

УДК 621.39

Сравнительное исследование многоканальных многопролетных волоконно-оптических систем связи с энергетическим и когерентным приемом

Глаголев С. Ф., Какусилумезо С. Э., Агоштиню П. С.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. В настоящее время на транспортных и магистральных сетях связи применяются многоканальные многопролетные волоконно-оптические системы связи с энергетическим и когерентным приемом цифровых оптических сигналов. Все они используют плотное мультиплексирование в волновой области и линейные оптические усилители в каждом пролете. Регенерационное оборудование входит в состав приемной части транспондеров и устанавливается только в оконечных узлах связи. **Целью работы** является разграничение областей применения волоконно-оптических систем связи с энергетическим и когерентным приемом. Для этого проведено всестороннее сравнительное исследование современных многопролетных волоконно-оптических систем связи со скоростью 10 Гбит/с с энергетическим и когерентным приемом, использующих имитационное моделирование процессов генерации, усиления, передачи, приема и обработки цифровых оптических сигналов. **Новизна** работы заключается в предложенных схемах моделирования и методиках их исследования. **Результат:** получены объективные критерии для сравнения волоконно-оптических систем связи с энергетическим и когерентным приемом, определены области их использования на сетях связи. **Практическая значимость:** разработанные схемы моделирования могут быть применены при проектировании волоконно-оптических систем связи, кроме того, они будут использованы в новых лабораторных работах на кафедре оптических и квантовых систем связи.

Ключевые слова: плотное мультиплексирование в волновой области, энергетический прием, когерентный прием, пороговая чувствительность, оптическое отношение сигнала к шуму, Q-фактор

Введение

В высокоскоростных волоконно-оптических системах связи (ВОСС) большой протяженности используются два основных метода приема цифровых оптических сигналов: энергетический (ЭП) и когерентный (КП) [1–4]. При ЭП информация содержится в изменениях мощности сигнала от одного передаваемого символа к другому [2]. Обычно в ВОСС с ЭП применяется амплитудная модуляция (АМ), чаще всего бинарная. ВОСС с ЭП используют каналные скорости передачи обычно до $V_c = 10$ Гбит/с. В ВОСС с КП могут применяться любые виды многоуровневой модуляции: АМ, частотная (ЧМ), фазовая (ФМ) и их комбинации, из которых наибольшее распространение получила квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) [3, 4]. Главной особенностью ВОСС с КП является использование на приеме оптического гетеродина — источника непрерывного оптического квазимонохроматического излучения. При смешивании излу-

Библиографическая ссылка на статью:

Глаголев С. Ф., Какусилумезо С. Э., Агоштиню П. С. Сравнительное исследование многоканальных многопролетных волоконно-оптических систем связи с энергетическим и когерентным приемом // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 3. С. 4. EDN: JVPGVZ

Reference for citation:

Glagolev S., Kakusilumezo S., Agostinho P. Comparative Study of Multi-channel Multi-span Fiber-optic Communication Systems with Energy and Coherent Reception // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 3. P. 4. EDN: JVPGVZ

чения сигнала и гетеродина происходит перенос несущей частоты сигнала на более низкую промежуточную частоту; при этом на промежуточной частоте сохраняется вся информация о сигнале при любом формате модуляции. ВОСС с КП благодаря возможности применения любых форматов многоуровневой модуляции позволяет использовать высокие битовые скорости передачи от $V_c = 100$ Гбит/с и более. Часто количество передаваемых уровней сигнала определяется как $K = 2^k$, где k — количество бит, передаваемых за один такт. При многоуровневой модуляции символьная скорость $V_{cs} = \frac{V_c}{k}$ ГБод снижается в k раз, что позволяет во столько же раз снизить полосы пропускания в волоконно-оптическом линейном тракте (ВОЛТ) и в электрическом тракте фотоприемного устройства (ФПУ).

Целью исследования является сравнение простоты и экономичности технических решений, качества и дальности связи в ВОСС с ЭП и КП. Для корректного сравнения в этой работе ограничимся одной длиной стандартного телекоммуникационного оптического волокна (ОВ) в пролете 100 км, одной канальной скоростью передачи $V_c = 10$ Гбит/с как наибольшей для ВОСС с ЭП. Будем изменять количество пролетов от 1 до 15, уровень сигнала на входе в ВОЛТ, а для ВОСС с ЭП — тип линейного кодирования (NRZ, аббр. от англ. Non Return to Zero — без возврата к нулю, или RZ, аббр. от англ. Return to Zero — с возвратом к нулю). Качество связи будем оценивать с помощью Q-фактора и оптического отношения сигнала к шуму ($OSNR_{out}$) на выходе ВОЛТ [1].

