

Оценка помехоустойчивости DWDM-сигналов в нелинейном режиме функционирования волоконно-оптического тракта

А. Н. Сычук, В. А. Варданян

Исследуется совместное влияние явлений фазовой самомодуляции, фазовой кросс-модуляции, четырёхволнового смешения и шума усиленной спонтанной эмиссии на помехоустойчивость передаваемых импульсных сигналов в многоканальной волоконно-оптической системе передачи со спектральным уплотнением в зависимости от параметров системы передачи: уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне, скорости передачи и количества спектральных каналов. Критерием оценки помехоустойчивости импульсных сигналов принят Q -фактор. Показана зависимость величины суммарного Q -фактора от уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне для разных значений скорости передачи и количества спектральных каналов.

Ключевые слова: помехоустойчивость импульсных сигналов, спектральное разделение каналов, фазовая кросс-модуляция, четырёхволновое смешение, шум усиленной спонтанной эмиссии.

1. Введение

Технология частотного разделения каналов в оптическом диапазоне WDM (Wavelengths Division Multiplexing) повсеместно внедрена в современные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) и обеспечивает высокую эффективность использования пропускной способности оптического волокна. Принцип работы технологии WDM заключается в одновременной передаче информационных сигналов с помощью большого количества спектрально разделённых каналов. Частотный интервал между спектральными каналами регламентирован стандартом ITU-T G. 694.1 [1]. Увеличение количества спектральных каналов является одним из способов повышения пропускной способности ВОСП-WDM. Однако большое число спектральных каналов приводит к возрастанию суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне, что, в свою очередь, приводит к возникновению различных нелинейных явлений типа фазовой самомодуляции (ФСМ) и фазовой кросс-модуляции (ФКМ), а также четырёхволнового смешения (ЧВС) [2, 3]. Явление ЧВС в волокне приводит к генерации комбинационных частот [4–6]. Некоторые из комбинационных частот попадают в диапазоны длин волн спектральных каналов, приводя к возникновению перекрёстных помех и снижению качества передаваемых сигналов [7]. Количество генерируемых комбинационных частот увеличивается с ростом количества спектральных каналов, тем самым усиливая влияние явления ЧВС на качество передаваемых сигналов [8]. В свою очередь, явления ФСМ и ФКМ влияют на фазы сигналов передаваемых спектральных каналов. В процессе фотодетектирования искажение фазы сигналов в спектральных каналах трансформируется в искажение амплитуды фотодетектируемых сигналов, что приводит к снижению помехоустойчивости принимаемых сигналов [2]. В современных ВОСП-WDM дальность передачи может быть увеличена путем включения оптических усилителей в оптический тракт. Наиболее распространён-

ным типом усилителей, применяемых в ВОСП-WDM, является эрбиевый усилитель EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Однако усилитель EDFA является источником шума спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission). ASE-шум возникает в процессе когерентного фотодетектирования при смешивании детектируемого сигнала со спонтанным шумом усилителя [2, 6].

Целью данной работы является исследование совместного влияния явлений ФСМ, ФКМ, ЧВС и шума ASE на помехоустойчивость импульсных сигналов в многоканальной ВОСП-WDM с гомодинным приёмом. Критерием оценки помехоустойчивости импульсных сигналов принят Q -фактор.

2. Структурная схема системы передачи

На рис. 1 представлена структурная схема многоканальной ВОСП-WDM с гомодинным фотоприёмником.

