

**На правах рукописи**



**ИБРАГИМОВ Роман Захирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОГЕРЕНТНЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
СО СПЕКТРАЛЬНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ  
КАНАЛОВ**

**Специальность 05.12.13 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа – 2015**

Работа выполнена на кафедре многоканальной электросвязи и оптических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики

Научный руководитель: кандидат техн. наук, доцент  
**Фокин Владимир Григорьевич**

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор  
**Хан Валерий Алексеевич**  
«Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева» Сибирского отделения РАН, ведущий научный сотрудник

к.т.н.,  
**Кутлюяров Руслан Владимирович**  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», старший научный сотрудник кафедры ТС

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2015 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.07 при Уфимском государственном авиационном техническом университете в актовом зале 1-го корпуса по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «26» октября 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент



**И.Л. Виноградова**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Высокоскоростные оптические системы в настоящее время широко используются для транспортировки трафика различного назначения на протяженные расстояния. Основное направление развития систем оптической связи связано с увеличением скорости передачи и использованием когерентного приема. Когерентные оптические системы имеют следующий ряд преимуществ:

- Возможность наращивания скорости в ограниченной полосе частот (25, 50, 100 ГГц) оптических каналов систем с плотным мультиплексированием по длине волны (DWDM) за счет использования многоуровневых форматов модуляции.
- Внедрение когерентного гомодинного приема в системы передачи совместно с блоком цифровой обработки сигнала для исключения из цепочки оптических компонентов компенсаторов дисперсии.
- Достижение скорости в когерентных системах 1 Тбит/с на оптический канал за счет использования технологии супер-каналов, построенной на мультиплексировании оптических поднесущих от одного общего источника, отдельно модулируемых информационными составляющими.

При оценке энергетических параметров оптических систем исследуются помехи нелинейного происхождения различного характера и моделируются отдельно друг от друга. Однако в виду растущих потребностей в пропускной способности возрастает и значимость совместной оценки влияния оптических шумов, а также характеристик оптических когерентных гетеродинов.

Таким образом, разработка методов оценки помехоустойчивости позволит проектировать и расширять оптические мультисервисные транспортные сети различного масштаба (магистральные, внутризональные, местные), служащие базой для развертывания множества широкополосных услуг и сервисов.

**Степень разработанности темы.** При решении указанных задач в рамках диссертационного исследования использовались труды отечественных и зарубежных ученых, внесших значительный вклад в различные аспекты: в области построения оптических систем – О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, В.Н. Листвин; в области учета нелинейных оптических эффектов – G.P. Agrawal, B. Chomysz, R.I. Killee; в области компенсации нелинейных эффектов – X. Zhou, P. Bayvel, A.J. Lowery, D.V. Plant, X. Liu; в области исследования многоуровневых форматов модуляции – H. Takahashi, H. Tanaka, G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P.J. Winzer; в области цифровой обработки сигнала – B. Sklar, J.H. Kahn, Ezra Ip, K. Kikuchi, S.J. Savory, M.G. Taylor; в области исследования протяженных супер-каналов – W. Shieh, T. Kobayashi, I. Djordjevic, C. R. Doerr.

При проектировании современных оптических систем не учитывается совместное влияние продуктов нелинейности, таких как стимулированное рассеяние Рамана, четырехволновое смешение, шум усилителей, а также фазовая кросс-модуляция (ФКМ) и фазовая самомодуляция. При этом накопление хроматической и поляризационно-модовой дисперсии компенсируется посредством цифровой обработки сигнала.

Оценка помехоустойчивости для DWDM-систем производится по соотношению сигнал-шум (OSNR), которое в свою очередь снижается за счет влияния помех, не рассмотренных в стандартизированной методике Международного союза электросвязи (МСЭ-Т). Конечное значение OSNR может варьироваться в пределах 6 дБ, таким образом, в реальных системах связи точность оценки будет зависеть от величины нормировки, а не от реально накопленного оптического шума. Методики оценки OSNR для магистральных систем с использованием реконфигурируемых мультиплексоров ввода-вывода (ROADM) на сегодняшний день описаны в одной методике, где указывается, что уменьшение OSNR обуславливается сужением частотных характеристик оптических фильтров, а также штрафами за нелинейные искажения и случайные переключения оптических каналов. Таким образом, точность оценки вероятности в оптическом тракте снижается с увеличением числа сетевых элементов.

В ряде работ показаны преимущества высокоскоростных одноканальных систем, где высокие требования к OSNR обуславливаются использованием многоуровневых форматов модуляции. Внедрение одноканальных систем на протяженных магистральных участках позволяет увеличить емкость оптической сети. Использование блоков цифровой обработки сигналов (ЦОС) в системах со скоростью в канале более 100 Гбит/с компенсирует влияние хроматической и поляризационно-модовой дисперсии. Результаты моделирования таких систем показывают, что влияние нестабильности оптического гетеродина оказывает существенное влияние на вероятность ошибки и OSNR.

Таким образом, актуальной задачей в рамках повышения помехоустойчивости является разработка методов оценки помех в когерентных оптических системах, позволяющих производить совместный учет оптических шумов, а также оценивать влияния от вклада нестабильности оптического гетеродина.

**Объектом исследования** являются оптические когерентные системы передачи, энергетический потенциал которых связан с влиянием помех различного рода, приводящим к снижению значения OSNR.

**Предметом исследования** являются методы оценки оптических шумов различного происхождения, в том числе и нестабильности фазы когерентного гетеродина, влияющих на восстановление фазовых состояний КАМ-сигнала (квадратурная амплитудная модуляция).

