

# ИСКАЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ С КОГЕРЕНТНЫМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ, ВЫЗВАННОЕ ЯВЛЕНИЯМИ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ И ФАЗОВОЙ КРОСС-МОДУЛЯЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-4-12

**Сычук Анатолий Николаевич,**  
ФГБОУ ВО СибГУТИ, г. Новосибирск, Россия,  
[tolya030394@mail.ru](mailto:tolya030394@mail.ru)

**Варданын Вардгес Андраникович,**  
ФГБОУ ВО СибГУТИ, г. Новосибирск, Россия,  
[vardgesvardanyan@mail.ru](mailto:vardgesvardanyan@mail.ru)

**Ключевые слова:** нелинейные явления, фазовая кросс-модуляция, фазовая самомодуляция, спектральное разделение каналов, когерентный прием, помехозащищенность сигнала.

Исследуется влияние эффектов фазовой самомодуляции (ФСМ) и фазовой кросс-модуляции (ФКМ) на помехоустойчивость передаваемых импульсных сигналов в многоканальной системе передачи со спектральным уплотнением в зависимости от параметров системы передачи: уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне и типа линейных кодов. На приемной стороне, после когерентного фотодетектирования импульсных сигналов анализируются полученные глаз-диаграммы. Критерием оценки влияния ФСМ и ФКМ на помехоустойчивость передаваемых сигналов принят Q-фактор, который вычисляется графическим способом с помощью глаз-диаграммы. Имитационная модель многоканальной волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов реализована в среде моделирования MathCAD. Влияние явлений ФСМ и ФКМ на передаваемый сигнал имитируется как искажение фазы этого сигнала при его распространении по стандартному одномодовому волокну и преобразование этих искажений в амплитудные при фотодетектировании. Показано, что из-за влияния ФСМ и ФКМ при увеличении уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне происходит ухудшение показателя качества сигнала. В 128-канальной системе передачи с канальной скоростью передачи данных 40 Гбит/с, увеличение суммарной мощности с 2 до 30 мВт приводит к снижению величины Q-фактора при использовании линейного кода передачи NRZ в 8 раз и при использовании кода RZ в 9 раз. В работе показано, что по сравнению с линейным кодом NRZ, использование кода RZ позволяет уменьшить влияние ФСМ и ФКМ и увеличить Q-фактор в среднем в 1.7 раза. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании многоканальных волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов для оценки потенциального вклада явлений ФСМ и ФКМ в снижение помехоустойчивости системы.

#### Информация об авторах:

**Сычук Анатолий Николаевич**, аспирант, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики" (ФГБОУ ВО СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия

**Варданын Вардгес Андраникович**, профессор кафедры многоканальной электрической связи и оптических систем, д.т.н., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики" (ФГБОУ ВО СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия

#### Для цитирования:

Сычук А.Н., Варданын В.А. Искажение импульсных сигналов в многоканальных системах передачи с когерентным детектированием, вызванное явлениями фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 4-12.

#### For citation:

Sychuk A.N., Vardanyan V.A. (2020) Pulsed signals distortions in multichannel coherent detection transmission systems caused by self-phase modulation and cross-phase modulation in optical fiber. *T-Comm*, vol. 14, no.1, pp. 4-12. (in Russian)

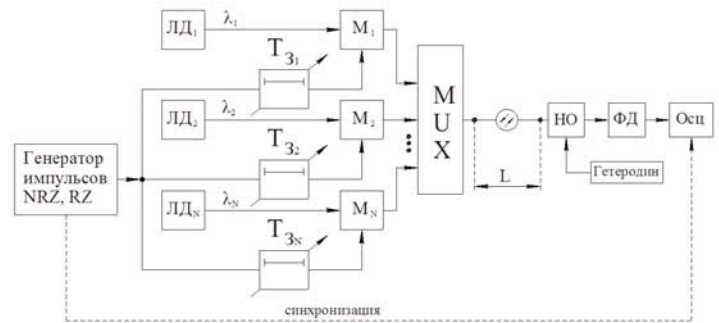
**Введение**

Технологии спектрального уплотнения (WDM – wavelengths division multiplexing), применяемые в современных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП), позволяют передавать одновременно большое количество спектрально разделенных каналов (dense WDM – DWDM), что позволяет существенно повысить пропускную способность систем связи [1]. Однако увеличение количества каналов передачи неизбежно приводит к тому, что уровень суммарного оптического излучения от всех каналов передачи, вводимых в оптоволокно, будет возрастать. В процессе распространения оптического излучения через среду передачи происходит взаимодействие материала среды передачи и оптического излучения. Как результат – увеличение мощности оптического излучения приводит к изменению показателя преломления среды передачи – появляется нелинейная составляющая показателя преломления, зависящая от интенсивности оптического излучения [2, 3]. В результате, увеличение уровня суммарной мощности неизбежно приводит к возникновению различных нелинейных явлений, два из которых – фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кроссмодуляция (ФКМ), которые значительно ухудшают помехоустойчивость современных ВОСП-DWDM [4, 5]. Явление ФСМ возникает вследствие самовоздействия интенсивности распространяющегося оптического сигнала на эффективный показатель преломления среды передачи и, следовательно, всегда возникает при распространении оптического излучения через оптоволокно. Явление ФКМ возникает при совместном распространении двух и более спектральных каналов в оптоволокне и связано с тем, что на эффективный показатель преломления для каждого спектрального канала оказывает воздействие, как интенсивность излучения самого спектрального канала, так и интенсивность излучения от соседних спектральных каналов. Явление ФКМ всегда сопровождается явлением ФСМ [6, 7].