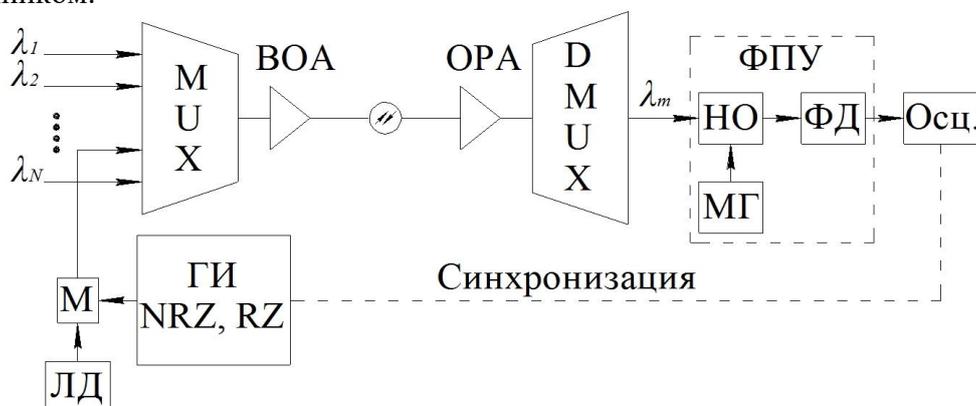


Рис. 1. Структурная схема многоканальной ВОСП-WDM с когерентным детектированием

В передающей части лазерные диоды (ЛД) генерируют оптические несущие для спектральных каналов, диапазоны длин волн которых определены в соответствии с сеткой частот DWDM (Dense WDM). Оптические несущие генерируются в диапазоне С для стандартного одномодового оптического волокна (Standard Single Mode Fiber, SSMF). Для лазерных диодов предусмотрена возможность контроля уровня мощности в спектральном канале. В работе предполагается, что суммарная мощность, вводимая в оптоволокно, распределена равномерно между всеми спектральными каналами. Излучение от лазерных диодов поступает на один из входов оптических модуляторов (М). На другой вход оптических модуляторов подаются последовательности управляющих импульсов, формируемых генератором импульсов NRZ, RZ (ГИ NRZ, RZ). В генераторе импульсов NRZ, RZ предусмотрена возможность регулировки длительности управляющих импульсов. Отметим, что в процессе модуляции под логической «1» принято наличие излучения на выходе оптического модулятора, а под логическим «0» принято отсутствие оптического излучения на выходе оптического модулятора. Также в работе учтено наличие межсимвольной интерференции между оптическими импульсами в соседних тактовых интервалах. Модулированные оптические несущие мультиплексируются (МУХ) и поступают на вход оптического усилителя (ОУ). Оптические усилители используются в схеме для компенсации потерь мощности, возникающих в передающей и линейной частях оптического тракта. В данной работе используются два EDFA-усилителя: бустерный усилитель – ВОА (Booster Optical Amplifier) и предусилитель – ОРА (Optical Pre-Amplifier). В процессе распространения мультиплексированного сигнала по оптоволокну на сигнал оказывают воздействие нелинейные явления: ФСМ, ФКМ и ЧВС. Также в модели учитывается влияние шума ASE. В приёмной части после предварительного усиления и демultipлексирования (ДМУХ) демultipлексированный сигнал поступает на вход фотоприёмного устройства (ФПУ), состоящего из направленного ответвителя (НО), местного ге-

гетеродина (МГ) и фотодетектора (ФД). Усиленный сигнал вводится в направленный ответвитель. В направленном ответвителе происходит смешение поля детектируемого сигнала и поля оптического излучения, генерируемого местным гетеродином. Результирующее поле из направленного ответвителя поступает на фотодетектор. На выходе фотодетектора формируется фототок, который регистрируется осциллографом (Осц), синхронизированным с генератором импульсов NRZ, RZ.

3. Теоретическое обоснование

В приёмной части ВОСП-WDM оптическое поле на входе фотодетектора представляет собой результат взаимодействия оптического поля гетеродина с оптическим полем детектируемого сигнала, искаженного в результате воздействия явлений ФСМ, ФКМ, ЧВС и оптического шума ASE. В результате огибающая фототока на выходе фотодетектора может быть описана следующим образом [2]:

$$I_{Pd}(t) = i_{NL}(t) + i_{S-ASE}(t) + i_{LO-ASE}(t), \quad (1)$$

где $i_{NL}(t)$ – флуктуация фототока из-за воздействия явлений ФСМ, ФКМ и ЧВС на детектируемый сигнал; $i_{S-ASE}(t)$ – флуктуация фототока из-за биения детектируемого сигнала со спонтанным излучением; $i_{LO-ASE}(t)$ – флуктуация фототока из-за биения излучения гетеродина со спонтанным излучением. Отметим, что в (1) параметр $i_{NL}(t)$ описывает суммарное воздействие явлений ФСМ, ФКМ и ЧВС вследствие их общего механизма возникновения, связанного со взаимодействием спектральных каналов из-за нелинейной восприимчивости оптоволокна третьего порядка [5]. Однако явление ЧВС и явления ФСМ и ФКМ по-разному оказывают влияние на помехоустойчивость детектируемого сигнала [3, 4]. Поэтому в дальнейшем оценка влияния явлений ФСМ, ФКМ и влияния явления ЧВС на помехоустойчивость детектируемого сигнала будет выполняться по отдельности.