**Целью исследования** является развитие методологии повышения эффективности оценки когерентных оптических систем путем совместного учета помех, возникающих при передаче цифрового сигнала по протяженным оптическим каналам.

#### **Задачи исследования**

1. Разработка метода оценки, позволяющего определить OSNR, основанного на совместном учете помех, влияющих на оптический сигнал в магистральных DWDM-системах.

2. Разработка метода оценки OSNR в магистральных ROADM мультиплексорах, основанного на учете частотных характеристик оптических фильтров.

3. Разработка методики расчета предельной ширины спектра оптического гетеродина в одноканальной системе, учитывающего нестабильность когерентного источника излучения.

4. Разработка алгоритма восстановления фазовых состояний электрического сигнала при использовании многоуровневого формата оптической модуляции КАМ-16 с мультиплексированием по поляризации (DP-16QAM), учитывающего порядок фильтра детектирующего устройства при фиксированной нормированной ширине спектра оптического гетеродина.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработан метод оценки оптического отношения сигнал-шум (OSNR), основанный на стандартизированной методике Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), отличающийся совместным расчетом помех четырехволнового смещения и фазовых искажений, а также стимулированного рассеяния Рамана в заданном частотном диапазоне, позволяющий обеспечить повышение эффективности расчета вероятности ошибки при проектировании протяженных волоконно-оптических DWDM-систем.

2. Разработан метод оценки OSNR в магистральных ROADMs, основанный на эффекте сужения полосы пропускания оптических фильтров, отличающийся учетом потерь, вызванных коммутацией оптических каналов, позволяющий повысить эффективность оценки вероятности ошибки в оптическом тракте.

3. Разработана методика расчета предельной ширины спектра оптического гетеродина в одноканальной системе, основанный на критерии нестабильности когерентного источника излучения, отличающийся учетом фазового дрожания гетеродина, позволяющий определять вероятность ошибки по ширине спектра излучения гетеродина.

4. Разработан алгоритм восстановления фазовых состояний электрического сигнала при использовании оптической модуляции DP-16QAM, основанный на критерии минимума вероятности ошибки, отличающийся снижением фазовых искажений сигнала, позволяющий подобрать количество коэффициентов фильтра детектирующего устройства при фиксированной нормированной ширине спектра когерентного гетеродина.

**Теоретическая и практическая ценность** полученных результатов состоит в возможности использования разработанных методов при проектировании протяженных систем оптической связи, расчете их эксплуатационных параметров. Расширения методологии при оценке оптического бюджета сетей позволит увеличить точность расчета вероятности ошибки. Для одноканальных систем связи со скоростью в канале выше 100 Гбит/с методика позволяет использовать запас отношения сигнал-шум при детектировании сигнала, который может быть использован для повышения качества и надежности системы передачи, увеличения максимального расстояния передачи или повышения емкости системы связи.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы основные положения теории оптических волноводов, теории цифровой связи, теории помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений, цифровой обработки сигналов. При разработке программной части применялись методы математиче-

ского и компьютерного моделирования, в том числе функциональная парадигма программирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод оценки OSNR, учитывающий возможность совместного расчета помех четырехволнового смешения, фазовых искажений, а также стимулированного рассеяния Рамана в заданном частотном диапазоне для протяженных волоконно-оптических систем DWDM.

2. Метод оценки OSNR в магистральных ROADM на основе эффекта сужения полосы пропускания оптических фильтров.

3. Методика расчета предельной ширины спектра оптического гетеродина в одноканальной системе, основанный на критерии неустойчивости когерентного источника излучения.

4. Алгоритм восстановления фазовых состояний электрического сигнала при использовании оптической модуляции DP-16QAM, основанный на подборе порядка фильтра детектирующего устройства.

**Достоверность полученных результатов** основана на использовании в теоретических построениях законов и подходов, справедливость которых общепризнана, а также известного и корректного математического аппарата; вводимые допущения мотивированы фактами, известными из практики. Принятые к исследованию методики и алгоритмы протестированы на наличие основных свойств, характеризующих описываемые нелинейные эффекты и неустойчивость оптического гетеродина.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы обсуждались на: международной IEEE-сибирской конференции по управлению и связи «Сибкон», Омск, 2015; международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2014; международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», Казань, 2014; российской научно – технической конференции, Новосибирск, 2007, 2009, 2011, 2012, а также на научных семинарах СибГУТИ.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 13 публикациях, в том числе в 3 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и в 10 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 20 таблиц, 58 рисунков, библиографический список из 202 источников, приложения на 18 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель и методы исследования, научная новизна, обоснована практическая ценность полученных результатов, представлены сведения об апробации и публикации основных положений диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту, дается краткое содержание диссертационной работы.

**В первой главе** проанализированы основные параметры существующих оптических систем передачи с точки зрения их возможностей и ограничений, в зависимости от используемого оптического формата модуляции, протяженности линий и количества оптических каналов.

Проведен анализ нелинейных помех, оказывающих влияние на протяженные DWDM-системы и системы с ROADM. При переходе от скорости 10 Гбит/с к 40 Гбит/с на групповой оптический сигнал оказывают влияние четырехволновое смешение и фазовые искажения, а также присутствует паразитная «перекачка» оптической мощности из-за стимулированного рассеяния Рамана. Компенсация хроматической и поляризационно-модовой дисперсии может осуществляться на приемной стороне транспондеров посредством электронной компенсации.

