

УДК 621.396.624

## ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЕМА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

В.Н. УРЯДОВ, Я.В. РОЩУПКИН, В.Ю. БУНАС, А.С. ЗЕЛЕНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 3 июня 2015*

Проведен анализ метода повышения эффективности оптического приемника прямого фотодетектирования при помощи трансформации спектра линейного сигнала. Предложен способ построения приемного устройства, позволяющего получить выигрыш по чувствительности и по отношению сигнал/шум по сравнению с традиционными приемными модулями. Произведен анализ его эффективности.

*Ключевые слова:* волоконно-оптическая система передачи, приемный оптический модуль, вынужденное рассеивание Манделъштама-Бриллюэна, оптический усилитель, линейный код.

### Введение и постановка задачи

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП), благодаря их практически неограниченной полосе пропускания, привлекают все большее внимание, как со стороны провайдеров телекоммуникационных услуг, так и со стороны простых потребителей. В связи с этим немалые усилия направлены на улучшение качественных показателей приемных оптических модулей не только в сфере научных исследований, но и в области практической реализации.

подавляющее большинство существующих и выпускающихся волоконно-оптических систем телекоммуникаций используют модуляцию по интенсивности, а приемные модули построены по принципу прямого усиления. Достоинствами таких систем являются простота реализации передающего и приемного модулей, надежность, невысокая стоимость, доступность используемых технологий. Однако даже здесь ресурс для улучшения еще не полностью исчерпан.

Одним из способов увеличения длины регенерационного участка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является трансформация спектра оптического сигнала, рассматриваемая в данной работе (см. рис. 1).

Спектр оптического сигнала с модуляцией по интенсивности известен [1] и в случае применения малого индекса модуляции представляет собой несущую и две боковые полосы. На передающей стороне необходимо спектр информационного сигнала (рис. 1, *a*) сместить в область более высоких частот (рис. 1, *б*), чтобы в процессе оптической модуляции создать некоторый интервал между несущей и информационным сигналом. Этого можно достичь предварительным переносом информационного сигнала на поднесущую частоту или применением линейного кодирования. Передача на поднесущей не является оптимальным выбором, поскольку отношение сигнал/шум для приемного устройства с поднесущей в 4 раза меньше отношения сигнал/шум, которое получается с помощью приемника прямого детектирования и прямой модуляции несущей [1].

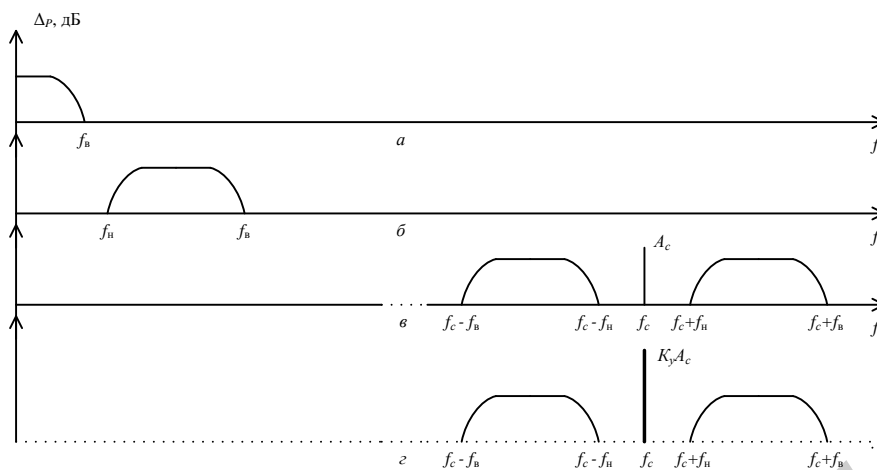


Рис. 1. Трансформация спектра оптического сигнала

Наиболее приемлемым представляется использование линейного кодирования информационного сигнала перед оптической модуляцией. Как известно, одним из основных требований, предъявляемых к линейным кодам в оптических системах телекоммуникаций, является минимальное значение непрерывной части энергетического спектра кода на нулевой частоте и в области низких частот [2]. Наилучшим образом этому условию удовлетворяют следующие классы линейных кодов:

- коды класса 1B2B, в которых осуществляется преобразование одного бита исходного сигнала длительностью  $T$  в комбинацию из двух символов, каждый из которых имеет длительность  $T/2$  (следовательно, тактовая частота линейного сигнала вдвое больше тактовой частоты исходного сигнала и скорость передачи в линии в 2 раза выше скорости исходной последовательности). К достоинствам кодов класса 1B2B относятся малое число последовательных одинаковых символов, простота кодека и хорошая сбалансированность, а недостаток – увеличение линейной скорости передачи в 2 раза;

- коды класса  $mnb$ , в которых последовательность исходного сигнала разбивается на блоки, состоящие из  $m$  бит, и каждый из них преобразуется в определенный блок кодовых символов ( $n$  бит). Среди данного класса можно выделить код 3B6B, к достоинствам которого можно отнести хорошую сбалансированность, большую избыточность, возможность контроля ошибок и передачи служебной информации.

