

УДК 621.391

ПРЯМОЕ ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЕ И КОГЕРЕНТНЫЙ ПРИЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ МОДУЛЯЦИИ В ОТКРЫТЫХ СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ СО СТАЦИОНАРНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

С.А. ЛУКАШЕВИЧ, В.Н. УРЯДОВ, Т.В. ПОЛУЯН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01 ноября 2019 года

Аннотация. Рассмотрена эффективность прямого фотодетектирования и методы когерентного приема оптических сигналов инфракрасного диапазона длин волн с различными видами модуляции в открытых системах связи со стационарными космическими объектами.

Ключевые слова: гомодинный метод приема, гетеродинный метод приема, метод прямого фотодетектирования с предварительным усилителем, амплитудная манипуляция, инфракрасное излучение.

Введение

При разработке оптических космических систем возникает необходимость выбора метода приема и вида модуляции оптической несущей. Целью данной работы является сравнение использования различных видов модуляции и методов приема сигналов в открытых системах оптической связи со стационарными космическими объектами (спутниками).

Эффективность прямого фотодетектирования при связи со стационарными космическими объектами и различными видами модуляции

Квантовый предел чувствительности при амплитудной (ООК) модуляции

Квантовый предел детектирования определяется шумами, связанными с сигналами. Чувствительность приемника по средней мощности будет равна [1]:

$$\overline{P}_{in} = \overline{N}_p h\nu B = \frac{\overline{N}_p hcB}{\lambda},$$

Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-6}$, скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм чувствительность приемника по средней мощности составляет $\overline{P}_{in} = 1,237 \cdot 10^{-9}$, что соответствует $-59,07$ дБм, чувствительность по пиковой мощности $P_{in} = -56,06$ дБм. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм: $\overline{P}_{in} = -57,42$ дБм, $P_{in} = -54,41$ дБм.

Чувствительность приемного оптического модуля (ПРОМ) с p-i-n фотодетектором

Чувствительность оптического приемника по средней мощности рассчитаем, используя следующее выражение:

$$\overline{P}_{in} = \frac{A_\lambda}{\eta} \sqrt{4kT(2\pi C_\Sigma)B^2 \left[\frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_{\text{ПТ}}}{q_m} \right]}.$$

Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-6}$, скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм чувствительность приемника по средней мощности составляет $\overline{P_{in}} = -36,7$ дБм. Чувствительность приемника по пиковой мощности составляет $P_{in} = -33,7$ дБм. Расчет производился при следующих параметрах: $\eta = 0,85$; $A_\lambda = 3,8$ Вт/А; $C_\Sigma = 0,5$ пФ, $In_2 = 0,55$; $In_3 = 0,085$; $q_m = 35 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$; $F_{\text{ПТ}} = 1,5$; $T = 300$ К; $K = 20$. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм чувствительность приемника составила $\overline{P_{in}} = -35$ дБм, $P_{in} = -32$ дБм.

Чувствительность ПРОМ с ЛФД

Для случая $P_0 = 0$ чувствительность ЛФД рассчитывается следующим образом [2]:

$$\overline{P_{in}} = \frac{A_\lambda}{\eta} \left(\frac{\sqrt{\overline{i_{pin}^2}}}{M} + qQ_{\text{ош}} F_A In_2 B \right).$$

Для применения при заданных длины волны и скорости передачи наиболее подходит ЛФД на основе InGaAs. Типовое значение коэффициента ионизации для данного материала составляет $k = 0,45$ [3]. Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-6}$, скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм оптимальный коэффициент лавинного умножения $M_{\text{ошт}} = 14,2$, чувствительность приемника по средней мощности составляет $\overline{P_{in}} = -44,88$ дБм, а чувствительность по пиковой мощности $P_{in} = -41,88$ дБм. Расчет производился при следующих параметрах: $\eta = 0,85$; $A_\lambda = 3,8$ Вт/А; $C_\Sigma = 0,5$ пФ; $In_2 = 0,55$; $In_3 = 0,085$; $q_m = 35 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$; $F_{\text{ПТ}} = 1,5$; $T = 300$ К; $K = 20$. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм чувствительность приемника составила $\overline{P_{in}} = -43,23$ дБм, $P_{in} = -40,23$ дБм.