Обобщая все рассмотренные помехи для сигнала и нелинейные помехи, воздействующие на качество сигнала, методики МСЭ-Т позволяет нормировать полученные значения OSNR штрафами за потери, вызванные ухудшением в магистральном тракте передачи. В результате данного подхода для получения необходимого уровня OSNR производится увеличение уровня мощности в канале, или наращивание коэффициента усиления усилителей, что приводит к увеличению уровня переходных помех между спектральными каналами.

В случае использования одноканальных оптических систем со скоростью более 100 Гбит/с и при переходе к многоуровневым форматам модуляции, таким как DP-QPSK и DP-16QAM, компенсация нелинейных оптических помех решается использованием блока цифровой обработки сигналов (ЦОС) на приемной стороне. В таких системах предъявляются особые требования к прецензионности оптических транспондеров, в частности к стабильности и ширине спектральной полосы оптического гетеродина.

**Во второй главе** диссертации разработан метод оценки OSNR для протяженной DWDM-системы, а также для оптических сетей с полностью оптическими кросс-коммутаторами. Представлено описание проведенных расчетов и анализ результатов.

Стандартизированная методика по оценке значения OSNR для магистральных DWDM-систем учитывает накопление помех, обусловленных спонтанной эмиссией оптических усилителей. При каскадировании некоторого числа сетевых элементов результирующее значение помех в оптическом тракте можно рассчитать по формуле:

$$OSNR = P_c - L - 10 \lg(N) - NF - 10 \lg(h \times f \times \Delta f), \quad (1)$$

где  $NF$  – коэффициент шума одного сетевого элемента, дБ;

$P_c$  – уровень оптической мощности в канале, дБ;

$h$  – постоянная Планка, мДж×с;

$f$  – центральная частота оптического канала, Гц;

$L$  – затухание на одном оптическом пролете, дБ;

$N$  – количество пролетов;

$\Delta f$  – нормированная полоса оптического канала, Гц.

Предлагаемый метод оценки включает в себя учет четырехволнового смешения, спонтанных шумов усилителей, ФКМ, а также стимулированного рассея-

ния Рамана, и позволяет обеспечить повышение точности расчета OSNR и соответственно вероятности ошибки:

$$OSNR = \frac{P_{SRS}}{P_{ASE} + P_{FWM} + P_{ФКМ}}, \quad (2)$$

где  $P_{SRS}$  – мощность в оптическом канале, с учетом эффекта Рамана;

$P_{ASE}$  – мощность спонтанных шумов оптического усилителя;

$P_{FWM}$  – мощность шумов, вызванных явлением четырехволнового смешения;

$P_{ФКМ}$  – мощность шума, вызванного фазовыми искажениями.

Метод предусматривает расчет четырехволновых потерь, на основе комбинаторного метода сложения паразитных гармоник в заданном частотном интервале, эквивалентным шумовой полосе в 0,1 нм. «Перекачка» мощности из-за стимулированного рассеяния Рамана осуществляется путем суммирования мощности, перекачиваемой из канала в канал.

$$P_C(k) = P_I(k) - D[k, i] + D[j, k], \quad (3)$$

где  $P_I(k)$  – мощность, излучаемая из  $k$ -го канала;

$P_C(k)$  – мощность в  $k$ -ом канале, получаемая за счет влияния Рамановского рассеяния;

$D[k, i]$  – мощность, перекачиваемая из  $k$ -го канала в  $i$ -ый канал;

$D[j, k]$  – мощность, поступающая из  $j$ -го канала в  $k$ -ый канал.

При моделировании системы подразумевается, что хроматическая и поляризационно-модовая дисперсия скомпенсированы. В главе приведена оценка OSNR для протяженной 40-канальной DWDM-системы состоящей из 8 оптических пролетов по 100 км каждый. Оценка производилась для стандартных оптических волокон и волокон с ненулевой смещенной дисперсией. Уровень мощности в каждом канале рассчитывается следующим образом:

$$P_\Sigma = P_1 + 10 \lg N \quad (4)$$

где  $N$  – количество каналов;

$P_\Sigma$  – суммарная мощность +15 дБ для 40 Гбит/с;

$P_1$  – мощность одного канала в дБ.

В качестве переменных параметров выбран коэффициент шума оптического усилителя от 4 до 6 дБ, а также изменялось общее количество оптических пролетов.

В главе также рассматриваются переходные помехи в оптических кросс-коммутаторах, в результате которых появляются дополнительные штрафы по мощности, вызванные прохождением через цепочку магистральных ROADMs. Данные потери мощности обусловлены допуском на отклонение частотных характеристик при изготовлении оптических фильтров, чаще всего AWG-решеток (решетка на основе массива волноводов).

Для оценки OSNR в канале с каскадным соединением оптических усилителей и ROADM-мультиплексоров рассматривается случай, когда различия задержек оптического распространения в кросс-коммутаторе превышают время когерентности лазера, т.е. все вклады переходных помех некогерентны друг с другом и некогерентны с сигналом.

