

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И КОГЕРЕНТНОГО ПРИЕМА ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ. ЧАСТЬ 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПРИЕМ

М.С. Былина^{1*}, С.Ф. Глаголев¹, А.С. Дюбов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
Адрес для переписки: BylinaMaria@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.39

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Былина М.С., Глаголев С.Ф., Дюбов А.С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приема цифровых информационных оптических сигналов. Часть 1. Энергетический прием // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 12–20.

Аннотация: В статье проведен анализ энергетического и когерентного приема оптических цифровых сигналов с различными форматами модуляции: амплитудной, фазовой и квадратурно-амплитудной. Определены отношения сигнала к шуму и предельные обнаружительные способности для бинарных форматов модуляции. Для энергетического приема проведено сравнение фотоприемных устройств, использующих р-і-п фотодиоды, лавинные фотодиоды и р-і-п фотодиоды в сочетании с предварительным оптическим усилителем. Приведены и проанализированы схемы гетеродинных и гомодинных оптических приемников.

Ключевые слова: когерентный прием, энергетический прием, гетеродинный приемник, гомодинный приемник, одномодовое оптическое волокно, форматы модуляции, фотоприемник, оптический усилитель, усилитель фототока, волоконно-оптическая система связи, оптический гетеродин, отношение сигнала к шуму, обнаружительная способность, распределение Пуассона, Q-фактор, фазовая автоподстройка частоты.

Введение

Существуют два основных метода приема информационных оптических сигналов фотоприемными устройствами (ФПУ) цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Это энергетический прием (ЭП) или прямое фотодетектирование и когерентный прием (КП) или гетеродинное фотодетектирование [1]. Будем полагать, что ФПУ в общем случае содержит некоторую входную оптическую схему, сам фотоприемник (ФП) или несколько ФП, преобразующие оптическую мощность в электрический сигнал (обычно ток), схему усиления и первичной обработки этого сигнала.

Входная оптическая схема может содержать: предварительный оптический усилитель (ОУ), увеличивающий оптический сигнал на входе ФП; оптический демодулятор, преобразующий модуляцию входного оптического сигнала в амплитудно-модулированный оптический сигнал; смеситель оптического входного сигнала с излучением гетеродина для когерентных систем связи [2–4].

В качестве ФП в ФПУ для ВОСП в настоящее время используют р-і-п фотодиоды (PIN ФД) или лавинные фотодиоды (ЛФД) [1]. Схема усиления и первичной обработки сигналов может содержать усилитель фототока (УФТ), аналоговый корректор и схему регенератора, преобразующего принятый аналоговый сигнал в цифровой.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПРИЕМ

При ЭП цифровых оптических сигналов обычно используется амплитудная манипуляция (АМ) или Amplitude Shift Keying (ASK). В некоторых случаях энергетический прием может использоваться для ВОСП с фазовой манипуляцией (ФМ) с двумя (DPSK, от англ. Differential Phase Shift Keying) или четырьмя (QPSK, от англ. Quadrature Phase Shift Keying) уровнями фазы. В этом случае перед ФП используется оптическая схема демодулятора, преобразующего ФМ в АМ [4].

Энергетический прием АМ сигналов до последнего десятилетия был основным для всех ВОСП. Он обладает рядом достоинств: прост в реализации, малочувствителен к изменениям длины волны (частоты), фазы и состояния поляризации излучения, может использоваться с некогерентными сравнительно широкополосными источниками с прямой модуляцией по интенсивности.

Сравним эффективности использования PIN ФД и ЛФД для ЭП квазимонохроматических оптических сигналов в течение некоторого интервала времени ΔT . Используем квантовый подход [1]. Далее распространим полученные результаты на ВОСП с АМ и модуляцией по интенсивности. При этом можно полагать, что интервал ΔT соответствует тактовому интервалу ВОСП и связан со скоростью передачи B :

$$B = 1/\Delta T = 2\nu_p, \quad (1.1)$$

где ν_p – частота первой гармоники самых быстрых изменений сигнала. Можно в первом приближении считать, что для передачи сигналов с АМ со сравнительно небольшими частотными искажениями достаточно иметь полосу частот от 0 до ν_p .

1.1. PIN фотодиод

Для приходящего на PIN ФД квазимонохроматического света со средней частотой $\bar{\nu}$ среднее количество фотонов $\bar{n}_\Phi$ за интервал времени ΔT при приеме логической «1» связано со средней оптической мощностью P_s [1]:

$$\bar{n}_\Phi = P_s \cdot \Delta T / h\bar{\nu} = \Phi \cdot \Delta T, \quad (1.2)$$

где $\Phi = P_s / h \cdot \bar{\nu}$ – средний поток фотонов, $1/c$, h – постоянная Планка.

Среднее число $\bar{m}_\Phi$ фотоэлектронов зарегистрированных PIN ФД за интервал времени ΔT при приеме логической «1» определяется квантовой эффективностью η :

$$\bar{m}_\Phi = \eta \cdot \bar{n}_\Phi. \quad (1.3)$$

При обратном напряжении более 1–2 В через PIN ФД протекает темновой (тепловой) ток со средним значением $\bar{i}_T$ (рисунок 1.1), которое уменьшается с уменьшением площади фоточувствительной поверхности и сильно возрастает с увеличением абсолютной температуры PIN ФД.

Определим среднее количество $\bar{m}_T$ темновых электронов, которые проходят через PIN ФД за время ΔT :

$$\bar{m}_T = \bar{i}_T \cdot \Delta T / e = \bar{i}_T / (e \cdot B), \quad (1.4)$$

где e – заряд электрона.

На рисунке 1.2 показана зависимость количества темновых электронов, проходящих через PIN ФД, от темнового тока, для ВОСП с различными скоростями передачи B .