Целью данной работы является исследование ухудшения помехоустойчивости ВОСП-DWDM, вызванного явлениями ФСМ и ФКМ, возникающими в оптоволокне. Критерием оценки качества импульсных сигналов принят  $Q$ -фактор, определяемый на приемной стороне, после когерентного (гомодинного) приема. Для этого в среде MathCAD реализована имитационная модель для оценки влияния явлений ФСМ и ФКМ на показатели качества передаваемых оптических импульсных сигналов.

**Структурная схема**

На рисунке 1 представлена структурная схема многоканальной ВОСП-DWDM с гомодинным приемом. На передающей стороне, в каждом канале при помощи лазерных диодов (ЛД) формируются оптические несущие с заданной длиной волны и уровнем выходной мощности оптического излучения. В модели предусмотрена возможность изменения уровня выходной мощности лазерного диода, а так же длины волны оптической несущей. Следует отметить, что лазерные диоды генерируют оптические несущие с длинами волн, близкими друг к другу, из диапазона «С» для стандартного одномодового волокна (SSMF – standard single mode fiber) [8].



**Рис. 1.** Структурная схема многоканальной ВОСП-WDM с когерентным детектированием

Оптические несущие поступают на один из входов оптических модуляторов (М). На другой вход соответствующих оптических модуляторов подаются модулирующие сигналы, формируемые при помощи генератора импульсов NRZ, RZ, при этом логической «1» модулирующего сигнала соответствует наличие оптического излучения на выходе модулятора, а логическому «0» – отсутствие оптического излучения. Так же в работе учитывается межсимвольная интерференция сигналов в соседних тактовых интервалах. В модели предусмотрена возможность изменения длительности модулирующих импульсов в генераторе импульсов NRZ, RZ.

Рассматриваются сигналы со скоростью передачи 40 Гбит/с в каждом канале. Модулирующие оптические несущие поступают на вход соответствующих оптических линий задержки ( $T_3$ ). Линии задержки вносят временные задержки импульсов от нуля до двух тактовых интервалов. Рассматриваются также два режима работы всех линий задержки. В первом режиме работы генерируется фиксированный интервал задержки. Данный режим работы реализует наихудший случай передачи, при котором явления ФСМ и ФКМ оказывают наибольшее влияние на показатели качества импульсных сигналов. Во втором режиме работы линии задержки вносят случайные временные задержки, величина которых находится в диапазоне от нуля до удвоенной длительности тактового интервала бита модулирующей последовательности. В дальнейшем, систему передачи, функционирующую в первом режиме работы линии задержек, будем называть синхронной, а функционирующую во втором режиме – асинхронной.

В реальных ВОСП-DWDM синхронная модуляция всех модуляторов – маловероятный процесс, так как в качестве генераторов импульсов используются реальные, независимые друг от друга источники импульсных последовательностей. При асинхронной передаче оптические сигналы в каждом канале передачи возникают в случайные моменты времени, соответствующие интервалам задержек. Выходные оптические сигналы модуляторов поступают на вход оптического мультиплексора (MUX), объединяются и поступают на вход оптоволокна. На приемной стороне мультиплексированный сигнал с выхода оптического волокна поступает на один из входов направленного ответвителя (НО). На другой вход оптического ответвителя поступает оптическое излучение, генерируемое гетеродином. В данной работе предполагалось, что частота излучения гетеродина совпадает с частотой детектируемого оптического сигнала, что соответствует гомодинному типу когерентного детектирования.

Оптическое излучение с выхода НО поступает на фотодетектор (ФД) при помощи которого выполняется детектирование принимаемого оптического сигнала. На выходе фотодетектора формируется фототок, повторяющий огибающую детектированного оптического сигнала. Далее фототок регистрируется осциллографом (Осц), который синхронизируется от сигналов генератора импульсов NRZ, RZ.

**Теоретическое обоснование имитационной модели**

Модулирующий сигнал представляет собой последовательность гауссовских импульсов, которые можно описать следующим образом [2, 3]:

$$s(l, t) = \sqrt{P_1} \cdot \exp\left[\frac{-(t - l \cdot T_{\text{такт}})^2}{2 \cdot T_0^2}\right], \quad (1)$$

где,  $P_1$  – уровень пиковой мощности оптического импульса в  $l$ -м тактовом интервале модулирующей последовательности;  $T_0$  – половина длительности гауссовского импульса на уровне 0.6 от максимального значения напряженности оптического поля;  $T_{\text{такт}}$  – длительность тактового интервала модулирующей последовательности. Длительность тактового интервала определяется на уровне половины от пиковой мощности гауссовского импульса. Сигнал на выходе оптического модулятора в  $n$ -м канале передачи имеет вид:

$$S_n(t) = \sum_{l=1}^L s(l, t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t), \quad (2)$$

где,  $f_n$  — частота несущей для  $n$ -го канала передачи, где  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $L$  – длина битовой последовательности сигнала. Выполнены симуляции при различных значениях длины битовой последовательности. В процессе симуляций выяснено, что глаз-диаграммы детектированных сигналов не имеют различий при  $L \geq 3$ . Для дальнейшего упрощения расчетов было принято  $L = 3$ . Так же, следует отметить, что в данной работе уровни пиковой мощности оптического импульса во всех вводимых каналах передачи имеют одинаковые величины. Модулированные каналные сигналы мультиплексируются и вводятся в оптоволокно. В процессе распространения по оптоволокну фазы спектральных каналных сигналов изменяются. На выходе оптоволокну сигнал в  $n$ -м канале передачи имеет следующий вид [2, 3]:

$$S_n^*(t) = \sum_{l=1}^L s(l, t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \varphi_{NL, n}(t)), \quad (3)$$