Моделирование ВОСС с ЭП

Для моделирования ВОСС с ЭП будем использовать схему в программе OptiSystem (рисунок 1) [5]. Схема включает четыре оптических передатчика (Optical Transmitter) с амплитудной бинарной модуляцией и интервалом между каналами по частоте $\Delta\nu_c = 50$ ГГц. Сигналы передатчиков объединяются мультиплексором (WDM Mux) и после усиления в оптическом усилителе (ОУ) мощности поступают в многопролетный ВОЛТ, который заканчивается демультиплексором (WDM Demux). Полосы пропускания мультиплексора и демультиплексора выбраны равными $\Delta\nu_{mux} = 30$ ГГц. ВОЛТ состоит из последнего пролета (перед демультиплексором) и нескольких одинаковых прозрачных пролетов, объединенных петлевым элементом (Loop Control). Количество пролетов можно изменять в широких пределах установкой параметра (Number of Loops). Каждый пролет ВОЛТ состоит из телекоммуникационного ОВ длиной 100 км, обозначенного SMF (аббр. от англ. Single-mode Optical Fiber — одномодовое оптическое волокно), и компенсирующего ОВ (DCF, аббр. от англ. Dispersion Compensation Fiber — волокно для компенсации дисперсии), а также эрбиевого ОУ типа EDFA. (аббр. от англ. Erbium Doped Fiber Amplifier — усилитель на волокне, легированном эрбием).

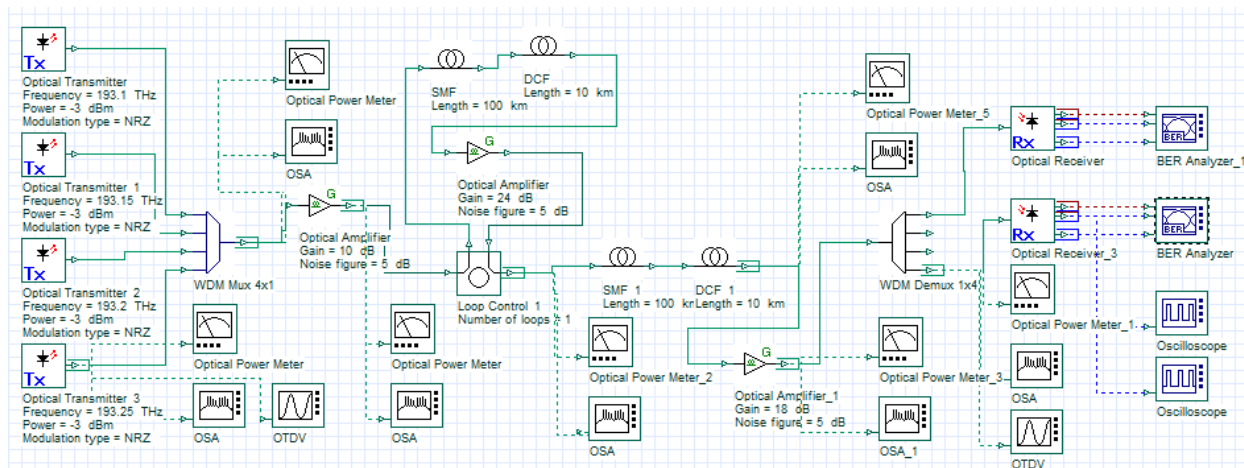


Рис.1. Четырехканальная многопролетная ВОСС с ЭП и канальной скоростью 10 Гбит/с

Длина ОВ DCF выбрана исходя из условия полной компенсации хроматической дисперсии (ХД) в пролете, а коэффициент усиления линейного ОУ — из условия полной компенсации затухания в пролете ВОСС. На выходе ВОЛТ перед демультиплексором установлен предварительный ОУ (ПОУ), ко-

эффицент усиления которого меньше, чем линейного ОУ, так как его сигнал подается не в следующий пролет, а на чувствительное ФПУ.