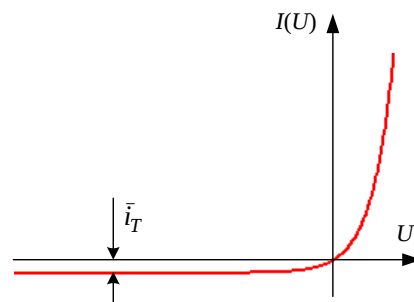


Рис. 1.1. Определение среднего значения темнового тока по вольтамперной характеристике PIN ФД

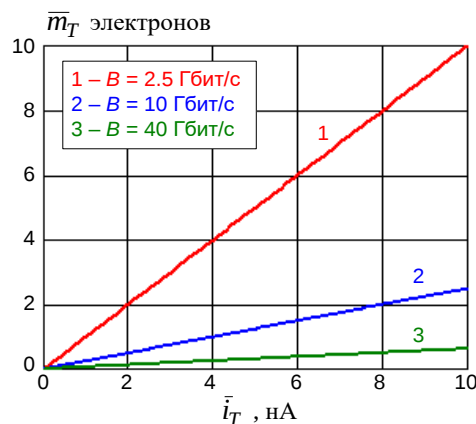


Рис. 1.2. Зависимость среднего количества темновых электронов за один такт ВОСП с различными скоростями от темнового тока

Среднее количество электронов, проходящих через PIN ФД, будет равно $\bar{m}_{pn} = \bar{m}_\Phi + \bar{m}_T$ при передаче логической «1» и $\bar{m}_{pn} = \bar{m}_T$ при передаче логического «0». Будем полагать распределение количества прошедших через PIN ФД электронов пуассоновским. Для плотности вероятности прохождения за время ΔT через PIN ФД m электронов можно записать [1]:

$$p(m) = \frac{\bar{m}_{pn}^m \cdot \exp(-\bar{m}_{pn})}{m!}. \quad (1.5)$$

На рисунке 1.3 приведены результаты расчета по (1.5).

Для распределения Пуассона дисперсия количества электронов за интервал ΔT равна среднему числу электронов [1]:

$$\sigma_m^2 = \bar{m}_{pn}. \quad (1.6)$$

Для логической «1» дисперсия составляет $\sigma_{m1}^2 = \bar{m}_\Phi + \bar{m}_T$, а для логического «0» – $\sigma_{m0}^2 = \bar{m}_T$. Отношение сигнала к шуму при передаче логической «1» составит:

$$SN_e = \frac{\bar{m}_\Phi^2}{\sigma_m^2} = \frac{\bar{m}_\Phi^2}{\bar{m}_\Phi + \bar{m}_T} = \frac{\bar{m}_\Phi}{1 + \bar{m}_T / \bar{m}_\Phi}. \quad (1.7)$$

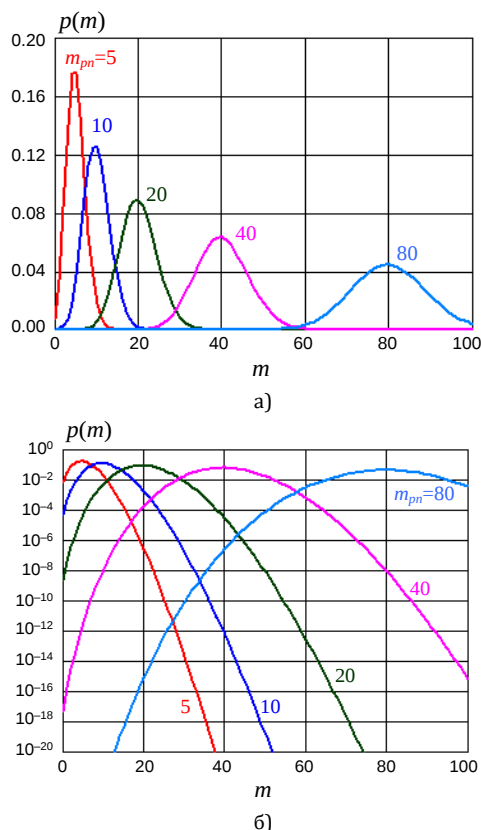


Рис. 1.3. Распределение плотности вероятности количества электронов в линейном (а) и логарифмическом масштабе (б) для распределения Пуассона

Запишем выражения для токов через PIN ФД при приеме логической «1»:

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= \bar{i}_\Phi + \bar{i}_T = (e/\Delta T) \cdot (\bar{m}_\Phi + \bar{m}_T) = \\ &= (e \cdot \eta \cdot \bar{n}/\Delta T) \cdot (1 + \bar{m}_T/\bar{m}_\Phi), \end{aligned} \quad (1.8a)$$

и логического «0»:

$$\bar{i}_0 = \bar{i}_T = e \cdot \bar{m}_T/\Delta T. \quad (1.8б)$$

Запишем выражения для дисперсии тока через PIN ФД при приеме логической «1»:

$$\begin{aligned} \sigma_{i1}^2 &= (e/\Delta T)^2 (\bar{m}_\Phi + \bar{m}_T) = e \cdot \bar{i}_1/\Delta T = \\ &= 2 \cdot e \cdot (\bar{i}_\Phi + \bar{i}_T) \cdot \nu_p, \end{aligned} \quad (1.9a)$$

и логического «0»:

$$\sigma_{i0}^2 = (e/\Delta T)^2 \bar{m}_T = e \cdot \bar{i}_T/\Delta T = 2 \cdot e \cdot \bar{i}_T \cdot \nu_p. \quad (1.9б)$$

Выражения (1.9) хорошо известны, как формула Шоттки для дисперсии тока дробового шума для PIN ФД в полосе частот F_p , которая определяется средним значением тока через $p-i-n$ переход.

Из (1.7) следует, что отношение сигнала к шуму при передаче логической «1» достигает максимальной величины для идеального PIN ФД с $\bar{m}_T = 0$ (без темнового тока):

$$SN_{e \max} = \bar{m}_\Phi. \quad (1.10)$$

Полагая, что для безошибочного приема сигнала идеальным фотоприемником достаточно даже

одного фотоэлектрона, определим минимально возможную вероятность ошибки с учетом вероятности пропуска цели и ложной тревоги. Для этой идеальной ситуации вероятность ошибки из (1.5) определяется, как вероятность того, что за тактовый интервал ΔT не будет зарегистрировано ни одного фотоэлектрона:

$$p_e = p(0) = e^{-\bar{m}}. \quad (1.11)$$

Из (1.11) и (1.2) можно получить выражение для расчета необходимого количества фотонов $\bar{n}_0$ на тактовый интервал ΔT для обеспечения определенной вероятности ошибки пропуска сигнала:

$$\bar{n}_0 = -\ln(p_e)/\eta. \quad (1.12)$$

На рисунке 1.4а показана зависимость $\bar{n}_0(p_e)$, рассчитанная по (1.12) при различных значениях η . Из (1.12) и (1.2) можно найти пороговую мощность ФД, ограниченную квантовой природой оптического излучения (идеальная модель оптической системы связи):

$$P_{\text{пор}} = \bar{n}_0 \cdot h\nu/\Delta T = -(h\nu/\eta) \cdot B \cdot \ln(p_e). \quad (1.13)$$

Результаты расчетов по (1.13) при $p_e = 10^{-12}$, $\eta = 0,8$ приведены на рисунке 1.4б.