где  $\varphi_{NL, n}$  — нелинейный сдвиг фазы, состоящий из двух слагаемых: первое слагаемое характеризует смещение фазы из-за явления ФСМ, а второе слагаемое — смещение фазы из-за явления ФКМ. Нелинейный сдвиг фазы сигнала в  $n$ -м канале передачи [2, 3, 7]:

$$\varphi_{NL, n}(t) = \gamma \cdot L_{\text{эф}} \cdot \left[ |S_n(t)|^2 + 2 \cdot \sum_{\substack{m=1 \\ n \neq m}}^N |S_m(t)|^2 \right], \quad (4)$$

где  $L_{\text{эф}} = (1 - \exp(-\delta L)) / \delta$  – эффективная протяженность оптоволокну;  $\gamma$  – нелинейный коэффициент оптоволокну (для SSMF волокна  $\gamma = 1.2$  Вт/км);  $\delta$  – коэффициент затухания оптоволокну.

В приемной части ВОСП-WDM сигнал с выхода оптоволокну поступает в направленный ответвитель, в котором оптическое поле мультиплексированного сигнала суммируется с полем сигнала гетеродина. Оптическое поле на выходе направленного ответвителя фотодетектируется. Результатом фотодетектирования является фототок на выходе фотодиода [9]:

$$I_{\text{фн}}(t) = 2 \cdot \left( \sum_{l=1}^L s(l, t) \right) \cdot \sqrt{P_0} \times \cos[2 \cdot \pi \cdot (f_n - f_0) \cdot t + (\varphi_0 - \varphi_{NL, n})], \quad (5)$$

где  $P_0$  – пиковая мощность оптического излучения гетеродина;  $f_0$  – частота оптического излучения гетеродина;  $\varphi_0$  – фаза оптического излучения гетеродина. В данной работе предполагается, что частота излучения гетеродина и частота излучения детектируемого канала совпадают. Так же, предполагается, что фаза оптического излучения гетеродина равна нулю.

Формула (5) позволяет рассчитать фототоки, соответствующие разным спектральным каналным сигналам и в дальнейшем, получить глаз-диаграммы импульсных последовательностей во временной области. На рисунке 2 показан пример глаз-диаграммы. Искажения сигнальных импульсов в глаз-диаграмме из-за ФСМ и ФКМ обусловлены преобразованием фазовых искажений в амплитудные при фотодетектировании.

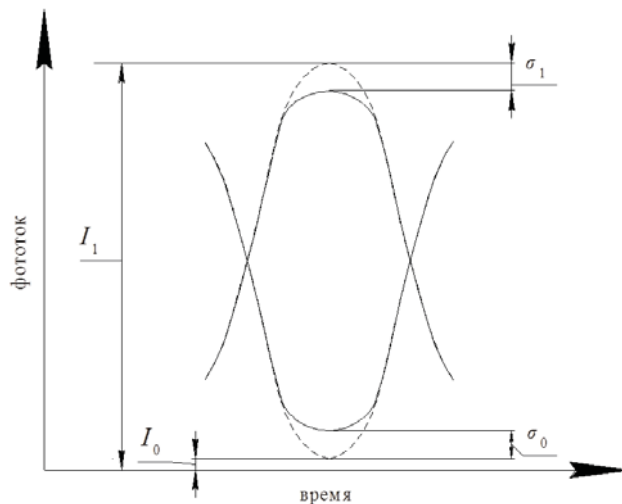


Рис. 2. Графическое определение параметров Q-фактора детектированного сигнала

С помощью полученных глаз-диаграмм детектированных сигналов, выполняется оценка величины Q-фактора [2, 3, 7]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (6)$$

где  $I_1$  и  $\sigma_1$  – уровни тока сигнала и шума из-за явления ФСМ и ФКМ при передаче логической «1», соответственно;  $I_0$  и  $\sigma_0$  – уровни тока сигнала и шума из-за межсимвольной интерференции при передаче логического «0», соответственно (см. рис. 2).

На основе вычисленных величин  $Q$ -фактора выполнен расчет значений вероятности появления ошибки ( $BER$  – bit error rate) [2, 3]:

$$BER(Q) = -\frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (9)$$

где  $\operatorname{erfc}$  – дополнительная функция ошибок.

### Результаты моделирования

В данной работе, результатом моделирования являются глаз-диаграммы детектированных оптических сигналов с искаженными амплитудами импульсных сигналов, обусловленными явлениями ФСМ и ФКМ. На основе полученных глаз-диаграмм рассчитывается значение  $Q$ -фактора детектированного сигнала.

Глаз-диаграммы детектированных сигналов, фазы которых изменились под воздействием явлений ФСМ и ФКМ при различных уровнях суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне представлены на рис. 3.

Глаз-диаграммы были получены при следующих параметрах системы передачи: синхронный режим передачи; протяженность оптоволокна – 100 км; число вводимых каналов передачи – 128; скорость передачи данных – 40 Гб/с; тип кодовых импульсов – NRZ; величина суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, изменяется от 2 до 30 мВт. Штриховой линией обозначена огибающая детектированного сигнала, который является эталонным (неискаженным) при заданных параметрах системы передачи, а непрерывной линией обозначена огибающая детектированного сигнала, фаза которого была искажена воздействием явлений ФСМ и ФКМ.

Из рисунка 3 следует, что, при фиксированном количестве каналов передачи, увеличение уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне приводит к сильным искажениям глаз-диаграммы детектированного сигнала. Из уравнения (4) можно сделать вывод, что составляющие нелинейной фазы, характеризующие явления ФСМ и ФКМ, напрямую зависят от мощности оптического сигнала, передаваемого в канале [2, 3, 7].