Оценку влияния шума ASE на Q -фактор детектируемого сигнала удобно проводить с помощью оценки дисперсии шума ASE, которая определяется как результирующее значение дисперсии флуктуаций фототока из-за биения детектируемого сигнала со спонтанным излучением и дисперсии флуктуаций фототока из-за биения излучения гетеродина со спонтанным излучением. Влияние шума ASE на Q -фактор детектируемого сигнала можно определить следующим образом [3]:

$$Q_{ASE} = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_{S-ASE} + \sigma_{LO-ASE}}, \quad (2)$$

где I_1 – уровень фототока сигнала при передаче логической «1»; I_0 – уровень фототока сигнала при передаче логического «0»; σ_{S-ASE} – среднеквадратическое отклонение флуктуаций фототока из-за биения детектируемого сигнала со спонтанным излучением; σ_{LO-ASE} – среднеквадратическое отклонение флуктуации фототока из-за биения излучения гетеродина со спонтанным излучением. Дисперсию флуктуации фототока из-за биения детектируемого сигнала со спонтанным излучением можно определить следующим образом [2, 6]:

$$\sigma_{S-ASE}^2 = 4 \cdot \nu \cdot h \cdot \Delta f \cdot n_{ASE} \cdot P_{\langle 1 \rangle}. \quad (3)$$

Соответственно, дисперсия флуктуации фототока из-за биения излучения гетеродина со спонтанным излучением определяется как [3, 7]:

$$\sigma_{LO-ASE}^2 = 4 \cdot \nu \cdot h \cdot \Delta f \cdot n_{ASE} \cdot P_{LO}, \quad (4)$$

где ν – частота излучения детектируемого сигнала, равная частоте излучения гетеродина (когерентный гомодинный приём); h – постоянная Планка; Δf – ширина полосы частот детектированного сигнала; n_{ASE} – коэффициент спонтанного излучения; $P_{\langle 1 \rangle}$ – уровень пиковой мощности оптического импульса детектируемого сигнала, соответствующего переданной логической «1»; P_{LO} – уровень мощности оптического излучения гетеродина.

Отметим, что дисперсия шума ASE зависит от уровней мощности сигнала гетеродина и детектируемого сигнала, однако при расчётах в [2] было установлено, что вклад дисперсии флуктуации фототока из-за биения детектируемого сигнала со спонтанным излучением на два порядка ниже по сравнению с дисперсией флуктуации фототока из-за биения излучения гетеродина со спонтанным излучением. По этой причине при дальнейших расчётах вклад дисперсии флуктуации фототока из-за биения детектируемого сигнала со спонтанным излучением не учитывается.

Оценку влияния явления ЧВС (Four Wave Mixing, FWM) на Q -фактор детектируемого сигнала удобно проводить в частотной области при помощи выражения [4–6]:

$$Q_{FWM} = \left[\frac{P_m}{P_{FWM}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где P_m – средний уровень мощности в m -м канале, $m = 1, 2, \dots, N$, N – количество спектральных каналов; P_{FWM} – суммарная мощность комбинационных частот, попадающих в m -й канал. Суммарную мощность комбинационных частот в m -м канале при длине оптического волокна L можно определить следующим образом:

$$P_{FWM} = P_{ijk}(L, d) \cdot N_{(f_i+f_j-f_k)}(m, N) + P_{ijk}(L, d) \cdot N_{(2f_i-f_k)}(m, N), \quad (6)$$