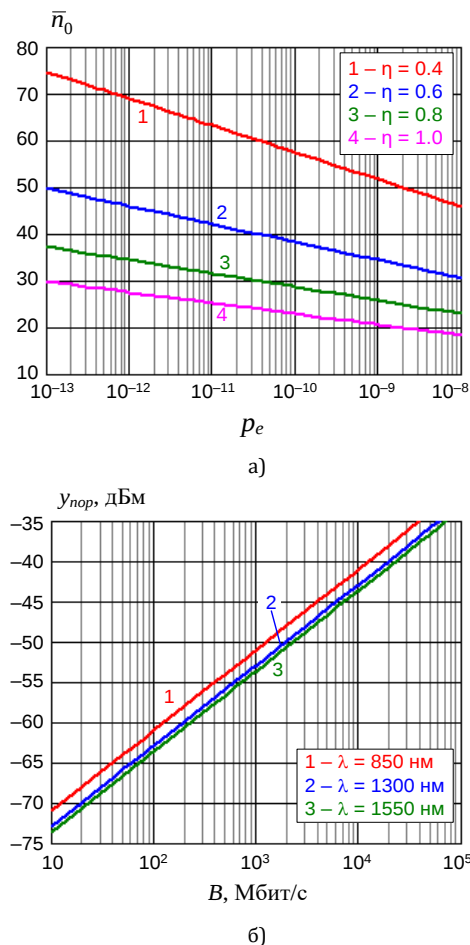


Рис. 1.4. Зависимость необходимого количества фотонов на тактовый интервал от вероятности ошибки (а) и зависимость уровня пороговой мощности ФД, ограниченной квантовыми шумами источника излучения от скорости передачи (б)

1.2. Идеальный ЛФД

Рассмотрим идеальный (нешумящий) ЛФД с коэффициентом лавинного умножения (усиления) M . Для него фототок, дисперсия и отношение сигнала к шуму при передаче логической «1» будут равны:

$$\bar{i}_1 = \bar{i}_\Phi = e \cdot \bar{M} \cdot \eta \cdot \Phi = e \cdot \bar{M} \cdot \eta \cdot P_s / (h\nu), \quad (1.14)$$

$$\sigma_{i1}^2 = 2 \cdot e \cdot \bar{i}_\Phi \cdot \bar{M} \cdot \nu_p = 2 \cdot e^2 \cdot \bar{M}^2 \cdot \eta \cdot \nu_p \cdot \Phi, \quad (1.15)$$

$$SN_e = \bar{i}_\Phi^2 / \sigma_{i1}^2 = \bar{i}_\Phi^2 / (2e \cdot \bar{i}_\Phi \cdot \bar{M} \cdot \nu_p) = \eta \cdot \Phi / (2\nu_p) = \bar{m}_\Phi. \quad (1.16)$$

Отношение сигнала к шуму не зависит от усиления идеального ЛФД, а чувствительность приемника возрастает в M раз.

1.3. Реальный ЛФД. Учет шумов лавины и темнового тока

Реальный ЛФД обладает шумами лавины, которые характеризуются коэффициентом избыточного шума $F(M)$ [1]. Запишем выражения для фототока и его дисперсии при передаче логической «1» с учетом темнового тока ЛФД:

$$\bar{i}_\Phi = e \cdot \bar{M} \cdot \eta \cdot \Phi = e \cdot \bar{M} \cdot \eta \cdot P_s / (h \cdot \bar{\nu}) = e \cdot \bar{M} \cdot \bar{m}_\Phi / \Delta T, \quad (1.17)$$

$$\sigma_{i1}^2 = 2 \cdot e \cdot (\bar{i}_\Phi + \bar{i}_T) \cdot \bar{M} \cdot \nu_p \cdot F(\bar{M}) = (e/\Delta T)^2 \cdot \bar{M}^2 \cdot (\bar{m}_\Phi + \bar{m}_T) \cdot F(\bar{M}) \quad (1.18)$$

$$F(\bar{M}) = \bar{M}^2 / \bar{M}^2 = 1 + \sigma_M^2 / \bar{M}^2 \quad (1.19)$$

где $F(\bar{M})$ – среднее значение коэффициента избыточного шума лавины, $\bar{M}$ и σ_M^2 – среднее значение и дисперсия коэффициента усиления ЛФД. Отметим, что в выражении (1.18) принято, что темновой ток усиливается в ЛФД также как и сигнал.

При передаче логического «0» для дисперсии тока можно записать:

$$\sigma_{i0}^2 = (e/\Delta T)^2 \cdot \bar{M}^2 \cdot \bar{m}_T \cdot F(\bar{M}). \quad (1.20)$$

Запишем выражение для отношения сигнала к шуму при передаче логической «1»:

$$SN_e = \bar{i}_\Phi^2 / \sigma_{i1}^2 = \bar{i}_\Phi^2 / (2e \cdot (\bar{i}_\Phi + \bar{i}_T) \cdot \bar{M} \cdot \nu_p \cdot F(\bar{M})) = \bar{m}_\Phi / ((1 + \bar{m}_T / \bar{m}_\Phi) \cdot F(\bar{M})) \quad (1.21)$$

Рассмотрим подробнее функцию $F(M)$, которую называют шум-фактором или коэффициентом шума лавинного умножения. $F(M)$ можно определить по формуле Макинтайра [1]:

$$F(\bar{M}) = \bar{M} \cdot [1 - (1 - k_\alpha) \cdot ((\bar{M} - 1) / \bar{M})^2], \quad (1.22)$$

$$k_\alpha = \alpha_p / \alpha_n.$$

где k_α – коэффициент, определяемый отношением коэффициентов ионизации дырок α_p и электронов α_n . Коэффициенты ионизации представляют собой вероятности ионизации на единицу длины (1/см).

При упрощенном рассмотрении мы полагаем, что коэффициенты ионизации постоянны. Они зависят от свойств материала полупроводника и составляют: для Si – $k_\alpha = 0.05-0.1$, для Ge – $k_\alpha \approx 1$ и для AsGa – $k_\alpha = 0.4-0.5$. Результаты расчетов по (1.19) представлены на рисунке 1.5.