В результате применения любого из вышеперечисленных линейных кодов, после модуляции спектр оптического сигнала будет выглядеть, как показано на рис 1, в.

На приемной стороне следует произвести избирательное усиление оптической несущей не затрагивая боковые полосы (рис. 1, з). Большинство существующих волоконно-оптических усилителей, в том числе и широко распространенные EDFA, имеют очень широкую полосу усиления, достигающую нескольких терагерц, что неприемлемо для избирательного усиления. Для данных целей наилучшим образом подходит оптический усилитель на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, который обладает значительным коэффициентом усиления (порядка 30 дБм) и узкой полосой усиления (менее 100 МГц).

Структурная схема оптического линейного тракта с использованием предлагаемого метода представлена на рис. 2.

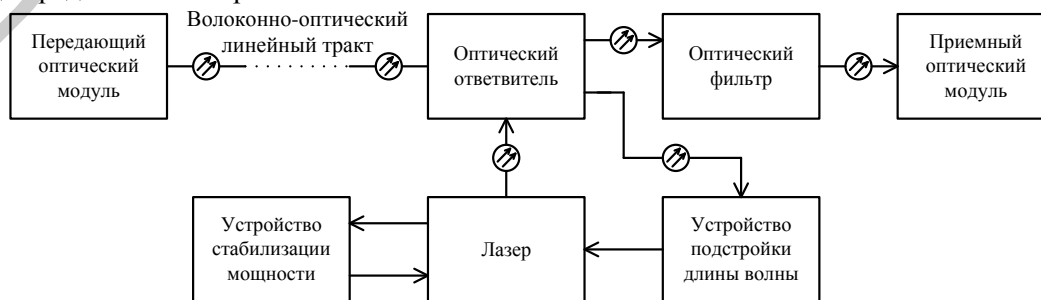


Рис. 2. Структурная схема оптического линейного тракта

Оптический усилитель Мандельштама-Бриллюэна состоит из лазера накачки, оптического волокна и устройства подстройки длины волны. В качестве оптического волокна, в котором непосредственно и происходит усиление, выступает сама волоконно-оптическая линия связи. Излучение лазера накачки подается в линию при помощи оптического ответвителя. Устройство подстройки длины волны необходимо для поддержания необходимой разности между длиной волны лазера передатчика и длиной волны лазера накачки, которая должна составлять примерно 11 ГГц [3]. Усиленный оптический сигнал при помощи ответвителя подается на вход оптического фильтра, который необходим для предотвращения попадания сигнала накачки на вход приемного оптического модуля. Приемный оптический модуль строится по традиционной схеме фотоприемника прямого усиления.

### Теоретический анализ

Рассмотрим влияние избирательного усиления оптической несущей на отношение сигнал/шум и чувствительность приемного оптического модуля.

Выражение для электрического поля сигнала с модуляцией интенсивности при синусоидальном модулирующем сигнале и малом индексе модуляции, как известно, имеет следующий вид:

$$E(t) = A_c \cos \omega_c t + \frac{K_{\text{МИ}} A_c}{2} \sin(\omega_c + \omega_m)t - \frac{K_{\text{МИ}} A_c}{2} \sin(\omega_c - \omega_m)t, \quad (1)$$

где  $A_c$  – амплитуда несущего колебания,  $\omega_c$  – частота несущего колебания,  $\omega_m$  – частота модулирующего сигнала,  $K_{\text{МИ}}$  – коэффициент модуляции интенсивности.

В рассматриваемом приемном оптическом модуле перед детектированием производится усиление исключительно несущего колебания ( $A_c \cos \omega_c t$ ), а боковые полосы остаются без изменения. Ток на выходе фотодетектора пропорционален входному оптическому сигналу, т.е. пропорционален  $E^2(t)$ , за исключением комбинационных частот вида  $2\omega_c$ ,  $2\omega_m$ ,  $2\omega_c \pm \omega_m$  и т.п., на которые детектор не реагирует. Принимая во внимание, что коэффициент усиления гораздо больше коэффициента модуляции интенсивности, и подставляя соответствующее выражение мощности несущего колебания, можно записать:

$$I_{\text{пр}}(t) \sim \frac{K_{\text{в}}^2 P_c}{2} + K_{\text{в}} P_c K_{\text{МИ}} \sin \omega_c t, \quad (2)$$

где  $K_{\text{в}}$  – коэффициент усиления оптического усилителя,  $P_c$  – мощность сигнала.

При выводе выражения для отношения сигнал/шум можно пренебречь тепловыми шумами и ограничиться лишь дробовым шумом несущего колебания, поскольку за счет существенного коэффициента усиления данный шум будет преобладающим. В результате искомое выражение будет иметь следующий вид:

$$S/N = \frac{(K_{\text{в}} P_c K_{\text{МИ}})^2 \left(\frac{\eta q}{h\nu}\right)^2}{2q \frac{\eta q}{h\nu} \frac{K_{\text{в}}^2 P_c}{2} B}, \quad (3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $q$  – заряд электрона,  $\eta$  – квантовая эффективность фотодетектора,  $\nu$  – частота оптического излучения,  $B$  – скорость передачи.

Упростив приведенное выражение, получим:

$$S/N = \frac{\eta K_{\text{МИ}}^2 P_c}{h\nu B}. \quad (4)$$

С целью количественной оценки преимуществ рассматриваемого приемного оптического модуля произведем сравнительный анализ по отношению сигнал/шум с оптическим приемником прямого усиления с *pin*-фотодетектором и полевым транзистором на входе, отношение сигнал/шум (ОСШ) которого известно [4, 5]:

$$S/N = \frac{(P_c K_{\text{МИ}})^2 \left(\frac{\eta q}{h\nu}\right)^2}{4kT(2\pi C_\Sigma)B^2 \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_{\text{ПТ}}}{q_m} \right]}, \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $C_\Sigma$  – суммарная емкость фотодиода и предусилителя,  $In_2$ ,  $In_3$  – интегралы Персонака,  $F_{\text{ПТ}}$  – шум-фактор полевого транзистора,  $K$  – коэффициент, характеризующий глубину интегрирования во входной цепи фотоприемника (обычно  $K=10\div 100$ , так как в противном случае усложняется корректирующее устройство оптического приемника);  $q_m$  – крутизна полевого транзистора.

На основании (4) и (5) получим выигрыш по отношению сигнал/шум:

$$\Delta = \frac{4kT(2\pi C_\Sigma)B \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_{\text{ПТ}}}{q_m} \right]}{\frac{\eta q^2}{h\nu} P_c}. \quad (6)$$

Графическая зависимость выигрыша по соотношению сигнал/шум от мощности принятого сигнала приведена на рис. 3. Расчеты произведены при следующих параметрах: суммарная емкость фотодиода и предусилителя  $C_\Sigma = 0,5$  пФ, шум-фактор полевого транзистора  $F_{\text{ПТ}} = 1,5$ , крутизна полевого транзистора  $q_m = 35 \cdot 10^{-3}$  См, коэффициент интегрирования  $K = 20$ , интегралы Персонака  $In_2 = 0,55$ ,  $In_3 = 0,085$ , скорость передачи  $B = 2,5$  Гбит/с.

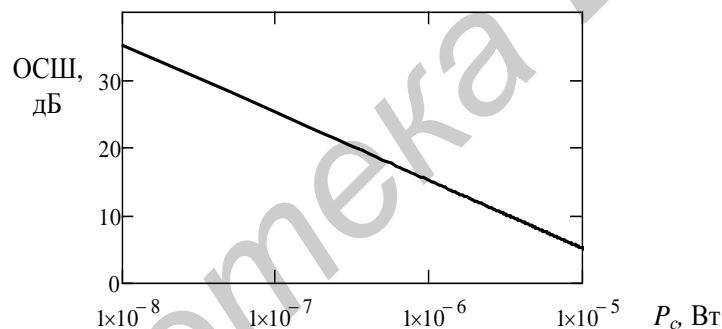


Рис. 3. Зависимость выигрыша по ОСШ от мощности сигнала

Производя анализ приведенной зависимости, следует отметить, что существенное значение выигрыша наблюдается при низкой мощности принятого сигнала, что обуславливает возможность применения данного метода на магистральных линиях связи.

Графические зависимости выигрыша по соотношению сигнал/шум от битовой скорости передачи при различных мощностях принятого сигнала приведены на рис. 4 (линия 1 –  $P_c = 10$  нВт; линия 2 –  $P_c = 100$  нВт; линия 3 –  $P_c = 1$  мкВт).

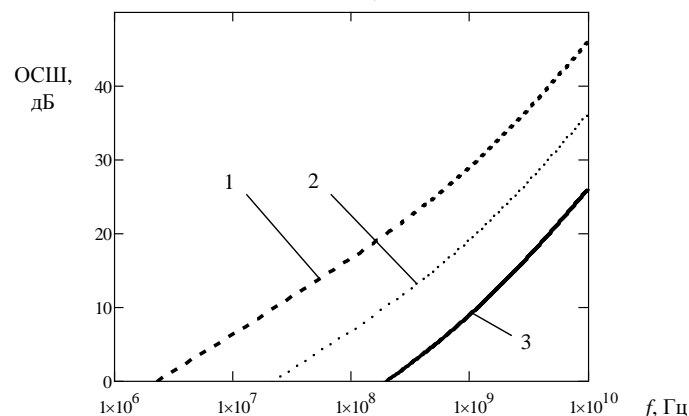


Рис. 4. Зависимость выигрыша по ОСШ от скорости передачи

Также представляется необходимым произвести оценку чувствительности рассматриваемого приемного оптического модуля, т.е. определить минимально возможную мощность входного сигнала, требуемую для достижения заданного ОСШ. Исходя из выражения (4) получим:

$$P_c = \frac{(S/N)h\nu B}{\eta K_{\text{МИ}}^2}. \quad (7)$$

Чувствительность оптического приемника прямого усиления с *pin*-фотодетектором и полевым транзистором на входе может быть получена аналогичным образом из выражения (5):

$$P_c = \sqrt{\frac{(S/N)4kT(2\pi C_\Sigma)B^2 \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_{\text{ПТ}}}{q_m} \right]}{(K_{\text{МИ}})^2 \left( \frac{\eta q}{h\nu} \right)^2}}. \quad (8)$$

Выигрыш по чувствительности на основании формул (7) и (8) имеет следующий вид:

$$\Delta_p = \frac{\sqrt{4kT(2\pi C_\Sigma)B \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_{\text{ПТ}}}{q_m} \right]} \cdot K_{\text{МИ}}}{q\sqrt{S/N}}. \quad (9)$$

Графическая зависимость выигрыша по чувствительности от битовой скорости передачи приведена на рис. 5. Расчеты произведены при следующих параметрах: отношение сигнал/шум  $S/N = 40$ , что соответствует значению 16 дБ, коэффициент модуляции интенсивности  $K_{\text{МИ}} = 0,1$ .

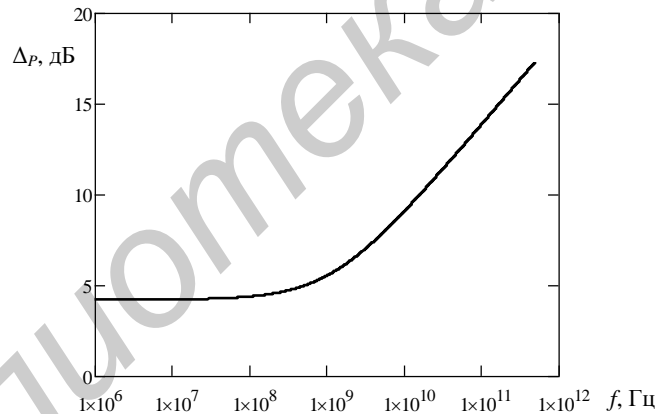


Рис. 5. Зависимость выигрыша по чувствительности от скорости передачи

Как можно заметить, выигрыш по чувствительности имеет существенные значения при скоростях передачи более 1 Гбит/с и возрастает при дальнейшем увеличении частоты. Такой характер зависимости открывает перед данным методом построения приемных оптических модулей большие перспективы по использованию в высокоскоростных оптических сетях.

### Заключение

Описанный метод трансформации спектра оптического линейного сигнала позволяет повысить эффективность уже существующих приемных оптических модулей прямого фотодетектирования в системах передачи с модуляцией интенсивности. Произведенный анализ показывает, что при использовании данного метода можно получить выигрыш по чувствительности и отношению сигнал/шум по сравнению с существующими системами без существенных материальных затрат.

Предложенный приемный оптический модуль будет сочетать в себе качество и надежность традиционного приемника прямого фотодетектирования с повышенной чувствительностью и лучшим отношением сигнал/шум.

# SPECTRUM TRANSFORMATION OF THE OPTICAL SIGNAL TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS

V.N. URYADOV, Y.V. ROSHCHUPKIN, V.Y. BUNAS, A.S. ZELENIN

## Abstract

An analysis of the method to improve the effectiveness of the direct detection optical receiver by the spectrum transformation of the line signal was presented in this paper. The method of constructing of the optical receiver providing sensitivity gain and signal-to-noise gain was proposed. Numerical investigation of its performance was carried out.

## Список литературы

1. *Пратт Вильям К.* Лазерные системы связи. М., 1972.
2. *Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М и др.* Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник. М., 1993.
3. *Фриман Р.* Волоконно-оптический системы связи. М., 2003.
4. *Алишев Я.В., Урядов В.Н.* Перспективные информационные технологии в волоконно-оптических сетях телекоммуникаций. Минск, 2003.
5. *Урядов В.Н., Стункус Ю.Б.* // Докл. БГУИР. 2006. № 3 (15). С. 48–53.