Фотодетектор ПРОМ с оптическим предусилителем

Чувствительность приемника по средней мощности при использовании предварительного усилителя определяется выражением [1]:

$$\overline{P_{in}} = hvF_n \Delta f \left[Q^2 + Q \sqrt{\frac{\Delta v_{\text{opt}}}{\Delta f}} \right].$$

Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-6}$, скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм чувствительность приемника по средней мощности составляет $\overline{P_{in}} = -52,05$ дБм, а по пиковой мощности $P_{in} = -49,05$ дБм. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм чувствительность приемника составила $\overline{P_{in}} = -50,4$ дБм, $P_{in} = -47,4$ дБм.

Таким образом прием методом прямого фотодетектирования модуляции ООК наиболее эффективен при использовании оптического предусилителя. Чувствительность при его использовании для связи с геостационарными спутниками, составляет минус 51 дБм для длины волны 1550 нм и скорости передачи 1,25 Гбит/с.

Прием сигналов с DPSK-модуляцией

Чувствительность приемника определяется следующим выражением:

$$\overline{P_{in}} = \overline{N_p} hvB = \frac{\overline{N_p} hcB}{\lambda}$$

Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-6}$, скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм чувствительность приемника составляет $\overline{P_{in}} = P_{in} = -56,06$ дБм. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм: $\overline{P_{in}} = P_{in} = -54,41$ дБм.

Вероятность ошибки балансного приемника сигналов с DPSK определяется выражением [1]:

$$P_e = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-\eta N_p}{n_{sp}}\right) \left(1 + \frac{\eta N_p}{4n_{sp}}\right),$$

где n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии предварительного усилителя, $n_{sp} \approx F_n / 2$.

Для получения $P_e < 10^{-6}$ необходимое число фотонов на бит составляет $N_p \geq 20$ ($\eta = 0,85$; $F_n = 3,5$ дБ). Чувствительность приемника для скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм составляет $\overline{P}_{in} = P_{in} = -54,94$ дБм. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм: $\overline{P}_{in} = P_{in} = -53,29$ дБм.

Произведенные расчеты показывают, что при использовании DPSK модуляции приемник с предварительным усилителем обладает лучшей чувствительностью приблизительно на 3 дБ по сравнению с модуляцией интенсивности, что согласуется с результатами работ [4–6].

Прием сигналов с QPSK-модуляцией

Для получения $P_e < 10^{-6}$ необходимое число фотонов на бит составляет $N_p \geq 23$ ($\eta = 0,85$). Чувствительность приемника определяется следующим выражением:

$$\overline{P}_{in} = \overline{N}_p h\nu B = \frac{\overline{N}_p hcB}{\lambda}.$$

Для вероятности ошибки $P_e < 10^{-6}$, скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм чувствительность приемника составляет $\overline{P}_{in} = P_{in} = -54,33$ дБм. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм: $\overline{P}_{in} = P_{in} = -52,68$ дБм.

Вероятность ошибки данного приемника при использовании оптического предварительного усилителя определяется выражением [1]:

$$P_e = Q_1(a,b) - \frac{1}{2} I_0(ab) \exp\left[-\frac{a^2+b^2}{2}\right] + \frac{b^2-a^2}{8ab} I_1(ab) \exp\left[-\frac{a^2+b^2}{2}\right],$$

$$a = \sqrt{(2-\sqrt{2}) \frac{\eta N_p}{n_{sp}}}, \quad b = \sqrt{(2+\sqrt{2}) \frac{\eta N_p}{n_{sp}}},$$

где Q_1 – Q-функция Маркума, I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Для получения $P_e < 10^{-6}$ необходимое число фотонов на бит составляет $N_p \geq 23$ ($\eta = 0,85$; $F_n = 3,5$ дБ). Чувствительность приемника для скорости передачи $B = 1,25$ Гбит/с и длины волны $\lambda = 1550$ нм составляет $\overline{P}_{in} = P_{in} = -53,8$ дБм. Для длины волны $\lambda = 1060$ нм: $\overline{P}_{in} = P_{in} = -52,15$ дБм.