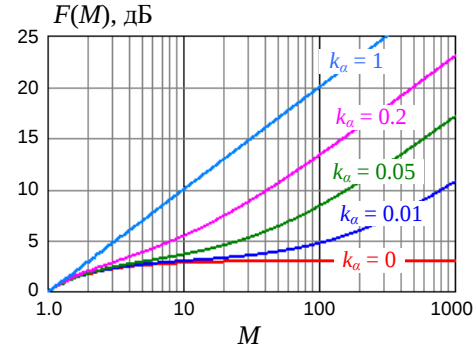


Рис. 1.5. Зависимость коэффициента шума от коэффициента лавинного умножения

1.4. Использование оптического предусилителя

Для увеличения чувствительности ФПУ с PIN ФД можно использовать оптический предусилитель, например ОУ EDFA. Будем полагать, что на вход ОУ приходит в среднем $\bar{n}_\Phi$ фотонов сигнала за интервал времени ΔT . ОУ будем характеризовать коэффициентом усиления G при малом сигнале и шум-фактором F_n . Запишем выражения для среднего количества фотонов сигнала на входе PIN ФД $\bar{n}_{\Phi pn}$, средней мощности усиленного спонтанного излучения (УСИ) P_{sp} и среднего количества фотонов УСИ $n_{\Phi sp}$ на выходе ОУ:

$$\begin{aligned} \bar{n}_{\Phi pn} &= \bar{n}_\Phi \cdot G, \\ P_{sp} &= h_p \cdot \nu \cdot \Delta \nu \cdot (G - 1) \cdot F_n, \\ n_{\Phi sp} &= (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta \nu \cdot \Delta T, \end{aligned} \quad (1.23)$$

где $\Delta \nu$ – полоса пропускания полосового оптического фильтра для сигнала.

Определим среднее количество фотоэлектронов сигнала и УСИ:

$$\begin{aligned} \bar{m}_{\Phi pn} &= \eta \cdot \bar{n}_\Phi \cdot G, \\ \bar{m}_{\Phi sp} &= \eta \cdot (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta \nu \cdot \Delta T. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Полагая, что количества фотоэлектронов сигнала и УСИ подчиняются закону Пуассона, запишем выражения для их дисперсий:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Phi pn}^2 &= \eta \cdot \bar{n}_\Phi \cdot G^2, \\ \sigma_{\Phi sp}^2 &= \eta \cdot (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta \nu \cdot \Delta T. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Запишем выражение для отношения сигнала к шуму на выходе ОУ при передаче логической «1»:

$$SN_{e OA} = \frac{\eta^2 \cdot \bar{n}_\Phi^2 \cdot G^2}{\sigma_{\Phi pn}^2 + \sigma_{\Phi sp}^2} = \frac{\eta \cdot \bar{n}_\Phi}{1 + (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta \nu \cdot \Delta T / (\bar{n}_\Phi \cdot G^2)}. \quad (1.26)$$

1.5. Учет шумов последующей схемы

Все избыточные шумы последующей схемы (тепловые в резисторах, шумы транзисторов и других элементов) можно объединить в один источник случайного тока i_r , приведенного ко входу УФТ. Его среднее значение равно 0, а среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_r зависит от температуры, ширины полосы приемника и параметров схемы. Полагаем, что эти шумы распределены нормально по закону Гаусса и имеют математическое ожидание равно 0. Отметим, что шумы схемы учитываются не так, как темновой ток, который имеет некоторое среднее значение $\bar{i}_T$. Введем параметр шумов схемы [1]:

$$\sigma_q = \sigma_r \cdot \Delta T / e = \sigma_r / (2 \cdot e \cdot \nu_p), \quad (1.27)$$

который представляет собой СКО количества шумовых электронов накопленных за время ΔT .

В простейшем случае источником теплового шума является резистор R_L в цепи обратной связи УФТ. Учет других источников шума УФТ проведем с помощью коэффициента шума $k_n > 1$.

Тогда для СКО шумового тока УФТ и СКО количества шумовых электронов справедливо:

$$\begin{aligned} \sigma_r^2 &= 4 \cdot k_b \cdot T_a \cdot \nu_p \cdot k_n / R_L = \\ &= 2 \cdot k_b \cdot T_a \cdot k_n / (R_L \cdot \Delta T) \end{aligned} \quad (1.28)$$

$$\begin{aligned} \sigma_q &= \sigma_r \cdot \Delta T \cdot \sqrt{k_n} / e = \\ &= \sqrt{2 \cdot k_b \cdot T_a \cdot \Delta T \cdot k_n / (R_L \cdot e^2)} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Для определения максимально допустимой величины сопротивления R_L , полагаем, что полоса пропускания УФТ ограничивается постоянной времени $\tau = C_{pn} \cdot R_L$, где C_{pn} – емкость p - n перехода ФП. Для R_L справедливо:

$$R_L \leq 1 / (2\pi \cdot C_{pn} \cdot \nu_p). \quad (1.30)$$

Учитывая (1.30) и выбирая максимально возможную величину R_L определим минимальное СКО количества шумовых электронов по (1.29):

$$\sigma_{q_{\min}} = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot C_{pn} \cdot k_b \cdot T_a \cdot k_n / e^2}. \quad (1.31)$$

Видно, что $\sigma_{q_{\min}}$ не зависит от B , но сильно зависит от C_{pn} . В таблице 1.1 приведены результаты расчетов по выражениям (1.30) и (1.31).

ТАБЛИЦА 1.1

B , Гбит/с	2.5		10		40	
ΔT , пс	400		100		25	
C_{pn} , пФ	R_L , Ом	σ_q	R_L , Ом	σ_q	R_L , Ом	σ_q
0.05	2500	450	1250	450	640	450
0.2	640	640	320	640	160	640
0.8	160	900	80	900	40	900

Уточним выражение (1.7) для отношения сигнала к шуму для PIN ФД при передаче логической «1» с учетом шумов схемы:

$$\begin{aligned} SN_{e_{PD}} &= \frac{\bar{i}_\Phi^2}{\sigma_i^2} = \frac{\bar{i}_\Phi^2}{\bar{i}_\Phi + \bar{i}_T + \sigma_r^2} = \\ &= \frac{\bar{m}_\Phi^2}{\bar{m}_\Phi + \bar{m}_T + \sigma_q^2} = \frac{\bar{m}_\Phi}{1 + (\bar{m}_T + \sigma_q^2) / \bar{m}_\Phi}. \end{aligned} \quad (1.32a)$$