Выходной сигнал ВОЛТ разделяется демультиплексором, имеющим затухание 5 дБ, на отдельные канальные сигналы, которые поступают на свои ФПУ. Изменения мощности приходящего излучения сначала преобразуются в фототок в фотодиоде (ФД), а затем в напряжение в усилителе фототока (УФТ), который представляет собой фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 7,5 ГГц. Аналоговое напряжение на выходе УФТ по форме представляет собой реакцию ВОЛТ на входной цифровой сигнал с учетом искажений и шумов. Далее это напряжение преобразуется в цифровой бинарный сигнал в коде NRZ в регенераторе, который входит в состав ФПУ.

Для проведения исследований в схему ВОСС входят: измерители оптической мощности (Optical Power Meter), оптические осциллографы (Optical Time Domain Visualizer, OTDV), оптические спектроанализаторы (Optical Spectrum Analyzer, OSA), анализаторы коэффициента битовых ошибок (Bit Error Rate (BER) Analyzer) и электрические осциллографы (Oscilloscope) [5].

Исходные данные и результаты исследований для ВОСС с ЭП помещены в таблицу 1, где использованы обозначения: для коэффициента усиления ПОУ — $g_{поу}$, а для пиковой мощности выходного сигнала — ρ_{sm_out} .

Таблица 1. Результаты исследований ВОСС с ЭП

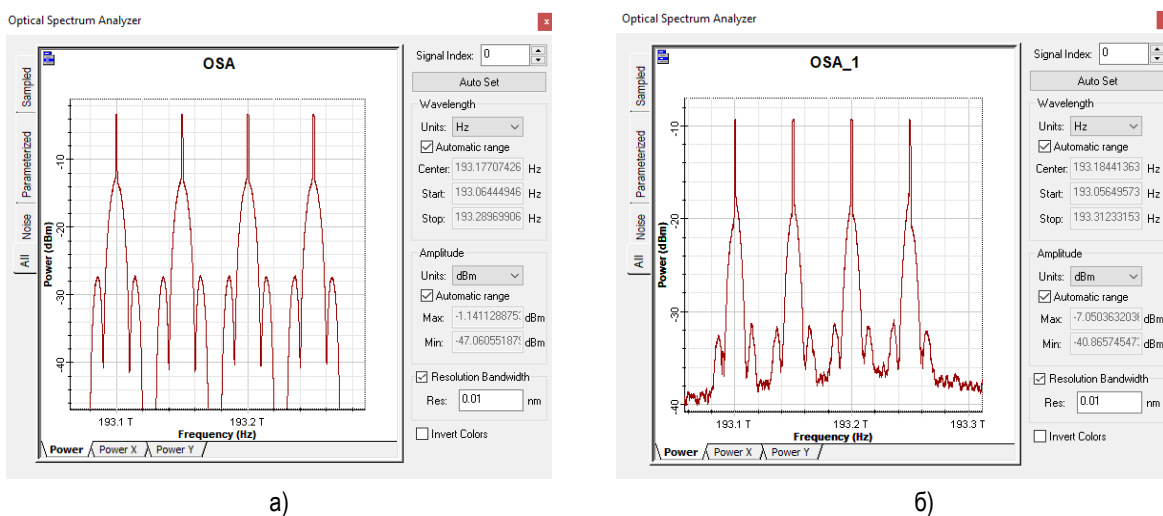
Установленные параметры				Измеренные величины					
Кол-во пролетов, N	Код	ρ_{s_in} , дБм	$g_{поу}$, дБ	$OSNR_{in}$, дБ	ρ_{s_out} , дБм	ρ_{sm_out} , дБм (OSA)	ρ_{ϕ} , дБм	$OSNR_{out}$, дБ	Q-фактор
1	NRZ	1,0	18	42	-1,9	-11	-16	24	13
5	NRZ	1,0	18	42	2,9	-11	-17	16	7
1	NRZ	5,0	18	42	0,5	-7	-12	28	23
5	NRZ	5,0	18	42	3,9	-7	-12	21	13
10	NRZ	5,0	18	42	6,0	-7	-12	18	9
15	NRZ	5,0	18	42	7,6	-7	-12	16	7
15	NRZ	8,0	18	42	8,2	-4,5	-9	18,5	7,6
15	NRZ	10	18	42	8,7	-3	-7,2	17	4,7
5	NRZ	10	18	42	5,6	-3	-8	25	13
5	NRZ	13	18	42	7,5	-1	-5,2	27	10
1	RZ-66	5,0	18	37	0,5	-9	-12	26	28
5	RZ-66	5,0	18	37	3,9	-9	-12	19	13
10	RZ-66	5,0	18	37	6,1	-8	-12	17	10
15	RZ-66	5,0	18	37	7,6	-8	-12	15	9
15	RZ-66	10	18	37	8,7	-3	-8	15	11
15	RZ-66	13	18	37	10	-3	-5,7	6	7

Из таблицы видно, что ВОСС с ЭП и кодированием NRZ обеспечивает высокое качество связи $Q > 7$ на расстояниях, по крайней мере, до 1500 км (15 пролетов) при среднем уровне суммарного входного сигнала на входе в пролеты $\rho_{s_in} = 5$ дБм (3,16 мВт), что соответствует канальной мощности 0,8 мВт. С уменьшением входного сигнала до $\rho_{s_in} = 1$ дБм качество связи снижается, Q-фактор уменьшается при $\rho_{s_in} = 5$ дБм с 23 до 13 в однопролетной ВОСС при кодировании NRZ.

При этом кодировании и $\rho_{s_in} = 5$ дБм с увеличением количества пролетов N с 1 до 15 (общая длина ВОСС изменяется от 100 до 1500 км) Q-фактор и $OSNR_{out}$ постепенно уменьшаются. Q-фактор от 23 до 7, а $OSNR_{out}$ — от 28 до 16. Можно отметить, что с увеличением количества пролетов нарастает постоянный уровень усиленного спонтанного излучения (УСИ) на выходе ВОЛТ ρ_{s_out} от 0,5 до 7,6 дБм. В принципе он может дополнительно увеличивать уровень шума на выходе ФПУ за счет увеличения дробового шума и шумов, обусловленных биениями излучения сигнала и УСИ, а также биения между излучениями УСИ разных частот. Однако за счет фильтрующего действия демультиплексора УСИ эффективно подавляется до ФПУ. При этом уровень сигнала на входе ФПУ ρ_{ϕ} практически не зависит от количества пролетов.

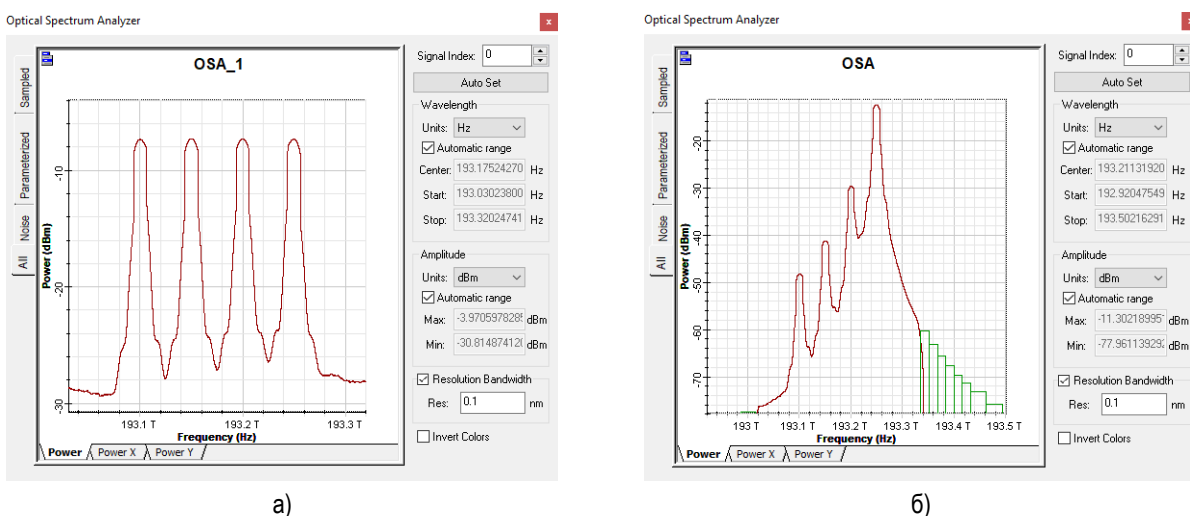
С увеличением входного сигнала при $N = 5$ (длина ВОСС 500 км) качество связи сначала растет с $Q = 7$ (при $p_{s_in} = 1$ дБм), достигает максимума $Q = 13$ (при $p_{s_in} = 10$ дБм) и начинает уменьшаться за счет нелинейных искажений до $Q = 10$ (при $p_{s_in} = 13$ дБм и уровне канального сигнала 5 мВт). Увеличение входного сигнала для ВОСС с 15 пролетами от $p_{s_in} = 5$ до 8 дБм приводит к некоторому увеличению Q -фактора с 7 до 7,6. Затем с увеличением p_{s_in} до 10 дБм Q -фактор уменьшается до 4,7 за счет нелинейных искажений. Таким образом, можно отметить, что оптимальный уровень входной мощности зависит от количества пролетов и общей длины ВОСС. Для пяти пролетов она составляет в нашем случае 10 дБм, а для 15 пролетов — 8 дБм.

Использование кодирования RZ-66 вместо NRZ улучшает качество связи. В однопролетной ВОСС при этом переходе Q -фактор возрастает с 23 до 28 ($p_{s_in} = 5$ дБм), при некотором снижении $OSNR_{out}$ с 28 до 26 дБ. В многопролетной ВОСС с $N = 15$ (1500 км) при $p_{s_in} = 5$ дБм использование кода RZ-66 повышает Q -фактор с 7 до 9, что очень существенно.



а) б)
Рис. 2. Спектрограммы сигнала на входе (а) и выходе (б) ВОЛТ

На рисунке 2 показаны спектрограммы оптического сигнала на входе и выходе 5-пролетного ВОЛТ общей длиной 500 км при разрешающей способности OSA $\Delta\lambda = 0,01$ нм. Видно, что амплитуда выходного сигнала меньше входного на 6 дБ. Это связано с тем, что коэффициент усиления предварительного ОУ (18 дБ) в последнем пролете на 6 дБ меньше коэффициента усиления линейного ОУ (24 дБ).



а) б)
Рис. 3. Спектрограмма сигнала на выходе: а) ВОЛТ, б) демультиплектора

На рисунке 3а показана спектрограмма сигнала на выходе ВОЛТ при разрешающей способности OSA $\Delta\lambda = 0,1$ нм, которую рекомендуется устанавливать при измерении $OSNR$ (в нашем случае

оно составило 21 дБ). На рисунке 3б показана спектрограмма оптического сигнала на выходе 4-го канала демультиплексора и на входе ФПУ. Видно, что демультиплексор подавляет сигналы соседних каналов не менее чем на 18 дБ.

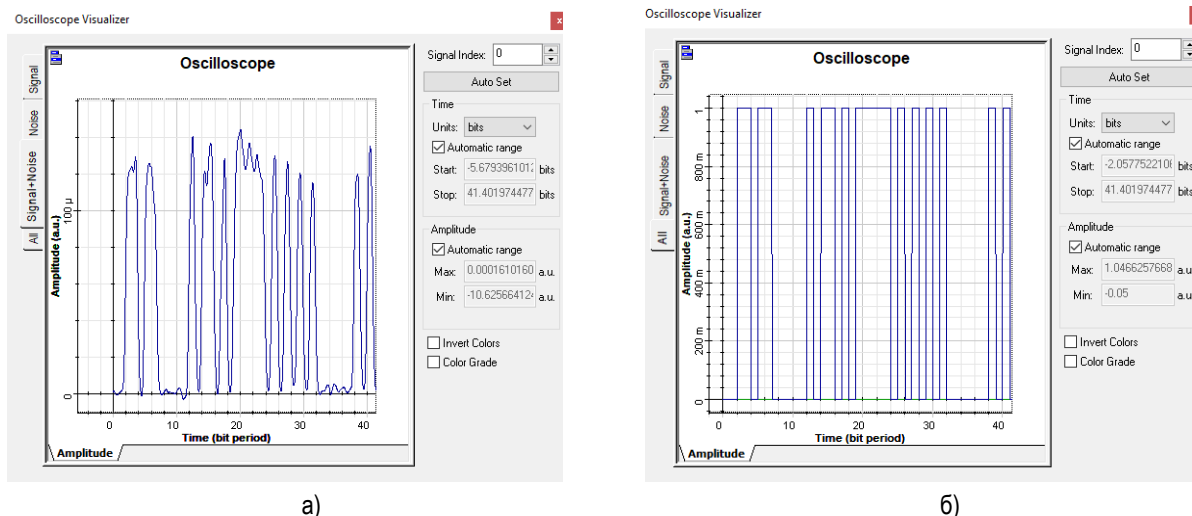


Рис. 4. Осциллограмма электрического сигнала на входе (а) и выходе (б) регенератора

На рисунке 4, где показаны электрические сигналы на входе и выходе регенератора ФПУ 4-го канала, видно, что входной сигнал сильно искажен.