Когерентный прием в открытых системах связи со стационарными космическими объектами

Гомодинный приемник с балансным включением и ООК модуляцией

Параметр Q для гомодинного приема при применении ООК модуляции будет равен:

$$Q_{ООК,CR} = \sqrt{(2\eta \overline{N}_{avg})}.$$

Выразим коэффициент ошибок:

$$BER_{НОМ,ООК} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta \overline{N}_{avg}}).$$

При этом среднее число фотонов \overline{N}_{avg} – можно выразить через мощность на входе фотоприемника как:

$$\overline{N}_{avg} = \frac{10^{10} 10^{-3} \lambda}{hcB}$$

где \overline{P}_{in} – средняя уровень мощности на входе фотоприемника. Следует учитывать, что при расчете вероятности ошибки принято использовать среднее число фотонов/бит, что соответствует средней мощности (чувствительности) на входе фотоприемника.

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta = 0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

– 1550 нм составит: $\overline{P}_{in} \approx -56,71$ дБм; $P_{in} \approx -53,7$ дБм; $\overline{N}_{avg} \approx 13,3$; $N \approx 26,6$;

– 1060 нм составит: $\overline{P}_{in} \approx -55,06$ дБм; $P_{in} \approx -52,05$ дБм.

Гомодинный прием с балансным включением для модуляции BPSK

В случае модуляции BPSK и гомодинном приеме вероятность ошибки рассчитывается как [1]:

$$BER_{НОМ, BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta 2 \overline{N}_{avg}})$$

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta = 0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

– 1550 нм составит: $\overline{P}_{in} = P_{in} \approx -59,72$ дБм; $\overline{N}_{avg} = N \approx 6,6$;

– 1060 нм составит: $\overline{P}_{in} = P_{in} \approx -58,08$ дБм.

Гомодинный прием с балансным включением для модуляции QPSK

Отношение сигнал/шум в данном случае уменьшается вдвое по сравнению с BPSK модуляцией. В данном случае вероятность ошибочного приема рассчитывается как [1]:

$$BER_{НОМ, QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta \overline{N}_{avg}})$$

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta = 0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

– 1550 нм составит: $\overline{P}_{in} = P_{in} \approx -56,71$ дБм; $\overline{N}_{avg} = N \approx 13,3$;

– 1060 нм составит: $\overline{P}_{in} = P_{in} \approx -55,07$ дБм.

Синхронный гетеродинный прием для модуляции BPSK

Ввиду биений сигналов локального генератора и входного сигнала формируется сигнал на промежуточной частоте, состоящий из положительной (действительной) и отрицательной (мнимой) частей. Шумы, при этом, вкладываются в действительную и удваиваются. Чувствительность падает на 3 дБ по сравнению с гомодинным методом приема и BPSK модуляцией. Вероятность ошибки рассчитывается как [1]:

$$BER_{НЕТ, BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta \overline{N}_{avg}})$$

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta = 0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

– 1550 нм составит: $\overline{P}_{in} = P_{in} \approx -56,71$ дБм; $\overline{N}_{avg} = N \approx 13,3$;

– 1060 нм составит: $\overline{P}_{in} = P_{in} \approx -55,07$ дБм.

Асинхронный гетеродинный прием для модуляции DBPSK

Детектирование, в данном случае, происходит в фазовом детекторе, содержащим линию задержки, после вычитания сигналов пришедших с фотодиодов. Вероятность ошибочного приема рассчитывается как [1]:

$$BER_{НЕТ, DBPSK} = \frac{1}{2} \exp(-\eta \overline{N}_{avg}).$$

Результат дает ухудшение чувствительности на 0,5 дБ по сравнению с синхронным гетеродинным приемом.

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta=0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

- 1550 нм составит: $\overline{P_{in}} = P_{in} \approx -56,1$ дБм; $\overline{N_{avg}} = N \approx 15,4$;
- 1060 нм составит: $\overline{P_{in}} = P_{in} \approx -54,42$ дБм.

Синхронный гетеродинный прием для модуляции QPSK

Для данного метода приема чувствительность будет равна чувствительностям QPSK при гомодинном приеме и BPSK при гетеродинном приеме. Вероятность ошибочного приема рассчитывается как [1]:

$$BER_{\text{HET.QPSK}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta N_{avg}}).$$

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta=0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

- 1550 нм составит: $\overline{P_{in}} = P_{in} \approx -56,71$ дБм; $\overline{N_{avg}} = N \approx 13,3$;
- 1060 нм составит: $\overline{P_{in}} = P_{in} \approx -55,07$ дБм.