Увеличение уровня суммарной мощности при фиксированном количестве каналов передачи приводит к увеличению уровня мощности сигналов в каждом спектральном канале, в результате чего возрастает влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазу сигналов. Рост уровня суммарного излучения также приводит к увеличению уровня шумов, вызванных межсимвольной интерференцией.

Используя указанные выше параметры системы передачи, было получено множество глаз-диаграмм детектированных сигналов для асинхронного режима передачи. Множество глаз-диаграмм, представленных на рис. 4, было получено наложением глаз-диаграмм 100 итераций имитационной модели.

Из рисунка 4 можно увидеть, что применение асинхронного режима передачи позволяет снизить искажения фазы детектированного сигнала из-за явлений ФСМ и ФКМ. Это можно объяснить тем, что при использовании синхронного режима линии задержки вся суммарная мощность оптического излучения сконцентрирована в тактовых интервалах, что приводит к резкому увеличению нелинейных явлений и, как следствие, усилению воздействия явлений ФСМ и ФКМ на фазы передаваемых сигналов.

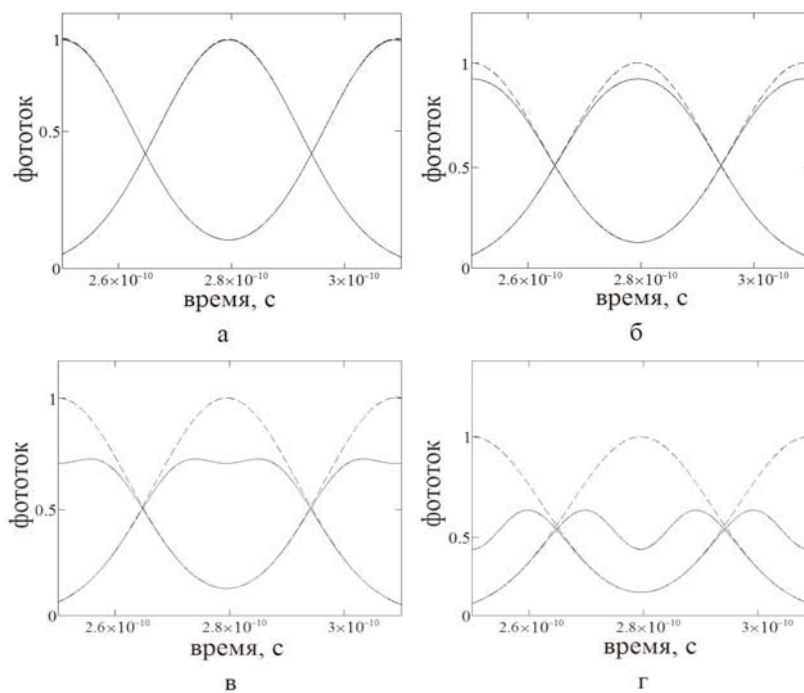
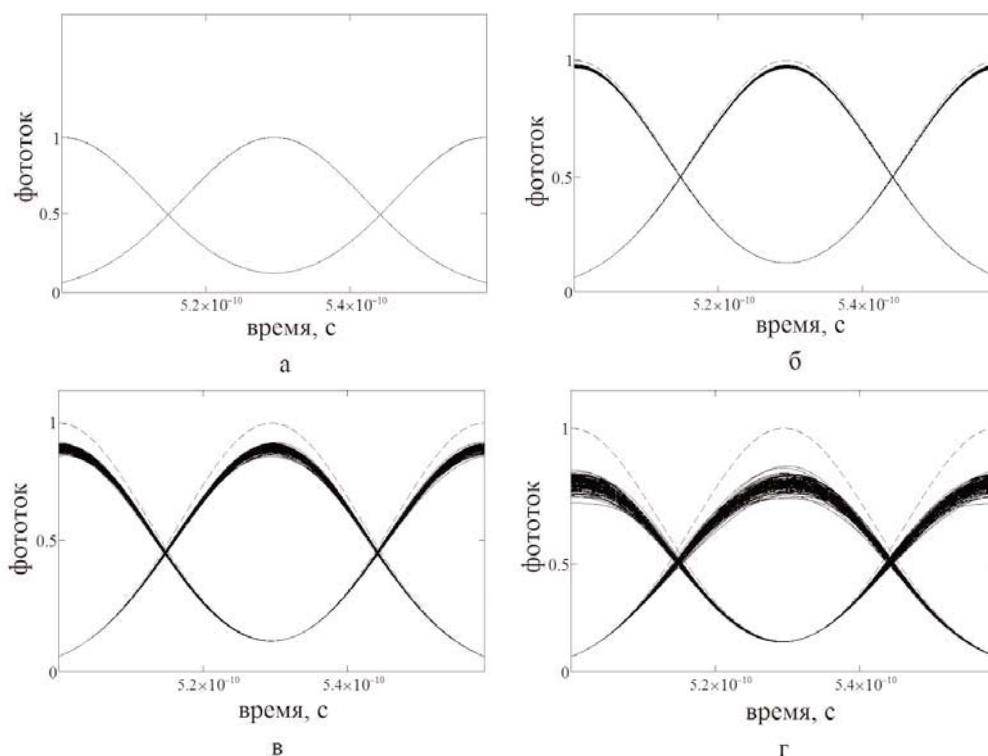


Рис. 3. Глаз-диаграмма и искажение детектируемого оптического сигнала в формате линейного кода NRZ при синхронной передаче в зависимости от суммарной мощности излучения, вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт



**Рис. 4.** Глаз-диаграмма и искажение детектируемого оптического сигнала в формате линейного кода NRZ при асинхронной передаче в зависимости от суммарной мощности излучения вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт

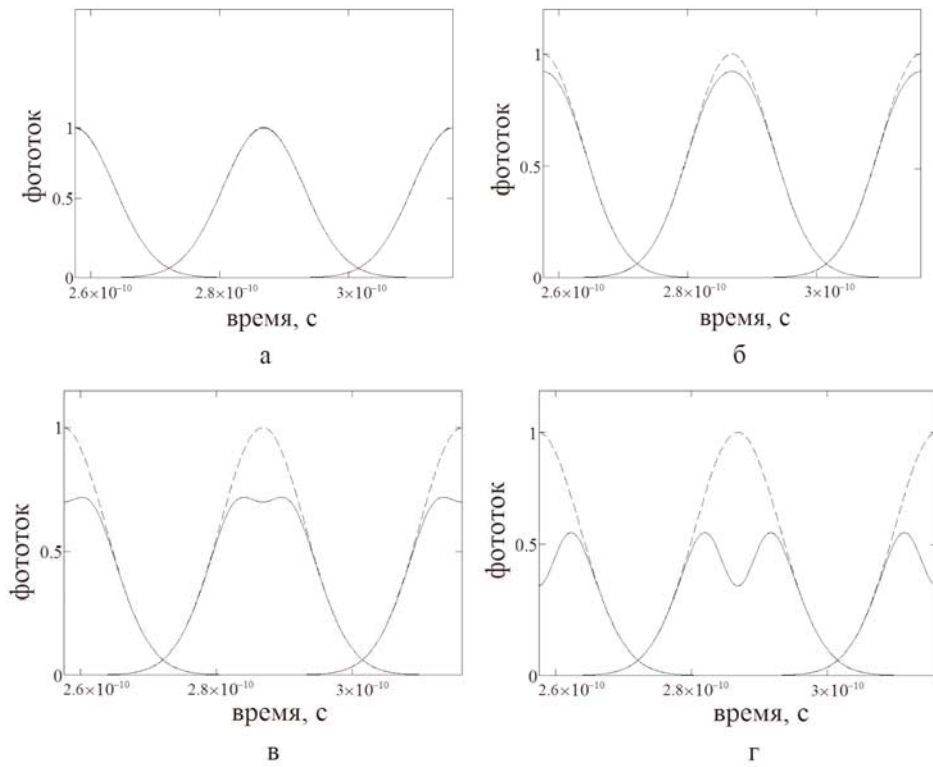
Асинхронный режим передачи позволяет перераспределить эффективную мощность излучения в пределах диапазона интервалов линии задержки. В результате, происходит снижение влияния явлений ФСМ и ФКМ на фазы передаваемых сигналов. С повышением уровня суммарной мощности раскрытия глаз-диаграммы детектированного сигнала приобретает больший разброс. Увеличение разброса можно объяснить тем, что каждая новая итерация симуляции приводит к перераспределению интервалов, генерируемых линией задержки. Так как с увеличением уровня суммарного излучения происходит увеличение мощности излучения в каждом канале, и эффективная мощность излучения в пределах диапазона интервалов линии задержки распределяется менее равномерно.

Учитывая формулу (4), можно предположить, что неравномерность распределения уровня эффективной мощности в тактовых интервалах передаваемого сигнала может привести к скачкам искажения фазы из-за явлений ФСМ и ФКМ в детектируемом сигнале. Разброс возможных величин раскрытия глаз-диаграммы детектированного сигнала имеет свои пределы сверху и снизу. Верхний предел величины раскрытия глаз-диаграммы ограничен ситуацией, когда полностью отсутствует влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазу детектированного сигнала и соответствует максимальному раскрытию глаз-диаграммы при детектировании эталонных сигналов при заданных параметрах системы. Нижний предел ограничен ситуацией, когда влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазу детектированного сигнала имело максимально возможное значение, что соответствует минимальному раскрытию глаз-диаграммы детектированного сигнала при синхронной передаче.

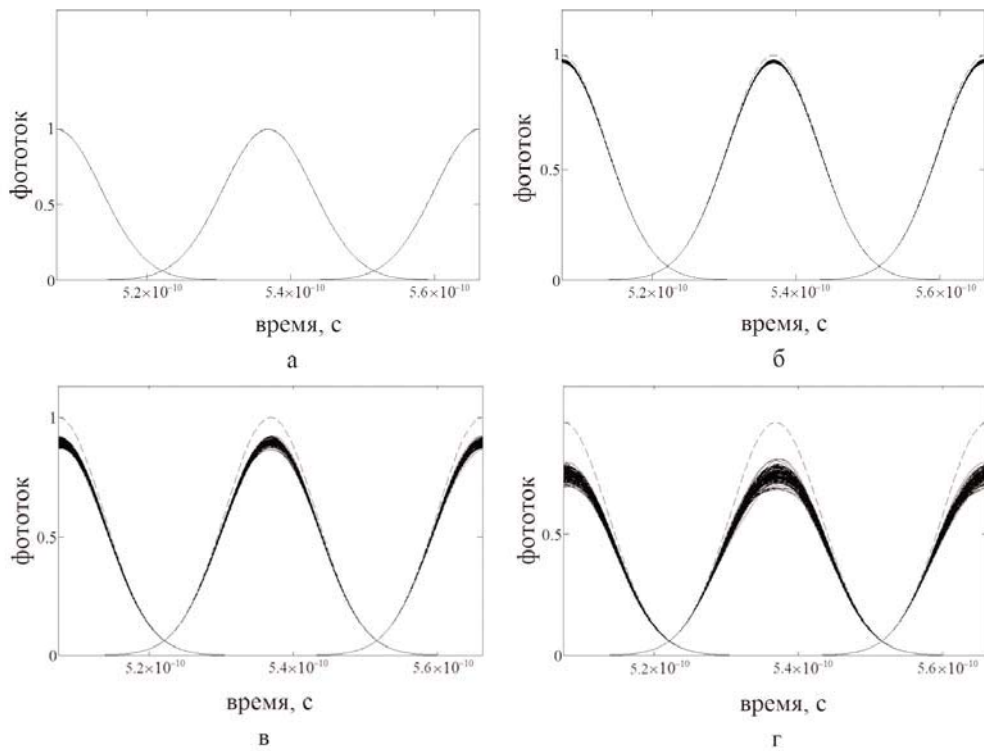
В данной работе исследовалось влияние явлений ФСМ и ФКМ на огибающую детектированного сигнала в зависимости от типа линейного кода и при различных параметрах системы передачи, а также помехоустойчивость сигнала при двух типах линейного кода: NRZ и RZ. Исследования проводились при следующих параметрах системы передачи: протяженность оптоволокна – 100 км; число вводимых каналов передачи – 128; скорость передачи информации – 40 Гб/с; величина суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, изменяется от 2 до 30 мВт.