где $N_{(f_i+f_j-f_k)}(m, N)$ и $N_{(2f_i-f_k)}(m, N)$ – количество комбинационных частот типа $f_i + f_j - f_k$ и $2f_i - f_k$, соответственно, попадающих в спектральный канал с индексом m при передаче N спектральных каналов; $P_{ijk}(L, d)$ – мощность комбинационных частот на расстоянии L от начала ввода мультиплексированного сигнала в оптоволокно [5]:

$$P_{ijk}(L, d) = \eta_{ijk} \cdot \left(\frac{d}{3} \gamma Z_{eff} \right)^2 \cdot P_i \cdot P_j \cdot P_k \exp(-\alpha L), \quad (7)$$

где η_{ijk} – эффективность генерации комбинационных частот; d – коэффициент вырождения ($d = 6$ для комбинационных частот типа $f_i + f_j - f_k$ и $d = 3$ для комбинационных частот типа $2f_i - f_k$); γ – нелинейный коэффициент оптоволокна; $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha L)) / \alpha$ – эффективная длина оптоволокна [3]; α – коэффициент затухания оптоволокна.

Эффективность генерации комбинационных частот определяется следующим выражением:

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + \frac{4 \cdot \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - \exp(-\alpha L))^2} \right], \quad (8)$$

где $\Delta\beta$ – фазовое рассогласование между передаваемыми спектральными каналами.

На основе результатов, полученных в [4, 5], можно утверждать, что наибольшая концентрация нежелательных комбинационных частот ЧВС приходится на спектральные каналы, находящиеся в середине частотного диапазона размещения спектральных каналов, поэтому в дальнейшем будем оценивать влияние ЧВС для спектрального канала в середине диапазона

размещения. Определить количество комбинационных частот типа $f_i + f_j - f_k$ и $2f_i - f_k$, попадающих в спектральный канал с индексом m при передаче N спектральных каналов, можно при помощи следующих выражений [5]:

$$N_{(f_i+f_j-f_k)}(m, N) = \frac{m}{2}(N-m+1) + \frac{1}{4}((N-3)^2 - 5) - \frac{1}{8}(1-(-1)^N)(-1)^{N+m}; \quad (9)$$

$$N_{(2f_i-f_k)}(m, N) = \frac{1}{2}(N-2 - \frac{1}{2}(1-(-1)^N)(-1)^m). \quad (10)$$

Явления ФСМ, ФКМ, ЧВС и шум ASE являются независимыми друг от друга [6, 7]. Тогда суммарный Q -фактор может быть определён следующим образом [2]:

$$1/Q_{\Sigma}^2 \approx 1/Q_{NL+II}^2 + 1/Q_{ASE}^2 + 1/Q_{FWM}^2, \quad (11)$$

где Q_{NL+II} – Q -фактор детектируемого сигнала из-за влияния ФСМ и ФКМ с учётом наличия межсимвольной интерференции [3]; Q_{ASE} – Q -фактор детектируемого сигнала из-за влияния шума ASE [2]; Q_{FWM} – Q -фактор детектируемого сигнала из-за влияния ЧВС.

4. Результаты моделирования

Компьютерное моделирование проводилось в среде моделирования MathCAD. Результаты моделирования представлены семейством графиков изменения Q -фактора детектируемого сигнала в зависимости от уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне при различных значениях количества спектральных каналов и частотного интервала между спектральными каналами. Частотный интервал между спектральными каналами и количество каналов выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможность передачи группового сигнала с заданной скоростью (приводятся результаты для скорости сигналов 1.6 Тбит/с). Таким образом, была смоделирована работа системы передачи в двух случаях: передача $N = 160$ спектральных каналов со скоростью 10 Гбит/с, форматом кодирования NRZ и частотным интервалом между спектральными каналами 12.5 ГГц и передача $N = 40$ спектральных каналов со скоростью 40 Гбит/с, форматом кодирования NRZ и частотным интервалом между спектральными каналами 50 ГГц. Для указанного числа спектральных каналов было определено количество комбинационных частот, попадающих в полосу длин волн спектральных каналов, находящихся в середине частотного диапазона размещения спектральных каналов (соответствует наихудшему случаю). Результаты представлены в табл. 1

Таблица 1. Максимальное количество частот, попадающих в полосу частот одного спектрального канала при разном количестве спектральных каналов N

Количество спектральных каналов	Количество комбинационных частот	
	$N_{(f_i+f_j-f_k)}$	$N_{(2f_i-f_k)}$
$N = 40$	551	19
$N = 160$	9401	79

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 2 в виде графиков зависимости Q_{NL+II} (кривая 1), Q_{ASE} (кривая 2), Q_{FWM} (кривая 3), Q_{Σ} (кривая 4) от уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне при различных параметрах системы передачи: число спектральных каналов и скорость передачи.