Асинхронный гетеродинный прием с балансной схемой включения для модуляции FSK (с двумя фильтрами)

Вероятность ошибочного приема рассчитывается как [1]:

$$BER_{\text{HET.FSK}} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\eta N_{avg}}{2}\right).$$

Результаты расчетов: для вероятности ошибки 10^{-6} и $\eta=0,85$ – значение средней чувствительности при длине волны:

- 1550 нм составит: $\overline{P_{in}} \approx -53,05$ дБм; $P_{in} \approx -50,04$ дБм; $\overline{N_{avg}} \approx 30,9$; $N \approx 61,8$;
- 1060 нм составит: $\overline{P_{in}} \approx -51,4$ дБм; $P_{in} \approx -48,39$ дБм.

Графики зависимостей коэффициента ошибок от чувствительности, для гомодинных и гетеродинных приемников для различных типов модуляции приведены на рис. 1 и 2.

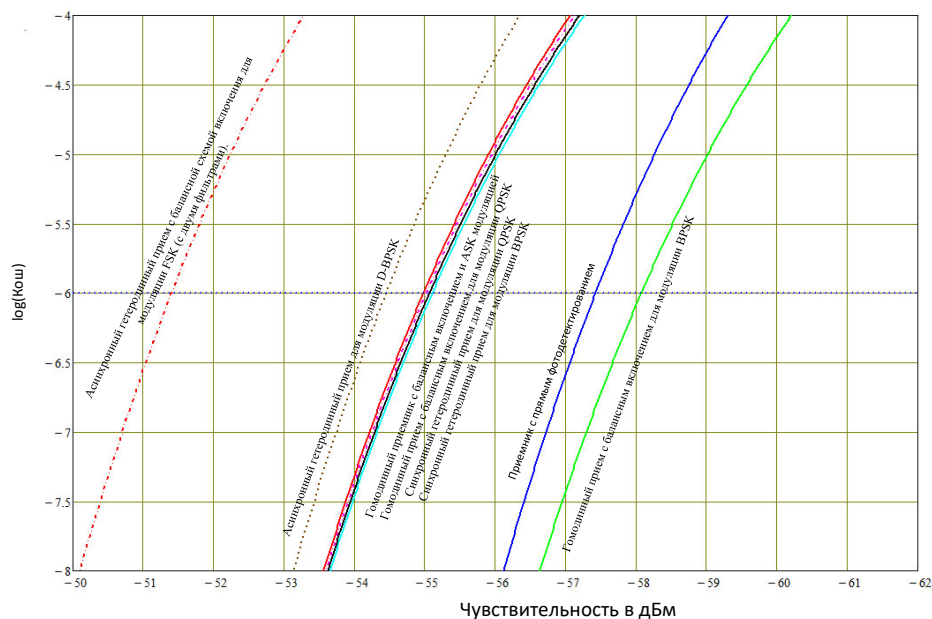


Рис. 1. Зависимость коэффициента ошибок от чувствительности приемника для длины волны 1060 нм