Предлагается конечное значение OSNR представлять в следующем виде:

$$OSNR = P_{in} - 10 \lg M_{ch} - \alpha - NF - 10 \lg \left( N + \frac{10^{0.1 \cdot G_{BA}}}{10^{0.1 \cdot \alpha}} \right) - 10 \lg(hf\Delta f) +$$

$$+ 5 \lg \left[ 1 - 4\varepsilon \left( \sum_{i=1}^L M_i + \sum_{i=1}^L N_i - 2 \cdot L \right) Q^2 \right] - \sum_{i=1}^L A_i \quad (5)$$

где  $P_{in}$  – уровень выходной мощности группового сигнала, дБм;

$M_{ch}$  – число волновых каналов в тракте;

$\alpha$  – потери оптической мощности на расстоянии одного пролета в дБ;

$NF$  – коэффициент шума оптического усилителя, дБ

$N$  – число пролетов;

$G_{BA}$  – коэффициент шума оптического усилителя, дБ;

$h$  – постоянная Планка;

$f$  – центральная частота оптического группового сигнала;

$\Delta f$  – оптическая полоса канала;

$\varepsilon$  – отношение оптической мощности каждого вклада переходной помехи к мощности сигнала;

$L$  – число промежуточных кросс-коммутаторов;

$Q$  – величина Q-фактора;

$A_i$  – потери, вызванные сужением полосы оптических фильтров.

Результаты оценки OSNR для каскадного включения кросс-коммутаторов приведены на рисунке 1.

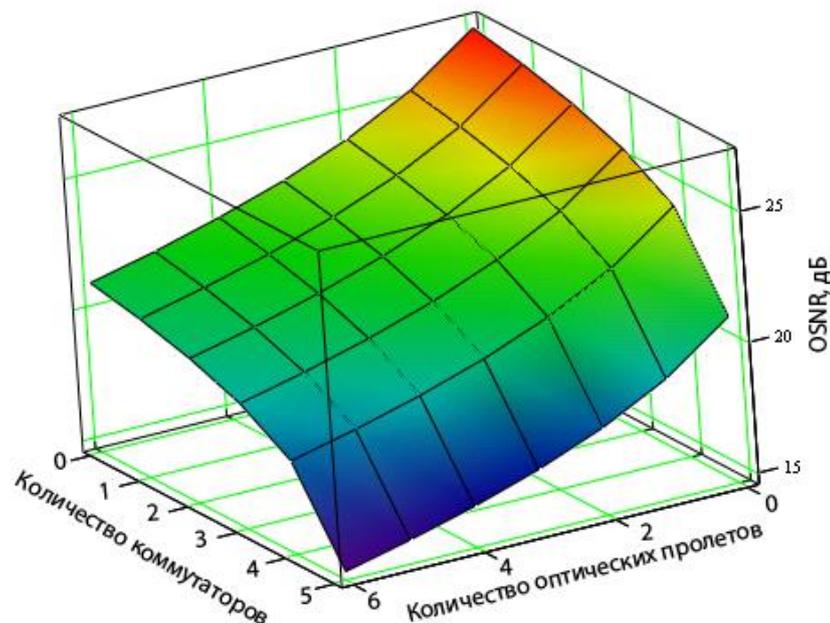


Рисунок 1 – Зависимость OSNR от числа пролетов и числа промежуточных кросс-коммутаторов

**В третьей главе** предложена методика расчета ширины спектра оптического гетеродина в одноканальной системе с использованием модуляции 16-КАМ, основанная на критерии неустойчивости когерентного источника излучения.

Для получения количественных характеристик была использована имитационная модель одноканальной когерентной оптической системы передачи и сформулирован критерий влияния фазового шума на кодовые состояния КАМ-сигнала. Главным фактором является фактор неустойчивости узкополосного опорного лазерного излучения, который отражается на восстановлении фазовых состояний многоуровневого сигнала.

Для решения поставленной задачи, предполагается, что отсчет многоуровневого сигнала 16-КАМ на входе имитационной модели имеет вид:

$$r_k = S_k \exp(j\theta_k) + \omega_k, \quad (6)$$

где  $S_k$  – переданный символ;

$\omega_k$  – комплексный шум, аддитивно действующий на фазовое состояние сигнала;

$\theta_k$  – набег фазы.

Значение  $\theta_k$  представляется в виде дискретного Винеровского процесса:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta_k, \quad (7)$$

$$\theta_{k\pm i} = \theta_k \pm \sum_{m=0}^{i-1} \Delta_m, \quad (8)$$

где  $\Delta_k$  и  $\Delta_m$  являются Гауссовским распределением случайных величин с дисперсией  $\sigma_{\Delta}^2$ .

В качестве исходных данных выступает дисперсия фазы гетеродина:

$$\sigma_{\Delta}^2 = 2\pi\Delta\nu T_s, \quad (9)$$

где  $T_s$  – символьный период;

$\Delta\nu$  – спектральная ширина лазера.

На рисунке 2 представлена схема для снижения фазовой неустойчивости.