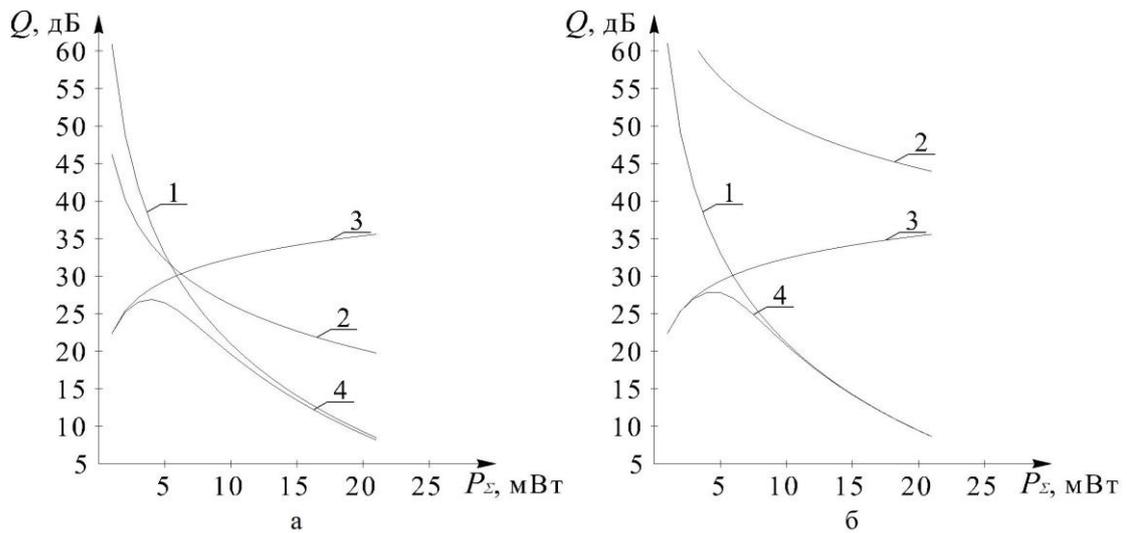


Рис. 2. Зависимость Q_{NL+II} (кривая 1), Q_{ASE} (кривая 3), Q_{FWM} (кривая 2), Q_{Σ} (кривая 4) от уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне: а) скорость передачи 10 Гбит/с, $N = 160$, тип кода NRZ; б) скорость передачи 40 Гбит/с, $N = 40$, тип кода NRZ

Характер кривых изменения Q -фактора детектируемого сигнала из-за влияния явления ЧВС, показанных на рис. 2, можно объяснить зависимостью ЧВС от количества спектральных каналов и частотного интервала между спектральными каналами. Как следует из формул (9) и (10), а также табл. 1, количество спектральных каналов напрямую влияет на количество комбинационных частот, попадающих в полосу длин волн спектрального канала [5]. Отметим, что изменение частотного интервала между спектральными каналами оказывает влияние на фазовое рассогласование между взаимодействующими спектральными каналами. Из рис. 2 видно, что уменьшение частотного интервала между спектральными каналами приводит к снижению Q_{FWM} , что связано с уменьшением фазового рассогласования между взаимодействующими спектральными каналами.

Из рис. 2 видно, что влияние явлений ФСМ и ФКМ на помехоустойчивость детектируемого сигнала значительно зависит от уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне. Подобную зависимость можно объяснить тем, что явления ФСМ и ФКМ возникают вследствие эффекта Керра, при котором показатель преломления среды передачи зависит от интенсивности оптического излучения, внося фазовые искажения в передаваемый сигнал.

Как видно из рис. 2, в приведенных результатах при разных скоростях передачи не происходит изменения кривой помехоустойчивости детектируемого сигнала под воздействием шума ASE. Это объясняется тем, что в данной работе при изменении скорости передачи также происходит изменение количества спектральных каналов. В результате в формуле (2) почти пропорционально изменяется не только знаменатель (увеличивается/уменьшается частотная полоса сигнала), но и числитель (увеличивается/уменьшается уровень мощности канальных сигналов).

При малом уровне суммарной мощности вводимого в оптоволокно оптического излучения основным фактором, ограничивающим помехоустойчивость детектируемого сигнала, является шум ASE. Причиной тому является слабая зависимость дисперсии фототока из-за шума ASE от мощности детектируемого сигнала [2]. Следует отметить, что в случае расположения спектральных каналов с частотным интервалом около 12.5 ГГц при малых уровнях суммарной мощности вводимого оптического излучения (до 5 мВт) явление ЧВС оказывает большее влияние на помехоустойчивость детектируемого сигнала по сравнению с явлениями ФСМ и ФКМ. Однако, ввиду сильной зависимости явлений ФСМ и ФКМ от уровня мощности сигнала, с увеличением уровня суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, основным фактором, ограничивающим помехоустойчивость детектируемого

сигнала, становится влияние явлений ФСМ и ФКМ. Также на графиках присутствует выраженная область с пиковым значением величины результирующего Q -фактора. Данная область соответствует оптимальному уровню суммарной мощности излучения в волокне с точки зрения помехоустойчивости сигналов к совместному воздействию нелинейных явлений (ФСМ, ФКМ, и ЧВС) и шума ASE. Также из рисунков видно, что при изменении скорости передачи и количества спектральных каналов N область пикового значения остается на том же значении уровня суммарной мощности излучения. Подобное поведение Q -фактора можно объяснить перераспределением уровня мощности сигналов при изменении количества спектральных каналов N .

5. Заключение

Реализована модель оценки влияния явлений ФСМ, ФКМ, ЧВС и шума ASE на помехоустойчивость сигнала в многоканальной ВОСП-DWDM. Критерием оценки изменения помехоустойчивости принят Q -фактор. На основе результатов, полученных в процессе компьютерного моделирования, можно сделать следующие выводы:

1. При малых уровнях мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, основным фактором, ограничивающим помехоустойчивость сигнала, является шум ASE. В случае увеличения уровня суммарной мощности свыше 5 мВт при передаче 160 спектральных каналов со скоростью 10 Гбит/с в каждом спектральном канале и свыше 5 мВт при передаче 40 спектральных каналов со скоростью 40 Гбит/с в каждом спектральном канале основным фактором, ограничивающим помехоустойчивость детектируемого сигнала, становится влияние явлений ФСМ и ФКМ.

2. В случае использования частотного интервала между спектральными каналами, равного 12.5 ГГц, при уровнях мощности суммарного оптического излучения до 5 мВт явление ЧВС оказывает большее влияние на помехоустойчивость детектируемого сигнала по сравнению с влиянием явлений ФСМ и ФКМ. Дальнейшее увеличение уровня суммарной мощности оптического излучения выше 5 мВт приводит к преобладанию влияния явлений ФСМ и ФКМ на помехоустойчивость детектируемого сигнала.

3. Изменение величины частотного интервала между спектральными каналами приводит к снижению влияния явления ЧВС на помехоустойчивость детектируемого сигнала.

Следует отметить, что полученные результаты показывают вклад в снижение помехоустойчивости детектируемого сигнала только явлений ФСМ, ФКМ, ЧВС и шума ASE без учёта других линейных и нелинейных явлений. Данные результаты могут быть использованы при проектировании ВОСП-DWDM с целью оценки теоретически ожидаемого вклада явлений ФСМ, ФКМ, ЧВС и шума ASE в снижение помехоустойчивости детектируемого сигнала.

Литература

1. ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2012). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-S/en> (дата обращения: 01.04.2022).
2. *Sychuk A., Vardanyan V.* Effect of Phase Noise on Pulsed Signals in a DWDM Optical Transmission System Using Coherent Detection // Proc. XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2021. P. 351–354. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647626> (дата обращения: 01.04.2022).
3. *Сычук А. Н., Варданян В. А.* Искажение импульсных сигналов в многоканальных системах передачи с когерентным детектированием, вызванное явлениями фазовой самомоду-

- ляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 1. С. 4–12.
4. Варданын В. А. Влияние помех от четырехволнового смещения на спектрально разделенные каналы в пассивных оптических сетях доступа // Автометрия. 2017. Т. 53, № 1. С. 63–72.
 5. Варданын В. А. Исследование распределения продуктов четырехволнового смешивания в ВОСП с ЧРК // Вестник СибГУТИ. 2016. № 2. С. 78–84.
 6. Листвин В. Н., Трещиков В. Н. DWDM системы. М.: Наука, 2013. 261 с.
 7. Agrawal G. P. Lightwave technology: telecommunication system. Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2005. 461 p.
 8. Shneider T. Nonlinear optic in telecommunications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 415 p.

*Статья поступила в редакцию 27.04.2022;
переработанный вариант – 29.05.2022.*

Сычук Анатолий Николаевич

аспирант СибГУТИ, e-mail: anatolijsychuk@mail.ru.

Варданын Вардгес Андраникович

д.т.н., профессор кафедры фотоники в телекоммуникациях СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: vardgesvardanyan@mail.ru.

DWDM signals noise immunity evaluation in a nonlinear fiber-optic path

Anatolij Sychuk

Postgraduate student, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), anatolijsychuk@mail.ru.

Vardges A. Vardanyan

Doctor of technical sciences, Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), vardgesvardanyan@mail.ru.

The total influence of self-phase modulation, phase cross-modulation and four-wave mixing effects and amplified spontaneous emission noise on transmitted pulsed signals noise immunity in a multichannel fiber-optic transmission system with spectral division multiplexing is investigated. The investigation is carried out under the conditions of transmitting system parameters variation: the total optical power level in optical fiber, the transmission speed and the number of spectral channels. The estimate criterion of transmitted pulsed signals noise immunity is Q -factor. The total Q -factor value dependence on the total optical power level in optical fiber for various transmission speed and the number of spectral channels is demonstrated.

Keywords: pulsed signal noise immunity, wavelength division multiplexing, cross-phase modulation effect, four-wave mixing effect, amplified spontaneous emission noise.

References

1. ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2012). *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-S/en> (accessed 01.04.2022).
2. Sychuk A., Vardanyan V. Effect of Phase Noise on Pulsed Signals in a DWDM Optical Transmission System Using Coherent Detection. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2021, pp. 351-354 available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647626> (accessed 01. 04. 2022).
3. Sychuk A. N., Vardanyan V. A. Iskazhenie impul'snyh signalov v mnogokanal'nyh sistemah peredachi s kogerentnym detektirovaniem, vyzvannoe yavleniyami fazovoy samomodulyacii i fazovoy kross - modulyacii v opticheskom volokne [Pulsed signals distortions in multichannel coherent detection transmission systems caused by self-phase modulation and cross-phase modulation in optical fiber]. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 4-12.
4. Vardanyan V. A. Vliyanie pomekh ot chetyrekhvolnovogo smesheniya na spektral'no razdelennye kanaly v passivnyh opticheskikh setyah dostupa [Four-wave mixing interference influence on wavelength division channels in passive optical access networks]. *Avtometriya*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 63-72.
5. Vardanyan V. A. Issledovanie raspredeleniya produktov chetyrekhvolnovogo smeshivaniya v VOSP s CHRK [Product distribution research of four-wave mixing in fiber optical transmission systems with frequency directed channels]. *Vestnik SibGUTI*, 2016, no. 2, pp. 78-84.
6. Listvin V. N., Treshchikov V. N. *DWDM sistemy* [Dense wavelength division multiplexing systems]. Moscow, Nauka, 2013, 261 p.
7. Agrawal G. P. *Lightwave technology: telecommunication system*. Hoboken, USA, Wiley-Interscience, 2005, p. 461.
8. Shneider T. *Nonlinear optic in telecommunications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. p. 415.