На рисунке 5 представлены глаз-диаграммы детектированных сигналов, фазы которых изменились под воздействием явлений ФСМ и ФКМ при разных уровнях суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне. Детектированные сигналы имеют формат линейного кода RZ. Моделирование осуществлялось в синхронном режиме передачи.

Сравнивая рис. 3 и рис. 5, можно сделать вывод, что переход от вида линейного кода NRZ к RZ позволяет увеличить помехоустойчивость детектированного сигнала. Увеличение помехоустойчивости объясняется снижением уровня шумов, вызванных межсимвольной интерференцией. Снижение уровня шумов межсимвольной интерференции можно объяснить тем, что в случае применения кода NRZ передаваемый импульс занимает весь тактовый интервал, а в случае применения кода RZ передаваемый импульс занимает половину тактового интервала. В результате, переход от кода NRZ к коду RZ способствует разнесению импульсов в каналах передачи на больший временной интервал. Переход от кода NRZ к коду RZ не сопровождается изменением формы огибающей детектированного сигнала.



**Рис. 5.** Глаз-диаграмма и искажение формы детектируемого оптического сигнала в формате линейного кода RZ при синхронной передаче в зависимости от суммарной мощности излучения, вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт



**Рис. 6.** Глаз-диаграмма и искажение формы детектируемого оптического сигнала с форматом линейного кода RZ, при асинхронной передаче, в зависимости от суммарной мощности излучения, вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт

Получено множество глаз-диаграмм детектированного сигнала в формате линейного кода RZ при асинхронной передаче. Моделирование выполнялось при следующих параметрах системы передачи: протяженность оптоволокну – 100 км; число вводимых каналов передачи изменяется от 16 до 128; скорость передачи информации – 40 Гб/с; тип линейного кода – RZ; величина суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, изменяется от 2 до 30 мВт. Множество глаз-диаграмм детектированного сигнала в формате RZ при асинхронной передаче представлено на рис. 6.

Из рисунка 6 видно, применение RZ линейного кода позволяет существенно снизить уровень шумов от межсимвольной интерференции, а передача в асинхронном режиме позволяет значительно снизить влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазы передаваемых сигналов. В результате, достигается наилучшая помехозащищенность передаваемого сигнала при высоком уровне суммарного оптического излучения в оптоволокну.

Используя совокупность глаз-диаграмм, полученных при различных параметрах системы передачи, рассчитан  $Q$ -фактор детектированного сигнала. Результаты расчетов представлены на рис. 7 в виде кривых, отражающих зависимость величины  $Q$ -фактора от уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокну; непрерывные кривые показывают результаты, полученные при синхронной передаче, а результаты, полученные при асинхронной передаче показаны заштрихованной областью. Горизонтальные линии обозначают различные пороговые величины  $Q$ -фактора, обеспечивающие передачу сигнала с вероятностью ошибки  $10^{-12}$ . Горизонтальная непрерывная утолщенная линия обозначает порог по величине  $Q$ -фактора, обеспечивающей передачу сигнала с вероятностью ошибки  $10^{-12}$  без применения методов корректирующего кодирования FEC (forward error correction); горизонтальная непрерывная тонкая линия обозначает порог по величине  $Q$ -фактора, обеспечивающей передачу сигнала с вероятностью ошибки  $10^{-12}$  при использовании технологии FEC-1; горизонтальная пунктирная утолщенная линия обозначает порог по величине  $Q$ -фактора, обеспечивающей передачу сигнала с вероятностью ошибки  $10^{-12}$  при использовании технологии FEC-2 [10]. Области, заштрихованные пунктирными линиями, обозначают диапазоны значений  $Q$ -фактора, допустимые при использовании соответствующих технологий FEC.

Из рисунка 7 видно, что увеличение уровня суммарной мощности излучения в оптоволокну оказывает существенное влияние на помехоустойчивость сигнала. Проведенные измерения показали, что при увеличении уровня суммарной мощности с 2 мВт до 30 мВт происходит уменьшение величины  $Q$ -фактора в 8 раз при использовании кода NRZ, и в 9 раз при использовании кода RZ.