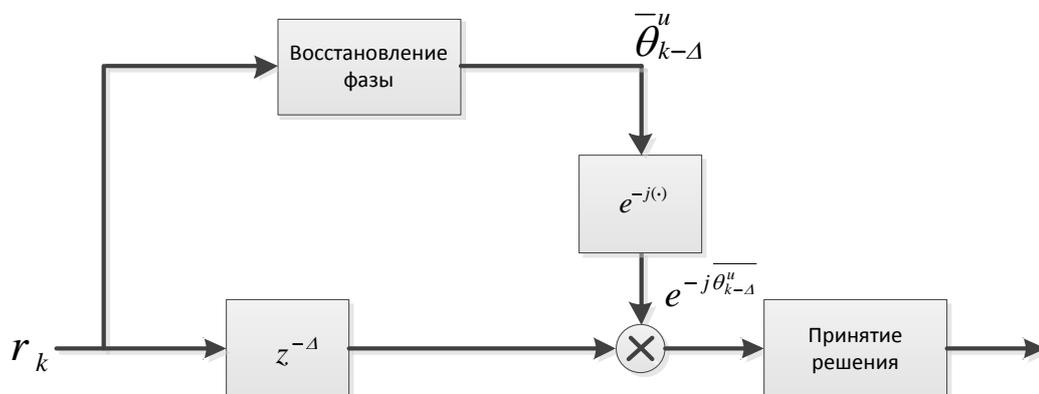


Рисунок 2 – Двухэтапный метод расчета предельной ширины гетеродина

В результате добавления усредненной фазы к фазе отсчетных значений принимаемого сигнала осуществляется снижение неустойчивости фазы сигнала гетеродина. На втором этапе по снижению влияния остаточных искажений на принимаемые отсчеты сигнала предлагается использовать ковариационный метод ослабления неустойчивости фазы помехи на фазу принятого сигнала. Крите-

рием для фильтрации является введенное усредненное значение фазы и минимально возможное значение ее дисперсии при фиксированной длине обрабатываемой последовательности символов.

Автоковариационная обработка предполагает обработку суммы сигнала и помехи, в виде произведения исходного сигнала на задержанный с последующим интегрированием в дискретной форме на интервале сигнальной последовательности конечной длительности. В этом случае регулярная составляющая сигнала на выходе интегратора сохранится, а случайная будет ослаблена в соответствии с выбранной величиной интервала ее корреляции.

Для расчета вероятности ошибки используется оценка среднеквадратического отклонения принимаемого многоуровневого 16-КАМ сигнала и коэффициент ошибки принятой последовательности.

$$EVM = \frac{\sum_{n=1}^N |S_{mean} - S_{0,n}|^2}{\sum_{n=1}^N |S_{0,n}|^2}, \quad (10)$$

где  $S_{mean}$  – принятое состояние  $i$ -го символа;

$S_{0,n}$  – исходное состояние  $i$ -го символа.

$$BER \approx \frac{2(1-\frac{1}{L})}{\log(L)} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\left[\frac{3\log(L)}{L^2-1}\right] \frac{2}{EVM^2 \log(M)}}\right), \quad (11)$$

где  $L$  – количество фазовых состояний;

$M$  – число состояний формата модуляции (в работе рассматривается  $M = 16$  для КАМ-16).

Методика расчета устанавливает связь между шириной спектра излучения гетеродина и вероятностью ошибки. Экспериментальные расчеты производились для трех наиболее распространенных форматов оптической модуляции 16-КАМ:

1. Одноканальная система с мультиплексированием по поляризации (DP-16QAM) со скоростью 112 Гбит/с;
2. Одноканальная система без мультиплексирования по поляризации (SP-16QAM) со скоростью 112 Гбит/с;
3. Одноканальная система без мультиплексирования по поляризации (SP-16QAM) со скоростью 128 Гбит/с.

Результаты приведены на рисунке 3.

Полученные зависимости ограничены предельными нормированными частотами гетеродина ( $\Delta f T_s^{max} = 0.3 \cdot 10^{-3}$  и  $\Delta f T_s^{min} = 7.9 \cdot 10^{-5}$ ). Данные ограничения обусловлены минимально возможным значением OSNR для многоуровневого формата модуляции 16-КАМ ( $\approx 17$  дБ) с одной стороны, и минимально возможным значением ширины полосы когерентного источника с другой стороны (50 кГц).

С помощью методики расчета была получена зависимость коэффициента ошибок от ширины узкополосного излучения гетеродина при когерентном приеме с цифровой обработкой сигнала. Использование одноканальных систем со скоростью выше 100 Гбит/с позволяет преодолеть ухудшение OSNR, вызванных помехами в оптических волокнах за счет использования блока ЦОС.



Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 4.

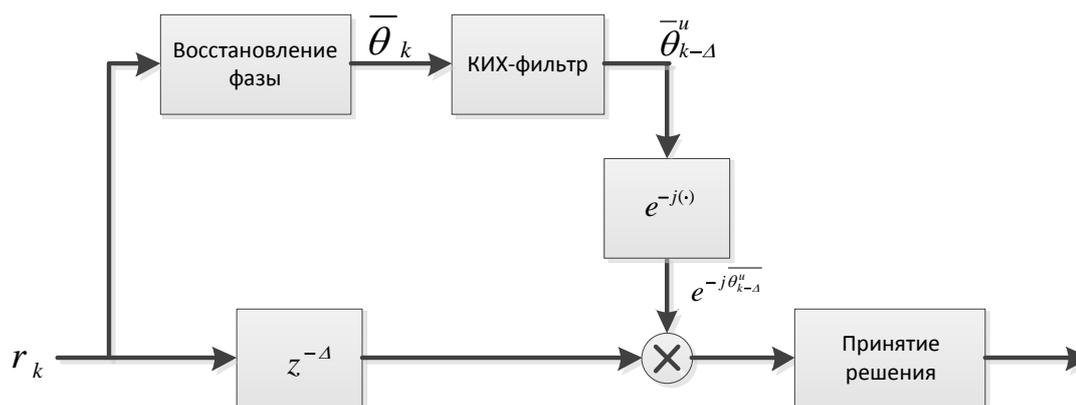


Рисунок 4 – Двухэтапный алгоритм восстановления фазовых состояний

Алгоритм реализует вычисление предельных параметров фильтра при выборе в качестве критерия наилучшего приближения выходного сигнала к образцовому сигналу минимума среднего квадрата ошибки. Вычисление фазы отсчета вычисляется следующим образом:

$$\tilde{\theta}_k = \sum_{i=0}^{L-1} \omega_i \psi_{k-i}, \quad (13)$$

где  $\omega_i$  – коэффициенты фильтра;

$\psi_{k-i}$  – входное значение фазы.