Из (1.4) и (1.32a) с учетом рисунка 1.1. и таблицы 1.1 видно, что для высокоскоростных ВОСП ($B \geq 2,5$ Гбит/с) влиянием темнового тока можно пренебречь:

$$\begin{aligned} SN_{e_{PIN}} &= \frac{\bar{i}_\Phi^2}{\sigma_i^2} = \frac{\bar{i}_\Phi^2}{\bar{i}_\Phi + \sigma_r^2} = \\ &= \frac{\bar{m}_\Phi^2}{\bar{m}_\Phi + \sigma_q^2} = \frac{\bar{m}_\Phi}{1 + \sigma_q^2 / \bar{m}_\Phi}. \end{aligned} \quad (1.32b)$$

Уточним также выражение (1.21) для отношения сигнала к шуму для ЛФД с учетом шумов схемы и без учета темнового тока при передаче логической «1»:

$$\begin{aligned} SN_{e_{APD}} &= \frac{\bar{i}_\Phi^2}{\sigma_i^2} = \frac{\bar{i}_\Phi^2 \cdot \Delta T}{e \cdot \bar{M}^2 \cdot F(M) + \sigma_r^2} = \\ &= \frac{\bar{m}_\Phi}{F(M) + \sigma_q^2 / (\bar{m}_\Phi \cdot \bar{M}^2)}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Уточним также выражение (1.26) для отношения сигнала к шуму для ФПУ с оптическим предусилителем с учетом шумов схемы при передаче логической «1»:

$$SN_{e_{OA}} = \frac{\bar{m}_\Phi}{1 + \frac{(G-1) \cdot F_n \cdot \Delta \nu \cdot \Delta T}{(\bar{n}_\Phi \cdot G^2)} + \frac{\sigma_q^2}{(\bar{m}_\Phi \cdot G^2)}}. \quad (1.34)$$

1.6. Оптимизация коэффициента лавинного умножения

Выразим в явном виде зависимость отношения сигнала к шуму в ЛФД при передаче логической «1» от M . Из (1.33) с учетом (1.22):

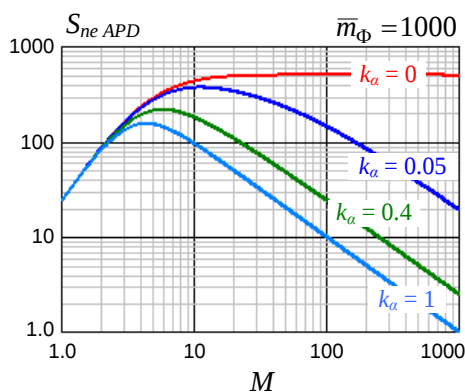
$$SN_{e_{APD}} = \frac{\bar{m}_\Phi^2 \cdot \bar{M}^2}{\bar{m}_\Phi \cdot \bar{M} \cdot \beta + \sigma_q^2}, \quad (1.35)$$

где

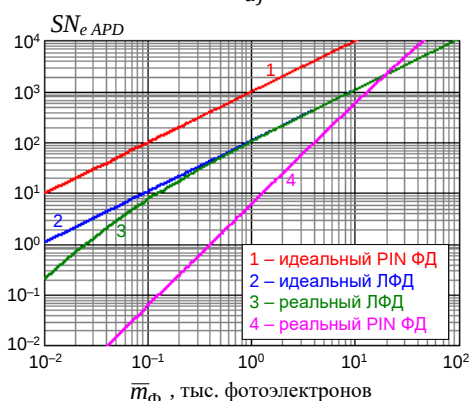
$$\beta = 2 \cdot \bar{M} - 1 + k_\alpha \cdot (\bar{M} - 1)^2.$$

На рисунке 1.6а показаны результаты расчета по (1.35) зависимостей $SN_{e_{APD}}$ от M . Видно, что при $k_\alpha = 0$ (идеальный ЛФД) $SN_{e_{APD}}$ растет с увеличением M и достигает насыщения. Для реального ЛФД ($k_\alpha > 0$) $SN_{e_{APD}}$ растет с увеличением M , достигает максимума и затем уменьшается в результате резкого роста шума усиления. При $k_\alpha = 0$ $SN_{e_{APD}}$ максимально, а при $k_\alpha = 1$ – минимально.

На рисунке 1.6б показаны результаты расчета по (1.35) зависимостей $SN_{e_{LPD}}$ от $\bar{m}_\Phi$. При расчете $SN_{e_{APD}}$ для идеальных PIN ФД и ЛФД мы пренебрегли темновыми токами и шумами схемы. Для реальных PIN ФД и ЛФД значение СКО σ_q принималось равным 600.



а)



б)

Рис. 1.6. Зависимости $SN_{e APD}$ при передаче логической «1»: а) – от M , б) – от m_Φ

Исследование выражения (1.35) для отношения сигнала к шуму на экстремум позволило получить аналитические выражения для оптимального коэффициента лавинного умножения M_{opt} и максимального при данных параметрах отношения сигнала к шуму SN_{opt} :

$$\bar{M}_{opt} = \sqrt[3]{A} - (1 - k_\alpha) / (3k_\alpha \cdot \sqrt[3]{A}), \quad (1.36)$$

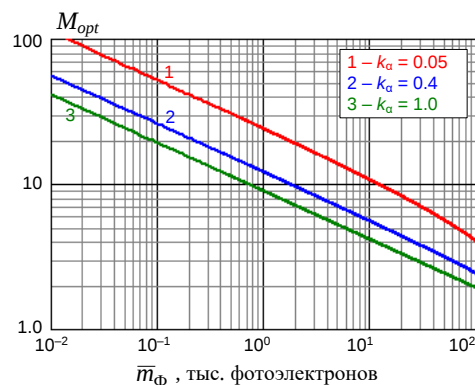
$$SN_{opt} = \frac{\bar{m}_\Phi^2 \cdot \bar{M}_{opt}^2}{\bar{m}_\Phi \cdot \bar{M}_{opt} \cdot \beta + \sigma_q^2}, \quad (1.37)$$

где

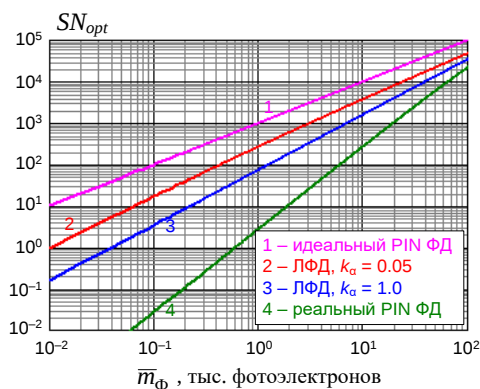
$$\beta = 2 \cdot \bar{M}_{opt} - 1 + k_\alpha \cdot (\bar{M}_{opt} - 1)^2,$$

$$A = \sqrt{\frac{(1 - k_\alpha)}{(9k_\alpha^2)} + \frac{(1 - k_\alpha^3)}{(27k_\alpha^3)} + \frac{\sigma_q^4}{(k_\alpha^2 \cdot \bar{m}_\Phi^2)} + \frac{\sigma_q^2}{(k_\alpha \cdot \bar{m}_\Phi)}}.$$

На рисунке 1.7а приведены результаты расчетов M_{opt} при передаче логической «1» от количества фотоэлектронов. На рисунке 1.7б приведены расчеты SN_{opt} для кремниевого и германиевого ЛФД при СКО количества шумовых электронов равного $\sigma_q = 600$. Там же приведены результаты расчетов для идеального ($\sigma_q = 0$) и реального р-и-п ФД ($\sigma_q = 600$). Видно, что использование ЛФД позволяет увеличить отношение сигнала к шуму при малых сигналах и, особенно, при больших шумах последующей схемы.



а)



б)

Рис. 1.7. Зависимость оптимального коэффициента лавинного умножения (а) и отношения сигнала к шуму (б) от среднего значения фотоэлектронов для ЛФД и р-и-п ФД

1.7. Обнаружительная способность энергетического ФПУ с ЛФД при бинарном приеме

Полагаем, что при бинарном приеме ФПУ измеряет количество электронов s , накопленных за каждый бит и сравнивает его с заданным пороговым значением s_{pr} . Если $s > s_{pr}$ выбирается бит «1», в противном случае выбирается «0». Вероятности ошибок p_1 (регистрация «0» вместо правильной «1») и p_0 (регистрация «1» вместо правильного «0») определяются с помощью двух распределений (рисунки 1.8) случайной величины s , с параметрами:

$$\text{для «0» – среднее } \bar{s}_0 = 0, \quad \text{дисперсия } \sigma_0^2 = \sigma_q^2; \quad (1.38)$$

$$\text{для «1» – среднее } \bar{s}_1 = \bar{m}_\Phi \cdot \bar{M}, \quad \text{дисперсия } \sigma_1^2 = \bar{m}_\Phi \cdot \bar{M}^2 \cdot F(M) + \sigma_q^2. \quad (1.39)$$

В этих выражениях темновым током мы пренебрегаем. Для бита «0» величина s равна количеству накопленных за один бит шумовых электронов схемы q , распределенных по закону Гаусса. Для бита «1» она складывается из двух случайных величин: количества накопленных фотоэлектронов m_Φ , распределенных по закону Пуассона, и количества накопленных шумовых электронов схемы q , распределенных по закону Гаусса. Полагаем, что их сумма распределена по Гауссу.

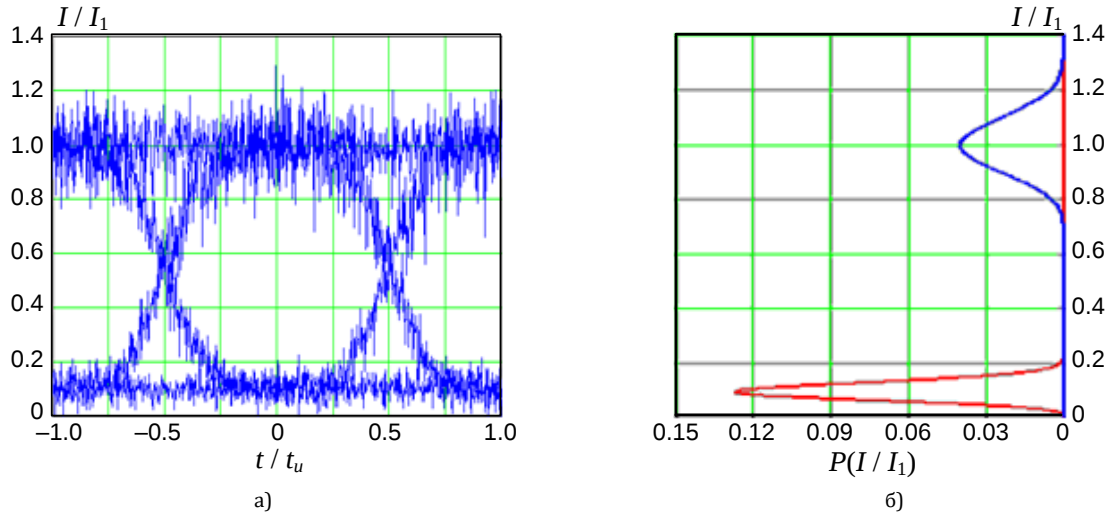


Рис. 1.8. Глаз-диаграмма случайного бинарного сигнала (а) и распределения вероятностей для него (б)

Вероятность p_0 представляет собой интеграл от гауссова распределения $p(s)$ со средним значением $\bar{s}_0$ и СКО σ_0 в пределах от $s = s_{pr}$ до $s = \infty$. Вероятность p_1 представляет собой интеграл от гауссова распределения $p(s)$ со средним значением $\bar{s}_1$ и СКО σ_1 в пределах от $s = -\infty$ до $s = s_{pr}$. Порог s_{pr} выбирается таким, чтобы при одинаковой вероятности «0» и «1» средняя вероятность ошибки $p_e = 0,5 \cdot (p_0 + p_1)$ была минимальной.

Если σ_0^2 и σ_1^2 много меньше $\bar{s}_1 - \bar{s}_0$, то вероятность ошибки ФПУ с оптимальным порогом решения приближенно равна [1]:

$$p_e \approx 0,5 \cdot [1 - \operatorname{erf}(Q/\sqrt{2})], \quad (1.40)$$

$$Q \approx (\bar{s}_1 - \bar{s}_0)/(\sigma_0 + \sigma_1),$$

где Q – Q -фактор, $\operatorname{erf}(x)$ – функция ошибок:

$$\operatorname{erf}(z) = (2/\sqrt{\pi}) \cdot \int_0^z \exp(-x^2) \cdot dx. \quad (1.41)$$

На рисунке 1.9 показана зависимость p_e от Q [1]. Видно, что $p_e = 10^{-9}$ при $Q = 6$.

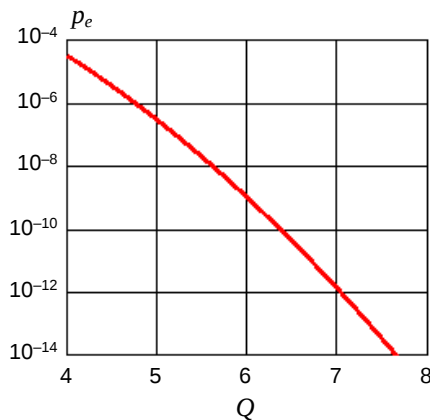


Рис. 1.9. Зависимость вероятности ошибок от Q фактора

Из (1.40) следует:

$$\bar{s}_1 - \bar{s}_0 = Q \cdot (\sigma_0 + \sigma_1). \quad (1.42)$$

С учетом (1.38), (1.39) из (1.42) после элементарных преобразований получаем:

$$\bar{m}_\Phi - Q \cdot (\sigma_q/\bar{M}) = Q \sqrt{(\sigma_q/\bar{M})^2 + \bar{m}_\Phi F(\bar{M})}. \quad (1.43)$$

Из (1.43) получим выражение для минимально необходимого $\bar{m}_\Phi$ для обеспечения требуемого значения Q (требуемой вероятности ошибки p_e):

$$\bar{m}_\Phi > 2Q \cdot (\sigma_q/\bar{M}) + Q^2 \cdot F(\bar{M}). \quad (1.44)$$

Под обнаружительной способностью $\bar{m}_a$ энергетического ФПУ мы будем понимать минимальное $\bar{m}_\Phi$ на один бит, необходимое для обеспечения заданного значения Q :

$$\begin{aligned} \bar{m}_a &= 0,5 \cdot (\bar{s}_1 - \bar{s}_0) = 0,5 \cdot \bar{m}_\Phi = \\ &= Q \cdot (\sigma_q/\bar{M}) + 0,5 \cdot Q^2 \cdot F(\bar{M}) \end{aligned} \quad (1.45)$$

На рис 1.10 показаны зависимости $\bar{m}_a$ от $\bar{M}$ для различных значений σ_q . Расчеты проводились для $Q = 6$ и двух значений $k_\alpha = 0,05$ и $0,4$.

Для PIN ФД из (1.45) получаем:

$$\begin{aligned} \bar{m}_a &= 0,5 \cdot (\bar{s}_1 - \bar{s}_0) = 0,5 \cdot \bar{m}_\Phi = \\ &= Q \cdot \sigma_q + 0,5 \cdot Q^2. \end{aligned} \quad (1.46)$$

Из (1.45) следует, что оптимальный коэффициент лавинного умножения $\bar{M}_{opt}$ для ФПУ с ЛФД, обеспечивающий $\min$ значение $\bar{m}_a = \bar{m}_{a,opt}$:

$$\bar{M}_{opt} = \sqrt{1 + (\sigma_q - 3)/(3 \cdot k_\alpha)}. \quad (1.47)$$

На рисунке 1.11 показаны результаты расчетов зависимостей $\bar{M}_{opt}$ по (1.47) и $\bar{m}_{a,opt} = \bar{m}_a(\bar{M}_{opt})$ по (1.45) для $Q = 6$ от σ_q . Для сравнения на рисунке 1.11б приведены также результаты расчета $\bar{m}_a$ для ФПУ с PIN ФД. Видно, что ФПУ с ЛФД обладают лучшими параметрами в присутствии шумов схемы.

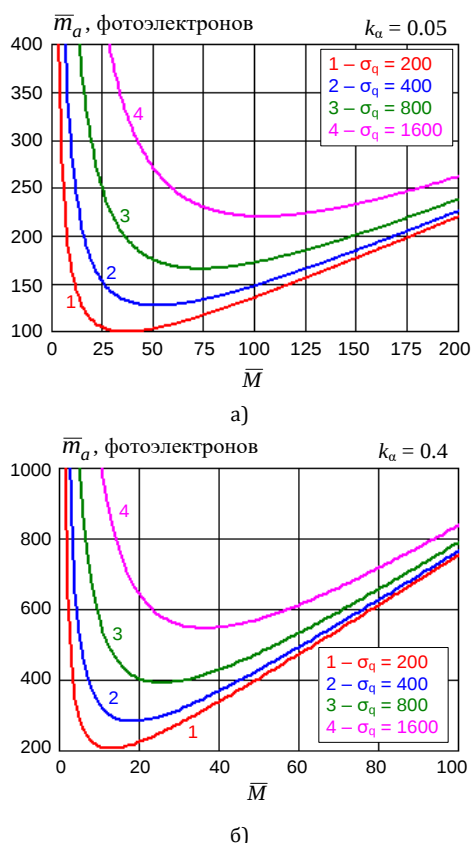


Рис. 1.10. Зависимости обнаружительной способности ФПУ с ЛФД на основе Si (а) и InGaAs (б) от $\bar{M}$

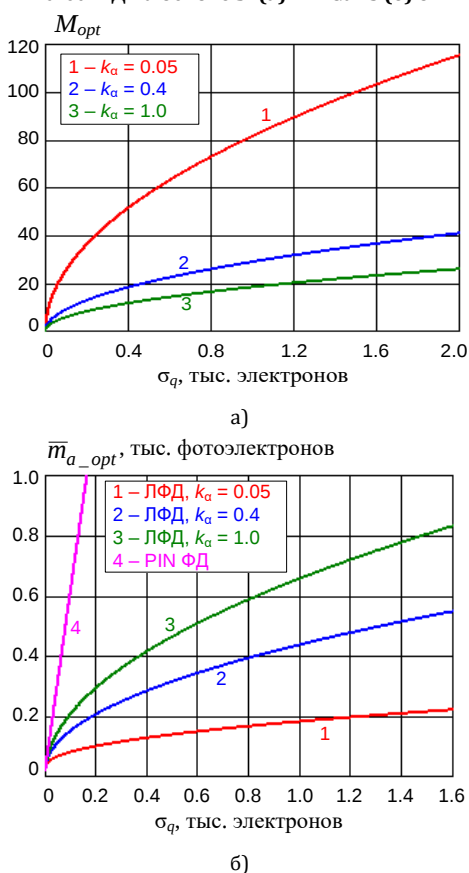


Рис. 1.11. Зависимости оптимального коэффициента лавинного умножения (а) и оптимальной обнаружительной способности ФПУ (б) с ЛФД на основе Si ($k_a=0.05$), InGaAs ($k_a=0.4$) и Ge ($k_a=1$) от σ_q

1.8. Обнаружительная способность энергетического ФПУ с оптическим предусилителем при бинарном приеме