Так же из рис. 7 следует, что переход от линейного кода NRZ к линейному коду RZ сопровождается увеличением  $Q$ -фактора в среднем в 1,7 раза. В данном случае, усреднение используется по причине того, что с увеличением уровня суммарной мощности оптического излучения происходит уменьшение выигрыша в величине  $Q$ -фактора при переходе от кода NRZ к коду RZ. Снижение выигрыша по величине  $Q$ -фактора связано с увеличением разброса раскрытия глаз-диаграммы детектированного сигнала, из-за описанного

выше увеличения неравномерности распределения эффективной мощности в тактовых интервалах передаваемого сигнала с ростом уровня суммарной мощности излучения в оптоволокну.

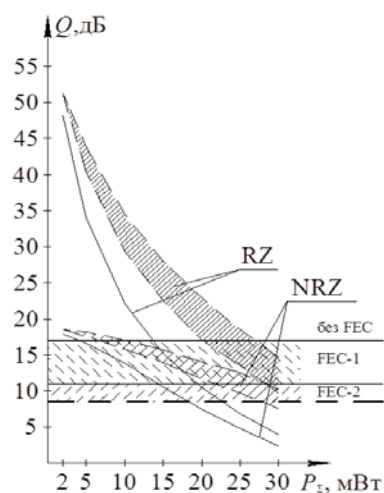


Рис. 7. Зависимость изменения величины  $Q$ -фактора от уровня суммарной мощности оптического излучения при различных типах кодовых импульсов при синхронной передаче (непрерывные линии) и асинхронной передаче (заштрихованные области)

Отметим, что из рис. 7 так же следует, что передача сигнала с вероятностью ошибки  $10^{-12}$  без использования FEC возможна в случае, если уровень суммарной мощности излучения в оптоволокну при синхронной передаче не превышает 5 мВт для кода NRZ и 15 мВт для кода RZ. Это согласуется с результатами, полученными в [7], где было показано, что при уровне суммарной мощности в оптоволокну большем, чем 12 дБм (15 мВт), передача QPSK-сигналов с вероятностью  $10^{-12}$  становится невозможной без применения методов коррекции ошибок.

Применение асинхронной передачи позволяет повысить помехоустойчивость сигнала, в результате чего ограничение по уровню суммарной мощности при передаче без методов коррекции ошибок ослабевает: передача возможна если уровень суммарной мощности не превышает 10 мВт для кода NRZ и не превышает 27 мВт для кода RZ. При соблюдении указанных пределов обеспечивается передача сигнала с вероятностью ошибки  $10^{-12}$  с величиной  $Q$ -фактора в 17 дБм.

Применение технологии FEC-1 позволяет снизить требования по величине  $Q$ -фактора до 11 дБм при соблюдении вероятности ошибки  $10^{-12}$ , что позволяет снизить ограничение по уровню суммарной мощности при асинхронной передаче до 15 мВт для кода NRZ и до 20 мВт для кода RZ. При асинхронной передаче ограничения по уровню суммарной мощности снижаются до 30 мВт для кода NRZ и более чем до 30 мВт для кода RZ.

Применение технологии FEC второго поколения (FEC-2) позволяет еще снизить требования по величине  $Q$ -фактора до 8,5 дБм при соблюдении вероятности ошибки  $10^{-12}$ . Это позволяет снизить ограничение по уровню суммарной мощности при асинхронной передаче до 18 мВт для кода NRZ и до 24 мВт для кода RZ. При асинхронной передаче ограничения по уровню суммарной мощности более чем до 30 мВт и для кода NRZ и для кода RZ.

## Заключение

Реализовано компьютерное моделирование искажения сигнала из-за явлений ФСМ и ФКМ в многоканальной ВОСП-DWDM с гомодинным приемом. В качестве критерия оценки воздействия явлений ФСМ и ФКМ на детектированный сигнал использовался  $Q$ -фактор. Исходя из результатов, полученных в процессе компьютерного моделирования, можно сделать следующие выводы:

1) Увеличение уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне приводит к существенному снижению помехоустойчивости детектированного сигнала из-за явлений ФСМ и ФКМ. Увеличение уровня суммарной мощности излучения от 2 мВт до 30 мВт привело к снижению величины  $Q$ -фактора в 8 раз при использовании кода NRZ, и в 9 раз при использовании кода RZ.

2) Асинхронный режим передачи импульсных последовательностей в спектральных каналах позволяет повысить  $Q$ -фактор 1.7 раз за счет более равномерного распределения эффективной мощности в тактовых интервалах детектированного сигнала.

3) Применение различных типов линейных кодов оказывает влияние на  $Q$ -фактор. В данной работе, переход от линейного кода NRZ к линейному коду RZ позволил увеличить  $Q$ -фактор в 1.9 раз, что обусловлено снижением уровня шумов, вызванных межсимвольной интерференцией.

Следует отметить, что результаты, полученные в рамках данной работы, показывают вклад в искажение импульсных сигналов только явлений ФСМ и ФКМ и не учитывают влияние других линейных и нелинейных явлений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании волоконно-оптических систем передачи со спектральным уплотнением с целью оценки ожидаемого вклада явлений ФСМ и ФКМ в снижение помехоустойчивости передаваемых сигналов.