На рисунке 5 представлен график зависимости коэффициента ошибки от нормированной ширины излучения гетеродина при различных длинах детектирующего устройства.

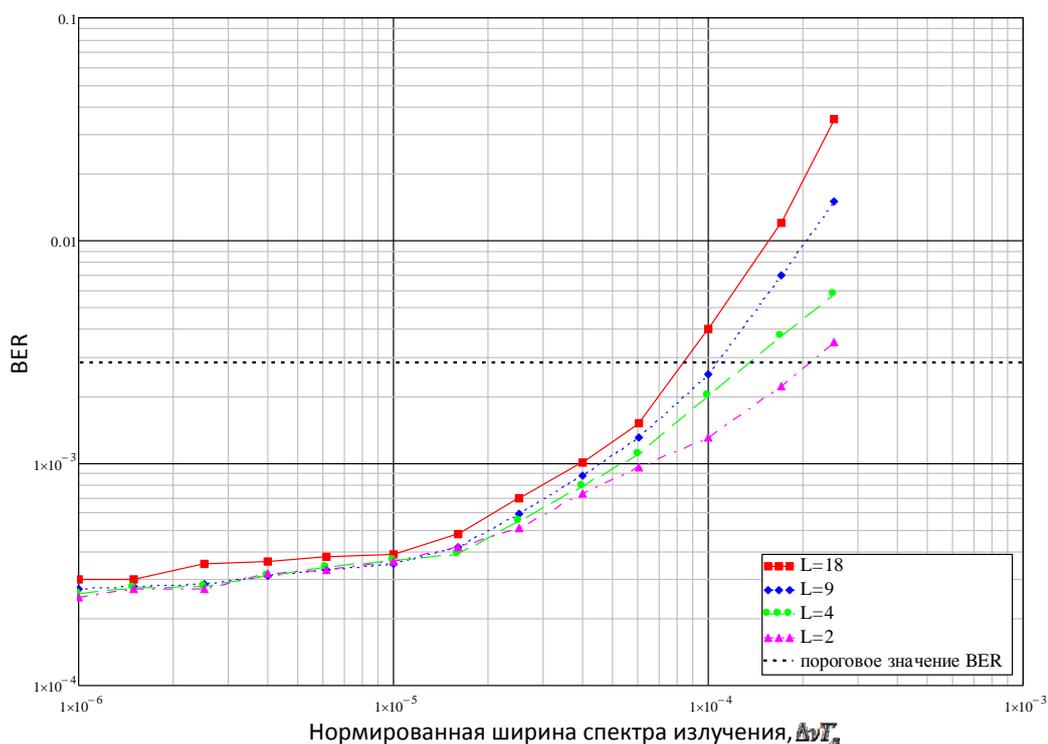


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента ошибки от ширины излучения для DP-16QAM при различных длинах детектирующего устройства

Данный алгоритм позволяет установить связь между количеством коэффициентов детектирующего устройства и коэффициентом ошибок. Установлено, что представленное семейство кривых характеризуется пороговым значением, после которого разброс значений коэффициента ошибки стремительно возрастает. Порог находится на уровне 840 кГц для скорости 112 Гбит/с. Если в системе не превышать указанный порог, то для достижения необходимой помехоустойчивости можно выбрать минимальное из анализируемых значений число весовых коэффициентов фильтра (не более  $L=4$ ).

При этом значения OSNR при соответствующих значениях коэффициента ошибки будут изменяться не более чем на 1,5 – 2 дБ, что достаточно для построения высокоскоростной системы. Запас по помехоустойчивости будет приемлемым при учете общепринятого порогового значения вероятности ошибки ( $BER=2.8 \cdot 10^{-3}$ ) для когерентных систем с многоуровневыми форматами модуляции.

**В четвертой главе** проведено сравнение OSNR на основе рекомендации МСЭ-Т G.692 и рассмотренной во второй главе методики учета нелинейных помех для протяженных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП).

При сравнении использовались 40- и 80-канальная DWDM-системы со скоростью в спектральном канале 40 Гбит/с. Общая скорость систем 1,6 Тбит/с и 3,2 Тбит/с соответственно. В расчетах использовалось ступенчатое одномодовое волокно стандарта G.652. На рисунках 6 и 7 представлены графические зависимости OSNR от количества оптических пролетов, а также спонтанного шума оптических усилителей, что располагаются в регенерационных пунктах.

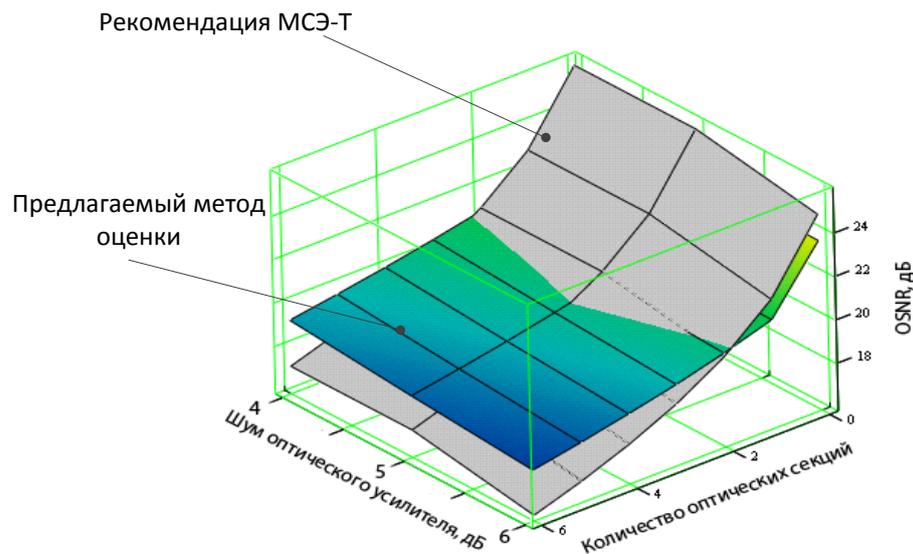


Рисунок 6 – Графики зависимости OSNR от количества пролетов и величины шума оптических усилителей для 40-канальной DWDM-системы

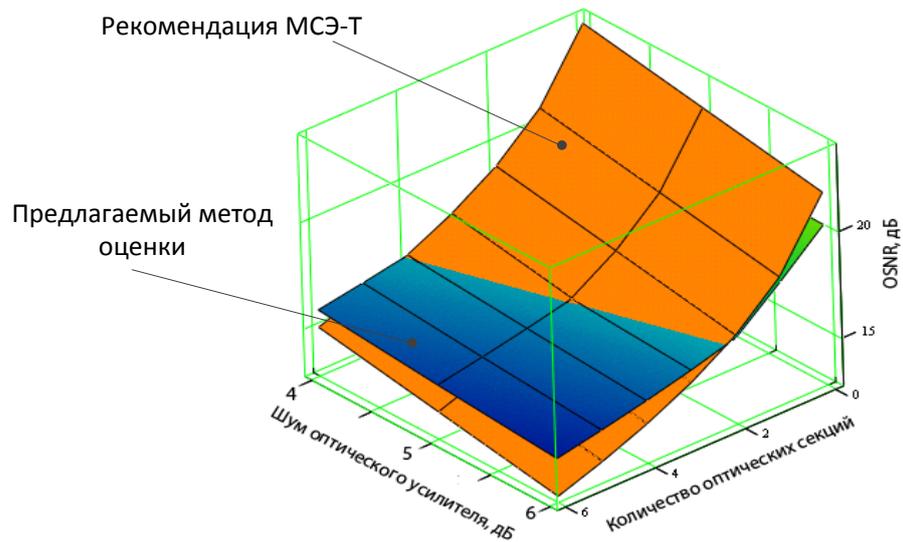


Рисунок 7 – Графики зависимости OSNR от количества пролетов и величины шума оптических усилителей для 80-канальной DWDM-системы

Расчеты показывают, что для 40-канальной системы предлагаемая методика дает значение OSNR на 2,08 дБ меньше, чем значение, полученное посредством методики МСЭ-Т G.692 после прохождения 7 оптических пролетов по 100 км каждый. Для 80-канальной системы разница между значениями OSNR достигает 1,7 дБ.

Кроме этого производилась оценка уровня OSNR для магистральной системы содержащей ROADM-мультиплексоры, представленная на рисунке 8.

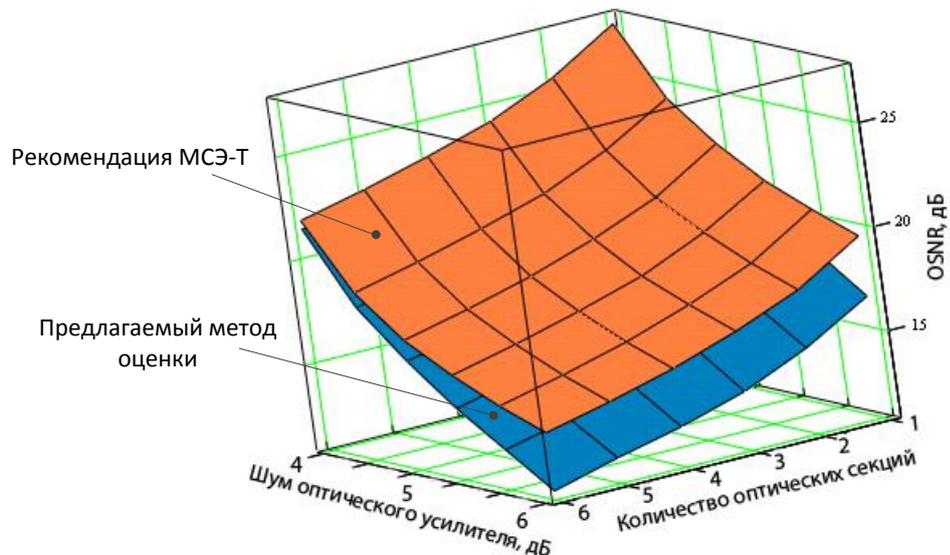


Рисунок 8 – Графические зависимости OSNR для системы с ROADM-мультиплексорами

Полученные результаты показывают, что разработанный метод, включающий оценку перекрестных помех в оптических коммутаторах, а также помех, вызванных сужением полосы оптических фильтров, снижает уровень OSNR на ве-

личину данных помех, в то время как выражение для расчета OSNR из рекомендации МСЭ-Т учитывает только влияние количества оптических каналов в магистральных ROADM-мультиплексорах. Полученное значение OSNR согласно предлагаемому методу на 2,8 дБ меньше, чем значение OSNR согласно методике МСЭ-Т.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**В приложениях** представлены акты внедрения результатов работы в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ), а также Межрегиональном учебном центре переподготовки специалистов при ФГБОУ ВО «СибГУТИ». Также приведен код разработанной методики.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод оценки OSNR, *основанный* на стандартизированной методике МСЭ-Т, *отличающийся* совместным расчетом помех четырехволновых, фазовых искажений, а также стимулированного рассеяния Рамана в заданном частотном диапазоне, *позволяющий* обеспечить повышение эффективности расчета вероятности ошибки при проектировании протяженных ВОЛП на основе DWDM.

2. Разработан метод оценки OSNR в магистральных ROADM, *основанный* на эффекте сужения полосы пропускания оптических фильтров, *отличающийся* учетом потерь, вызванных коммутацией оптических каналов, *позволяющий* повысить эффективность оценки вероятности ошибки в оптическом тракте.

3. Разработана методика расчета предельной ширины спектра оптического гетеродина в одноканальной системе, *основанная* на критерии нестабильности когерентного источника излучения, *отличающийся* учетом фазового дрожания гетеродина, *позволяющий* определять вероятность ошибки по ширине спектрального излучения гетеродина.

4. Разработан алгоритм восстановления фазовых состояний электрического сигнала при использовании оптической модуляции DP-16QAM, основанный на критерии минимума вероятности ошибки, отличающийся снижением фазовых искажений сигнала, позволяющий подобрать количество коэффициентов фильтра детектирующего устройства при фиксированной нормированной спектральной ширине когерентного гетеродина.

5. В результате расчета по разработанной методике для 40-канальной DWDM-системы после 7 оптических пролетов полученное значение OSNR на 2,08 дБ меньше, чем при использовании методики МСЭ-Т G.692. При расчете OSNR для 80-канальной системы полученное значение составило 1,7 дБ. Значение OSNR для системы, состоящей из 6 ROADM-мультиплексоров, по предлагаемому методу на 2,8 дБ меньше, чем значение OSNR полученное согласно методике МСЭ-Т.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Поскольку нелинейные оптические помехи, учтенные в работе, не включают в себя потери на оптических реконфигурируемых коммутаторах на магистралях, то в дальнейшем предполагается

устранить данный недостаток путем разработки более сложных методик и алгоритмов накопления оптических помех. Шумы, учтенные в работе, не являются исчерпывающими для оптической системы передач, поскольку в ближайшем будущем предполагается использование многосердцевинных оптических волокон, где добавляются шумовые составляющие от перекрестного влияния сердцевин друг на друга, что представляет поле для перспективного исследования. Помимо этого, планируется рассмотреть влияние ширины спектра излучения гетеродина на супер-каналы и перекрестное влияние каналов в структуре гибкого оптического мультиплексирования (flex-grid), а также системы с использованием многосердцевинных оптических волокон (MCF) в маломодовом режиме передачи для получения скорости 1 Пбит/с и более для внедрения в центры обработки информации (ЦОД).

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых журналах из списка ВАК**

1. Расчет оптических параметров DWDM системы / Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г. // Электросвязь. №10 2015. С. 10-12.
2. Исследование устойчивости оптических систем на линиях с одномодовыми волокнами без компенсации хроматической дисперсии / Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г. // Телекоммуникации. №8, 2015. С 40-43.
3. Моделирование протяженных волоконно-оптических линий передачи DWDM в среде OPTISystem / Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г. // Телекоммуникации №2, 2012. С. 30-34

### **В других изданиях**

1. Ibragimov R.Z., Fokin V.G. Algorithm increased tolerance by nonlinear effects in coherent homodyne optical systems// International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), 2015.
2. Ibragimov R.Z., Fokin V.G. Analysis optical WDM-Nyquist systems with multiplexing in polarization// Conference: Optical Technologies for Telecommunications 2014, Volume: 9533.
3. Протяженные оптические линии с использованием супер-каналов со скоростью 112Гбит/с. /Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г.// Проблемы техники и технологий телекоммуникаций. – Казань, 2014. С. 82-83.
4. Расчет и моделирование протяженной DWDM системы /Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г.// Двенадцатая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск. НГТУ, 2014.
5. Optical communication systems with multiplexing in polarization /Ibragimov R.Z., Fokin V.G.// Science and world. №10(14), 2014. P. 40 – 41
6. Влияние помех на различные виды оптических форматов модуляции/ Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г.// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Рос-

сийская научно – техническая конференция. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2012. – С. 101

7. О роли форматов модуляции в развитии оптических систем передачи и сетей /Ибрагимов Р.З., Гавриленко О.Б., Фокин В.Г.// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская научно – научно техническая конференция. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2011. – С. 196

8. Некоторые особенности оптических кабелей для сетей доступа /Ибрагимов Р.З., Свадьбин С.Е., Виноградов А.Б.// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская научно – научно техническая конференция. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – С. 196

9. Исследование физических процессов преобразовательных устройств /Ибрагимов Р.З., Дудин Н.В.// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская научно – научно техническая конференция. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2007. – С. 75

10. Пассивные оптические сети на магистрали /Ибрагимов Р.З., Ипатова А.В.// Современные проблемы технических наук. Сборник тезисов докладов Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» - Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2007. – С.139

Диссертант



Р.З. Ибрагимов

ИБРАГИМОВ Роман Захирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ  
КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
СО СПЕКТРАЛЬНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ КАНАЛОВ

Специальность 05.12.13 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 20.10.2015. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ.л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 23.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики»  
Редакционно-издательский отдел  
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86