Следуя рассуждениям в подразделе 1.7, определим параметры случайной величины s с параметрами:

$$\text{для «0» – среднее } \bar{s}_0 = 0, \text{ дисперсия } \sigma_0^2 = \sigma_q^2 + \sigma_{sp}^2 = \sigma_q^2 + \eta \cdot (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta v \cdot \Delta T; \quad (1.48)$$

$$\text{для «1» – среднее } \bar{s}_1 = \bar{m}_\Phi \cdot G, \text{ дисперсия } \sigma_1^2 = \bar{m}_\Phi \cdot G^2 + \sigma_q^2 + \eta \cdot (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta v \cdot \Delta T. \quad (1.49)$$

Используя (1.42) получим:

$$\bar{m}_\Phi - \frac{Q}{G} \cdot \sqrt{\bar{m}_\Phi \cdot G^2 + A} = Q \cdot \sqrt{A}, \quad (1.50)$$

где

$$A = \sigma_q^2 + \eta \cdot (G - 1) \cdot F_n \cdot \Delta v \cdot \Delta T. \quad (1.51)$$

Возведем в квадрат левую и правую части выражения (1.50) и после преобразования получим уравнение:

$$\bar{m}_\Phi^2 + Q^2 \cdot \bar{m}_\Phi - 2\bar{m}_\Phi \cdot Q \cdot \sqrt{\bar{m}_\Phi \cdot G^2 + A} = 0. \quad (1.52)$$

При реальных параметрах УФТ, PIN ФД (см. таблицу 1.1) можно принять $\sigma_q < 1000$ электронов. Реальный ОУ EDFA может иметь коэффициент усиления $G = 1000$ и шум фактор $F_n = 6$. При этом обычно выполняется условие $\bar{m}_\Phi > A/G^2$ и уравнение (1.52) примет вид:

$$\bar{m}_\Phi + Q^2 - 2Q \cdot \sqrt{\bar{m}_\Phi} = 0. \quad (1.53)$$

Решение (1.53) для минимально необходимого $\bar{m}_\Phi$, обеспечивающего требуемое значение Q :

$$\bar{m}_\Phi > Q^2. \quad (1.54)$$

Следуя (1.45), определим обнаружительную способность энергетического ФПУ с оптическим предусилителем:

$$\bar{m}_a = 0.5 \cdot (\bar{s}_1 - \bar{s}_0) = 0.5 \cdot \bar{m}_\Phi = Q^2/2. \quad (1.55)$$

Для $Q = 6$ $\bar{m}_a = 18$ фотоэлектронов.

1.9. Сравнение энергетических ФПУ по обнаружительной способности

В таблице 1.2 приведены результаты расчетов обнаружительной способности различных ФПУ с ЭП при различных скоростях передачи с использованием выражений (1.45), (1.46), (1.47) и (1.55).

Отметим, что при расчетах обнаружительной способности распределение суммы фотоэлектронов и шумовых электронов считалось нормальным, а реально надо было рассматривать композицию двух законов распределения, т. е. Гаусса и Пуассона. Это допущение приводит к ошибкам при малой сумме фотоэлектронов и шумовых электронов. Точные расчеты показывают, что для идеального ФП обнаружительная способность будет равна 10 фотоэлектронам ($5,1 \cdot 10^{-5}$ мВт).

ТАБЛИЦА 1.2

Скорость передачи B , Гбит/с	2.5	10	40
СКО шумовых электронов	225	450	900
Тип ФПУ	Параметр k_a	Обнаружительная способность $\bar{m}_a$, фотон/бит (пороговая мощность, мВт) при $\eta = 1$	
Идеальный ФП	–	18 ($9.2 \cdot 10^{-5}$)	18 ($9.2 \cdot 10^{-5}$)
PIN ФД	–	1500 ($4.8 \cdot 10^{-4}$)	2900 ($3.7 \cdot 10^{-3}$)
Si ЛФД	0.05	100 ($3.2 \cdot 10^{-5}$)	125 ($1.6 \cdot 10^{-4}$)
InGaAs ЛФД	0.4	250 ($8 \cdot 10^{-5}$)	300 ($3.8 \cdot 10^{-4}$)
PIN ФД с ОУ	–	18 ($9.2 \cdot 10^{-5}$)	18 ($9.2 \cdot 10^{-5}$)

К идеальному ФП по обнаружительной способности приближается ФПУ с предварительным ОУ. Даже лучшие ФПУ с ЛФД уступают по обнаружительной способности идеальному ФП и ФПУ с предварительным ОУ. Наилучшими параметрами обладают кремниевые ЛФД. Далее следуют арсенид-галлиевые и германиевые ЛФД.

Отметим, что при использовании фазового оптического демодулятора ФПУ с ЭП позволяют осуществлять детектирование сигналов с ФМ [4], например DPSK и QPSK. При этом обнаружительная способность в два раза улучшается.

Продолжение следует.

Список используемых источников

1. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. В 2-х т. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. Т. 2. 784 с.
2. Наний О.Е. Когерентные системы связи // Lightwave Russian Edition. 2008. № 4. С. 23–27.
3. Наний О.Е., Трешиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. № 9. С. 13–19.
4. Kikuchi K., Miyazaki T., Nakazawa M. High Spectral Density Optical Communication Technologies (Optical and Fiber Communications Reports). Springer, 2010.

* * *

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIRECT AND COHERENT DETECTION METHODS FOR DIGITAL INFORMATION OPTICAL SIGNALS. PART 1. DIRECT DETECTION

M. Bylina¹, S. Glagolev¹, A. Diubov¹

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Bylina M., Glagolev S., Diubov A. Comparative Analysis of Direct and Coherent Detection Methods for Digital Information Optical Signals. Part 1. Direct Detection // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol. 3. Iss. 3. PP. 12–20.

Abstract: The paper analyzes the direct detection and coherent detection methods for optical digital signals with various modulation formats: amplitude, phase, and quadrature-amplitude. Signal-to-noise ratios and detectability limits for binary modulation formats were determined. The paper reviews direct detection optical receivers consisting of p-i-n photodiodes and avalanche photodiodes and combination of optical pre-amplifier with p-i-n photodiodes. Block diagrams of heterodyne and homodyne receivers were presented and analyzed.

Keywords: coherent detection, direct reception, heterodyne receiver, homodyne receiver, single-mode optical fiber, modulation formats, photodetector, optical amplifier, photocurrent amplifier, fiber optic communication system, optical heterodyne, signal-to-noise ratio, detectability, Poisson distribution, Q-factor, phase-locked loop.