## Литература

1. ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2012). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items) (дата обращения 23.11.2019).
2. Agrawal G. P. Lightwave Technology: Telecommunication Systems / Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2005. 461 p.
3. Shneider T. Nonlinear Optic in Telecommunications / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 415 p.
4. Ivaniga T., Ivaniga P. Suppression of Nonlinear XPM Phenomenon by Selection of Appropriate Transmit Power Levels in the DWDM System // International Journal of Optics. Vol. 2019. № 3 (June 2019), pp. 1-8.
5. Ivaniga T., Turan J., Ovsenik L. Verification of the SPM Impact in DWDM System Using AWG Multiplexer // Acta Electrotechnica et Informatica. Vol. 17. № 1 (2017), pp. 17-22.
6. Сычук А.Н., Вардамян В.А. Моделирование процесса уширения спектра сигналов из-за явлений фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне в многоканальной волоконно-оптической системе передачи // Материалы Российской научно-технической конференции "Современные проблемы телекоммуникаций". Новосибирск: СибГУТИ. 2018. С. 162-168.
7. Вардамян В. А. Влияние фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции на OFDM-сигналы в волоконно-оптических сетях доступа // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 4. С. 395-400.
8. Рекомендация МСЭ-Т G.652(11/2016) Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
9. Шереметьев А. Г. Когерентная волоконно-оптическая связь. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
10. ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016). [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-I!!PDF-E&type=items) (дата обращения 23.11.2019).



## PULSED SIGNALS DISTORTIONS IN MULTICHANNEL COHERENT DETECTION TRANSMISSION SYSTEMS CAUSED BY SELF-PHASE MODULATION AND CROSS-PHASE MODULATION IN OPTICAL FIBER

**Anatoly N. Sychuk**, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia, [tolya030394@mail.ru](mailto:tolya030394@mail.ru)

**Vardges A. Vardanyan**, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia, [vardgesvardanyan@mail.ru](mailto:vardgesvardanyan@mail.ru)

### Abstract

The self-phase modulation (SPM) and the cross-phase modulation (XPM) effects influence, depending on transmitting system parameters and affecting noise immunity of pulsed signals to be transmitted of the multichannel wavelength division multiplexing transmitting system is investigated. The investigation is carried out under the conditions of transmitting system parameters variation: the total optical power level in optical fiber and the linear code type. At the receiver after the coherent photodetection of pulsed signals the eye diagrams obtained are analyzed. The estimate criterion of the SPM and XPM effects influence affecting noise immunity of pulsed signals is Q-factor to be calculated by graphic method with an eye diagram. The simulation model of the multichannel wavelength division multiplexing transmitting system is implemented in the environment MathCAD modeling. The SPM and XPM effects influence is simulated as the pulsed signal phase distortions in the signal propagation process through standard single mode optical fiber. With coherent photodetecting the pulsed signal phase distortions are transformed to the pulsed signal amplitude distortions. In the paper deals with the SPM and XPM effects influence affecting noise immunity of pulsed signals is dependent on transmitting system parameters. The simulations shown, the signal quality index is decreased while increasing the total optical signal power level. When the total optical signal power level is increasing from 2 mW to 30 mW, for 128-channel transmitting system 40 Gbps the signal Q-factor is reduced by 8 times for NRZ-code and it is reduced by 9 times for RZ-code, correspondingly. In addition, the simulations showed that transition from NRZ-code to RZ-code allows one to increase value of Q-factor by average 1.7 times. The obtained results can be used to estimate one the potential penalty on signal noise immunity due to the SPM and XPM effects influence in the designed multichannel wavelength division multiplexing transmitting system.

**Keywords:** nonlinear effects, self-phase modulation, cross-phase modulation, wavelength division multiplexing, coherent detection, signal noise immunity.

### References

1. International Telecommunication Union, Telecommunication sector (2012), ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2012): spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, ITU, Geneva, Switzerland, available at: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-1!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-1!!PDF-E&type=items), (Accessed 23.11.2019).
2. Agrawal G.P. (2005). *Lightwave Technology: Telecommunication Systems*. Wiley-Interscience, Hoboken, USA.
3. Shneider, T. (2004). *Nonlinear Optic in Telecommunications*. Heidelberg: Springer-Verlag, Berlin, Germany.
4. Ivaniga, T. and Ivaniga, P. (2019). Suppression of Nonlinear XPM Phenomenon by Selection of Appropriate Transmit Power Levels in the DWDM System. *International Journal of Optics*, vol. 2019, no. 3, pp. 1-8.
5. Ivaniga T., Turan J. and Ovsenik L. (2017). Verification of the SPM Impact in DWDM System Using AWG Multiplexer. *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 1, pp. 17-22.
6. Sychuk A.N. and Vardanyan V.A. (2018). Computer simulation of spectral broadening process due to self-phase modulation and cross-phase modulation in multichannel fiber-optic transmission system", *Materialy Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Sovremennye problemy telekommunikacij [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference], Sovremennye problemy telekommunikacij [Modern Telecommunication Problems]*, Novosibirsk, Russia, 26-27 April 2018, pp. 162-168.
7. Vardanyan V.A. (2018). Effect of Self-Phase Modulation and Cross-Phase Modulation on OFDM Signals in Fiber-Optic Access Networks. *Quantum Electronics*, vol. 48, no. 4, pp. 395-400.
8. International Telecommunication Union, Telecommunication sector (2016), Rekomendatsiya MSE-T G.652 (11/2016): kharakteristiki odnomodovogo opticheskogo volokna i kabelya [ITU-T Recommendation G.652 (11/2016): characteristics of a single-mode optical fibre and cable], ITU, Geneva, Switzerland.
9. Sheremet'yev, A. G. (1991). *Kogerentnaya volokonno-opticheskaya svyaz'* [Coherent fiber optic communication]. Radio and communication, Moscow, Russia.
10. International Telecommunication Union, Telecommunication sector (2016), ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016), ITU, Geneva, Switzerland, available at: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-1!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-1!!PDF-E&type=items), (Accessed 23.11.2019).

### Information about authors:

**Anatoly N. Sychuk**, postgraduate, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia

**Vardges A. Vardanyan**, Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Multichannel Electrical Communication and Optical Systems, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia