

УДК 621.396.624

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ В ЦИФРОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Н.В. ТАРЧЕНКО, Ю.С. МОЙСИЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 12 ноября 2018*

**Аннотация.** Разработаны математические модели оптических приемников цифровых сигналов, позволяющие оценить отношение сигнал/шум на выходе этих приемников (на входе устройства принятия решения) и выявить степень влияния на его значение таких показателей, как уровень информационного сигнала и сигнала гетеродина, полосы пропускания оптического приемника.

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая система передачи, непосредственный прием, когерентный прием, гетеродинный прием, гомодинный прием, отношение сигнал/шум, оптический приемник.

### Введение

При классификации волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) по способу детектирования оптического сигнала выделяют системы с непосредственным и когерентным (гомодинным или гетеродинным) приемом. Качество функционирования приемных оптических модулей определяется электрическим отношением сигнал/шум (ЭОСШ) в точке регенерации сигнала [1, 2].

Целью исследовательской работы является создание математической модели методов детектирования оптических сигналов и дальнейшее моделирование этих методов в среде MathCad с целью выявления тех из них, которые являются наиболее приемлемыми для использования в данных условиях функционирования. В статье рассмотрен случай приема оптического сигнала в виде видеоимпульсов.

### Шумовая модель приемных оптических устройств

При анализе ЭОСШ определены источники шума приемных оптоэлектронных модулей. Основными источниками шума оптического приемника являются дробовые шумы, вызванные оптическим информационным сигналом, фоновым излучением и темновым током, и тепловой шум входных цепей приемника [3, 4].

В силу того, что сегодня используются, как правило, оптические системы со спектральным разделением каналов, работающие на большие расстояния, необходимо учитывать и оптический шум, накапливаемый в линии, источниками которого являются оптические передатчики и линейные усилители. Эти шумы учитываются фоновым излучением.

Полный шум для всех видов приема рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ш}} = 2qM^2M^x B(I_C + I_T + I_{\Phi})R_H + \frac{4kTBF_{\text{ш}}}{R_H},$$

где  $q$  – заряд электрона, Кл;  $M$  – коэффициент лавинного умножения или внутреннего усиления фототока;  $M^x$  – коэффициент избыточного шума лавинного умножения,  $B$  – полоса пропускания выходного фильтра оптического приемника, Гц;  $I_C$  – средний ток полезного сигнала, А;

$I_T$  – средний темновой ток;  $I_\Phi$  – средний ток фонового излучения, А;  $R_H$  – нагрузочное сопротивление оптического приемника, Ом;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж · с;  $T$  – абсолютная температура, К;  $F_{Ш}$  – коэффициент шума предварительного усилителя.

Первое слагаемое соответствует формуле Шотки, которая описывает дробовый шум. Второе слагаемое выражает собственные шумы электронных схем приемных оптических устройств, приведенных к входу предварительного усилителя.

Сопротивление нагрузки фотодетектора зависит от полосы частот принимаемого сигнала и от схемы реализации оптического приемника. Для низкоимпедансного приемника оно определяется, исходя из формулы:

$$R_H = \frac{1}{2\pi\Delta f C},$$

где  $\Delta f$  – полоса частот принимаемого сигнала, Гц;  $C$  – емкость фотодетектора, Ф.

### Оптический приемник прямого детектирования

В приемном устройстве прямого детектирования, схема которого показана на рис. 1, полезный сигнал и фоновое излучение проходят через оптический полосовой фильтр и затем попадают на фоточувствительную площадку детектора. Информационный электрический сигнал усиливается, фильтруется низкочастотным выходным фильтром с полосой пропускания  $B_0$ , равной полосе частот информационного сигнала.



Рис. 1. Схема приемника прямого детектирования

ЭОСШ на выходе приемника определяется по формуле:

$$\text{ЭОСШ} = \frac{\left( M \frac{\eta q}{h\nu_C} P_{C \text{ ВХ}} \right)^2 R_H}{2qM^2 M^x B_0 \left[ \frac{\eta q}{h\nu_C} (P_{C \text{ ВХ}} + P_\Phi) + I_T \right] R_H + \frac{4kTB_0 F_{Ш}}{R_H}},$$

где  $P_{C \text{ ВХ}}$  – мощность оптического сигнала, поступающего на вход приемника, Вт;  $P_\Phi$  – мощность фонового излучения на входе оптического приемника, Вт;  $S_i$  – токовая чувствительность фотодиода, А/Вт;  $\eta$  – квантовая эффективность;  $\nu_C$  – частота оптической несущей, Гц.

### Гетеродинный приемник

В оптическом приемнике с гетеродинным приемом, схема которого показана на рис. 2, лазерное излучение комбинируется на фоточувствительной поверхности с опорным излучением местного генератора. При оптическом смешении входного сигнала и колебания местного генератора выделяется колебание промежуточной частоты  $f_{ПЧ} = \nu_C - \nu_0$ . Сигнал промежуточной частоты сохраняет модуляцию входного лазерного сигнала. После прохождения через полосовой фильтр (полоса пропускания  $B_{ПЧ} \geq 2B_0$ ) электрический сигнал поступает на второй детектор, где и выделяется полезная информация.

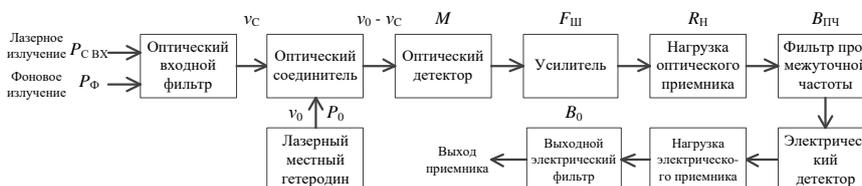


Рис. 2. Схема гетеродинного приемника

ЭОСШ на выходе приемника в соответствии с приведенной схемой приемника определяется по формуле:

$$\text{ЭОСШ} = \frac{\left( M \frac{\eta q}{h \nu_c} \right)^2 P_{\text{с вх}} P_0 R_{\text{н}}}{q M^2 M^x B_0 \left[ \frac{\eta q}{h \nu_c} (P_{\text{с вх}} + P_0 + P_{\text{ф}}) + I_{\text{т}} \right] R_{\text{н}} + \frac{2kTB_0 F_{\text{ш}}}{R_{\text{н}}}},$$

где  $P_0$  – мощность сигнала гетеродина, Вт.

### Гомодинный приемник

В оптическом гомодинном приемнике, схема которого показана на рис. 3, частота и фаза колебания местного гетеродина совпадают с частотой и фазой входного излучения, т. е. получается полная синхронизация двух колебаний. Как и для гетеродинного приема, оптическое смешение осуществляется на поверхности фотодетектора. Выходной сигнал фотодетектора содержит информационный сигнал на фоне шумов.

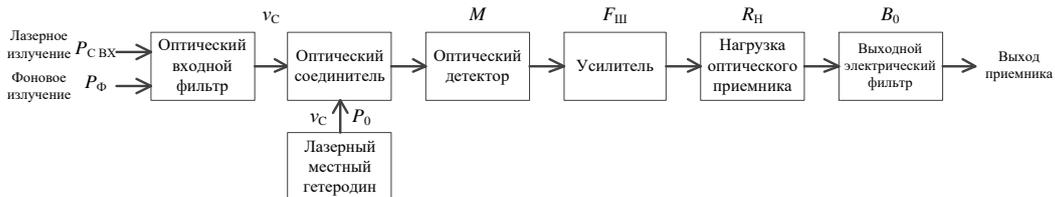


Рис. 3. Схема гомодинного приемника

ЭОСШ на выходе приемника определяется по формуле:

$$\text{ЭОСШ} = \frac{2 \left( M \frac{\eta q}{h \nu_c} \right)^2 P_{\text{с вх}} P_0 R_{\text{н}}}{q M^2 M^x B_0 \left[ \frac{\eta q}{h \nu_c} (P_{\text{с вх}} + P_0 + P_{\text{ф}}) + I_{\text{т}} \right] R_{\text{н}} + \frac{2kTB_0 F_{\text{ш}}}{R_{\text{н}}}}.$$

### Сравнительный анализ схем детектирования оптического сигнала

Электрическое ОСШ определяется как отношение  $P_{\text{с вх}}/P_{\text{ш}}$ , а оптическое ОСШ (ООСШ) –  $P_{\text{с вх}}/P_{\text{ф}}$ . В таблице приведены выражения для определения мощности полезного сигнала на выходе оптического приемника  $P_{\text{с вх}}$ , а также формулы расчета максимального ЭОСШ, когда тепловыми шумами оптического приемника можно пренебречь. Это соответствует упрощенной модели расчета ОСШ.

Мощность полезного сигнала и ЭОСШ на выходе фотодетектора

Параметр	Непосредственный прием	Когерентный прием	
		Гетеродинный	Гомодинный
$P_{\text{с вх}}$	$(MS_i)^2 P_{\text{с вх}}^2 R_{\text{н}}$	$2(MS_i)^2 P_{\text{с вх}} P_0 R_{\text{н}}$	$4(MS_i)^2 P_{\text{с вх}} P_0 R_{\text{н}}$
$\text{ЭОСШ}_{\text{max}}$	$\frac{\eta P_{\text{с вх}}}{2h \nu_c M^x B}$	$\frac{\eta P_{\text{с вх}}}{h \nu_c M^x B}$	$\frac{2\eta P_{\text{с вх}}}{h \nu_c M^x B}$
$\text{ЭОСШ}_{\text{max}}$ с учетом ООСШ	$\frac{\eta}{2h \nu_c M^x B} \cdot \frac{P_{\text{с вх}}}{\left(1 + \frac{1}{\text{ООСШ}}\right)}$	$\frac{\eta}{h \nu_c M^x B} \cdot \frac{P_0}{\left(1 + \frac{1}{\text{ООСШ}} + \frac{P_0}{P_{\text{ф}}}\right)}$	$\frac{2\eta}{h \nu_c M^x B} \cdot \frac{P_0}{\left(1 + \frac{1}{\text{ООСШ}} + \frac{P_0}{P_{\text{ф}}}\right)}$

Как видно из таблицы, гетеродинный прием обеспечивает выигрыш в 2 раза по сравнению с непосредственным приемом, а гомодинный – в 4 раза.

## Моделирование в среде MathCad

В процессе моделирования использовались следующие исходные значения:  $\nu_c = 200$  ТГц,  $\eta = 0,6$ ,  $F_{ш} = 5$ ,  $I_T = 1 \cdot 10^{-9}$  А. В качестве детектора применяется  $p-i-n$  фотодиод. Сопротивление нагрузки  $R_H$  определяется с учетом изменения полосы пропускания в зависимости от скорости передачи (за базовое принято значение  $B = 10$  Гбит/с).

В результате получены зависимости ЭОСШ от скорости передачи, мощности поступающего на вход оптического детектора сигнала и мощности местного гетеродина. Графики приведены на рис. 4–6, где использованы следующие обозначения: 1 – непосредственный прием, 1\* – непосредственный прием (упрощенная модель), 2 – гетеродинный прием, 3 – гомодинный прием.

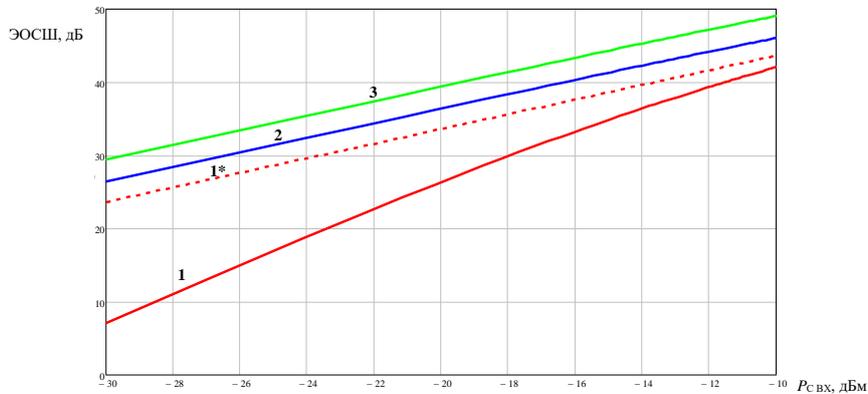


Рис. 4. Зависимость ЭОСШ от мощности сигнала на входе оптического приемника  $P_{C ВХ}$

На основе результатов моделирования установлено, что для когерентных методов детектирования в инженерных расчетах можно использовать упрощенную модель расчета ЭОСШ<sub>max</sub>, т. к. в рабочем диапазоне входных сигналов учет влияния всех источников шума ухудшает ОСШ не более чем на 0,5 дБ. Для непосредственного детектирования необходимо учитывать полный шум оптического приемника (отклонение значений упрощенной модели от значения ЭОСШ с учетом всех источников шумов составляет 3–15 дБ).

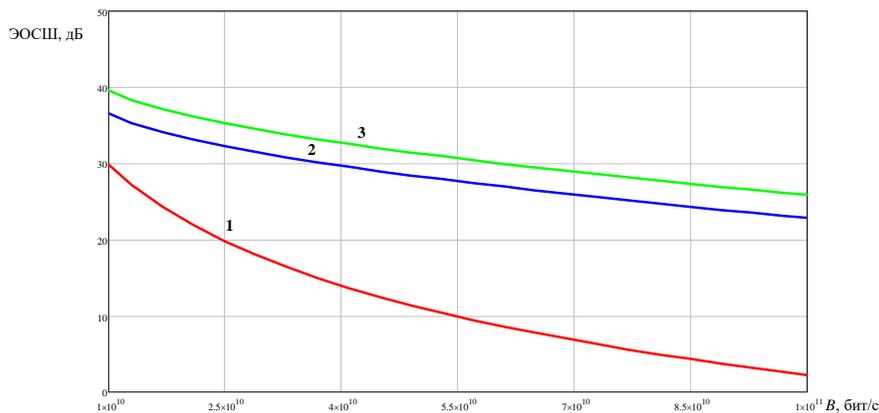


Рис. 5. Зависимость ЭОСШ от скорости передачи оптического сигнала  $B$

Согласно рис. 5 видно, что выигрыш от использования когерентных методов приема увеличивается с ростом скорости передачи. При построении графика, представленного на рис. 6, мощность входного сигнала была принята равной  $-30$  дБм. Из рисунка видно, что оптимально стоит выбирать мощность гетеродина, превышающую мощность сигнала на 18–20 дБ. Дальнейшее увеличение мощности гетеродина приводит к повышению ЭОСШ не более чем на 1 дБ при изменении мощности гетеродина на 5 дБ.

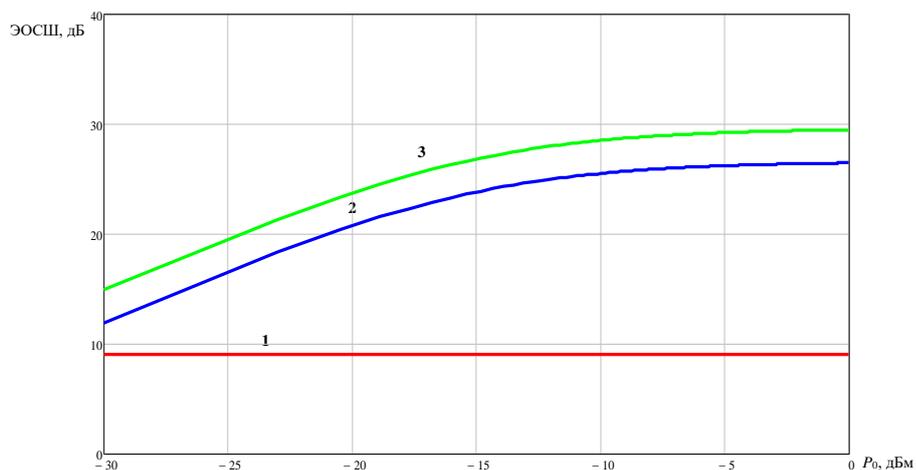


Рис. 6. Зависимость ЭОСШ от мощности сигнала гетеродина  $P_0$

### Заключение

Предложенные модели позволяют при проектировании цифровых ВОСП оценить параметры оптических приемников и выбрать наилучший метод приема, при котором обеспечиваются требуемое качество при максимальной чувствительности и максимальная протяженность участка регенерации в системах со спектральным разделением каналов.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CONSTRUCTING OPTICAL RECEIVERS IN DIGITAL FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS

N.V. TARCHENKO, Yu.S. MAISIYEVICH

### Abstract

Mathematical models of optical receivers for digital signals have been developed, which allow to evaluate the signal-to-noise ratio at the output of such receivers (at the input of a decision-making device) and to determine the degree of influence on its value of such indicators as the level of the information signal, signal of a heterodyne and bandwidth of the optical receiver.

*Keywords:* fiber-optic transmission system, direct reception, coherent reception, heterodyne reception, homodyne reception, signal-to-noise ratio, optical receiver.

### Список литературы

1. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети. Новосибирск, 2015.
2. Леонов А.В., Наний О.Е., Слепцов М.А., Трещиков В.Н. // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3, № 2. С. 123–145.
3. Гордиенко В.Н. Оптические телекоммуникационные системы. М., 2011.
4. Урядов В.Н. Волоконно-оптические системы передачи. Минск, 2008