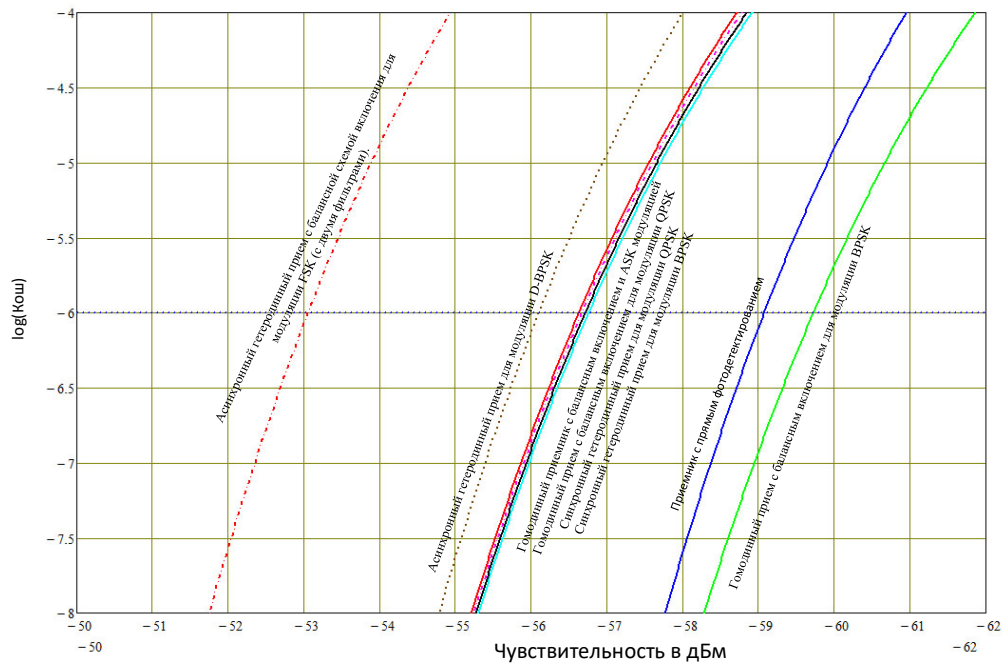


Рис. 2. Зависимость коэффициента ошибок от чувствительности приемника для длины волны 1550 нм

Заключение

Сравнивая (рис. 1 и 2) чувствительности когерентных приемников и приемника прямого фотодетектирования, следует отметить, что последний в идеальном случае в среднем, требует 8 фотонов/бит для достижения коэффициента ошибок $< 10^{-6}$. Это значение лишь немногим больше по сравнению с гомодинным приемником с использованием BPSK модуляции и существенно ниже сравнительно с гетеродинными приемниками. Тем не менее, такая чувствительность приемника прямого фотодетектирования на практике не достижима, вследствие наличия теплового шума, темнового тока и многих других факторов. Вследствие этого реальная чувствительность приемника прямого фотодетектирования с предусилителем составляет минус 52,05 дБм, а по пиковой мощности минус 49,05 дБм. В случае использования когерентного приема можно получить чувствительности порядка минус 59,7 дБм при коэффициенте ошибок равном 10^{-6} .

Длина волны также влияет на чувствительность фотоприемника, следует отметить, что при переходе от 1060 к 1550 нм, чувствительность увеличивается приблизительно на 1,7 дБ, что соответствует уменьшению мощности необходимой для приема сигнала с заданным коэффициентом ошибки в 1,5 раза (предполагалось большее КПД лазера для длины волны 1060 нм по сравнению с 1550 нм, причем увеличение выходной мощности было именно в 1,5 раза). С точки зрения длины волны, стоит обращать внимание именно на те компоненты, которые являются наиболее распространенными на рынке (1550 нм) и, тем самым, снизить стоимость конечного продукта.

С точки зрения выбора метода приема и типа модуляции, если не принимать во внимание сложность конструкции приемника и множество проблем при его проектировании, стоит выделить гомодинный прием с использованием BPSK модуляции, т.к. именно такая комбинация приемника и типа модуляции дает наибольший выигрыш чувствительности для стационарных объектов (геостационарных спутников).

DIRECT PHOTODETECTION AND COHERENT RECEPTION WITH DIFFERENT MODULATION TECHNIQUES IN OPEN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS WITH STATIONARY SPACE OBJECTS

S.A. LUKASHEVICH, V.N. URJADOV, T.V. POLUYAN

Abstract. The efficiency of direct photodetection and methods of coherent reception of optical signals in infrared wavelength range with different modulation techniques in open communication systems with stationary space objects were considered.

Keywords: homodyne reception method, heterodyne reception method, direct photodetection method with pre-amplifier, amplitude manipulation, infrared radiation.

Список литературы

1. Govind P. Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. Agrawal, 2002.
2. Тсанг У. Техника оптической связи. Фотоприемники. М., 1988.
3. А Фриман Р.Л. Волоконно-оптические системы связи. М., 2003.
4. Xu C., Liu X., Wei X. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2004. Vol. 10, № 2, P. 281–293.
5. Ho K.-P., Gnauck A. // Optical Fiber Communication Conference 2003, paper ThE1.
6. Gnauck A.H. [et. al.] // IEEE Photonics Technol. Lett. 16. 2004. P. 909–911.