболее эффективное устройство передачи информации // Радиотехника. 2023. №4. С. 7-13.
- [9] Радиосистемы передачи информации / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин и др; под ред. И.Б. Федорова и В.В. Калмыкова. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 472 с.