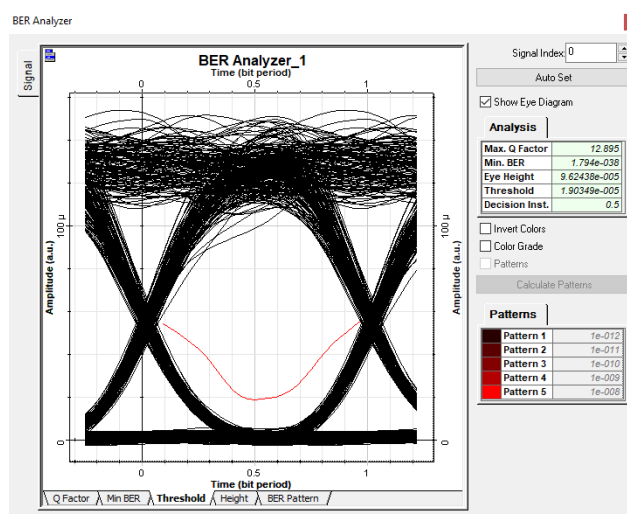


Рис. 5. Глаз-диаграмма сигнала в 4-м канале ВОСС Q = 12,9

На рисунке 5 показана глаз-диаграмма на экране анализатора ошибок. Видно, что шумы в электрическом сигнале проявляются сильнее при приеме логической «1» по сравнению с приемом логического «0». На экране глаз-диаграммы также видна зависимость уровня оптимального порога от момента принятия решения, который смещен в сторону уровня логического «0».

Моделирование ВОСС с КП

Схема четырехканальной ВОСС с КП (рисунок 6) во многом аналогична ВОСС с ЭП (рисунок 1): длины пролетов, параметры телекоммуникационных ОВ (ТК ОВ), количество каналов, их частоты и частотный интервал между ними одинаковы. ВОСС с КП содержит четыре оптических передатчика с четырехуровневой фазовой модуляцией (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK). В многопролетном ВОЛТ с КП отсутствуют компенсирующие ОВ (DCF), так как электронная компенсация ХД в ТК ОВ происходит в транспондере оконечного пункта.

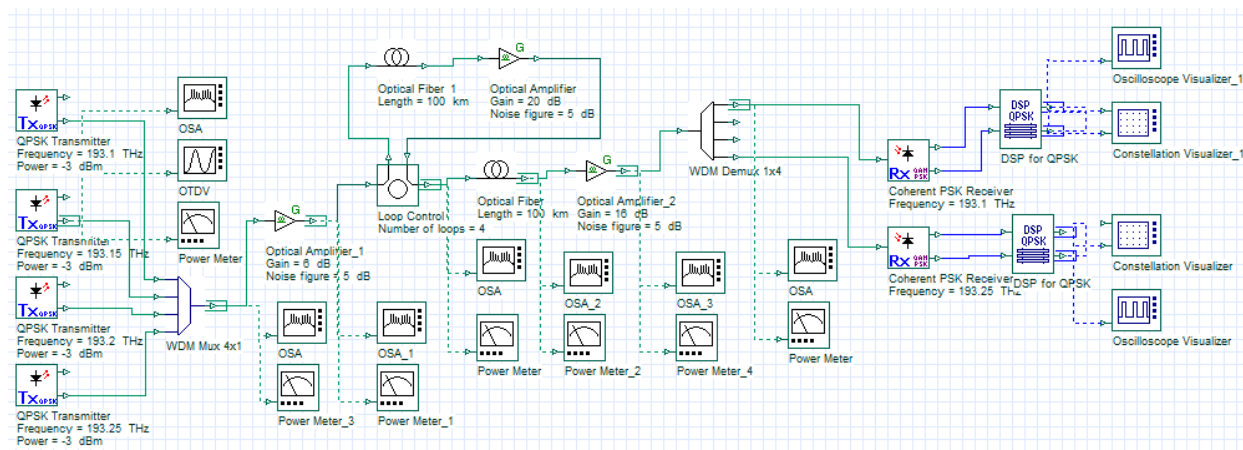


Рис. 6. Четырехканальная многопролетная ВОСС с КП и канальной скоростью 10 Гбит/с

ФПУ каждого канала ВОСС с КП содержит оптический гетеродин с уровнем мощности 3 дБм, частотой максимально близкой к несущей частоте канального сигнала, оптическую схему 90-градусного гибрида и четыре ФД, объединенные в два балансных фотоприемника (БФП). На выходах БФП формируются последовательности электрических сигналов, соответствующие синфазной и квадратурной составляющим принятого символа, которые сразу же поступают на аналого-цифровые преобразователи. Однако из-за различных искажений оптических сигналов в ВОЛТ, шумов ФПУ и УСИ необходима сложная цифровая обработка сигналов (ЦОС), которую выполняет быстродействующий цифровой сигнальный процессор (Digital Signal Processor, DSP). Для контроля качества связи в ВОСС с КП используются анализаторы сигнальных созвездий (Constellation Visualizer), которые не только позволяют наблюдать сигнальные созвездия выходных сигналов на выходе DSP, но и выдают расчетные значения BER и Q-фактора на основе анализа зарегистрированных созвездий.

Отметим, что при одинаковых битовых скоростях передачи $V_c = 10$ Гбит/с для ВОСС с ЭП и КП символьная скорость при КП в два раза меньше, чем при ЭП и составляет $V_{cs} = 5$ ГБод. Это позволяет уменьшить оптическую полосу пропускания мультиплексора и демультиплексора с $\Delta\nu_c = 30$ ГГц в ВОСС с ЭП до $\Delta\nu_c = 10$ ГГц в ВОСС с КП. Это дополнительно уменьшает шумы от УСИ.

Исходные данные и результаты исследований для ВОСС с КП помещены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты исследований ВОСС с КП

Установленные параметры				Измеренные величины					
Кол-во пролетов, N	ρ_{s_in} , дБм	a_{Dmux} , дБ	g_{loop} , дБ	$OSNR_{in}$, дБ	ρ_{s_out} , дБм	ρ_{sm_out} , дБм (OSA)	ρ_ϕ , дБм	$OSNR_{out}$, дБ	Q-фактор
1	1,0	5	16	42	-1,5	-9	-14	28	16
1	5,0	5	16	42	1,7	-5	-10	31	16
5	1,0	5	16	42	1,9	-9	-14	21	9
5	3,0	5	16	42	2,3	-7	-12	23	12
5	5,0	5	16	42	3,6	-5	-10	25	13
5	8,0	5	16	42	5,5	-2	-7	28	11
5	10,0	5	16	42	7	0	-5	30	9
5	13	5	16	42	9,5	3	-2,3	32	5
10	5,0	5	16	42	5,2	-5	-10	22	10
15	5,0	5	16	42	6,4	-5	-10	20	9

Из таблицы видно, что ВОСС с КП при среднем уровне суммарного входного сигнала на входе в пролеты $p_{s_in} = 5$ дБм и расстоянии до 1500 км обеспечивает более высокое качество связи ($Q > 9$), чем при ЭП. Однако можно отметить, что при КП Q-фактор даже при отличном качестве связи редко превышает величину 15, а при ЭП он может быть гораздо больше.

С уменьшением входного сигнала от $p_{s_in} = 5$ дБм до 1 дБм качество связи снижается, Q-фактор уменьшается с 13 до 9, а OSNR — с 25 до 21 дБ при длине ВОЛТ 500 км (пять пролетов). При $p_{s_in} = 5$ дБм с увеличением количества пролетов с 1 до 15 (общая длина ВОСС изменяется от 100 до 1500 км) Q-фактор и $OSNR_{out}$ постепенно уменьшаются: Q-фактор от 16 до 9, а OSNR от 31 до 20. Можно отметить, что с увеличением количества пролетов нарастает постоянный уровень УСИ на выходе ВОЛТ p_{s_out} от 1,7 до 6,4 дБм. При этом средний уровень сигнала на входе ФПУ практически не увеличивается.

На рисунке 7а показана зависимость уровня выходной оптической мощности передатчика от времени. Видно, что при фазовой модуляции QPSK и линейном кодировании NRZ уровень мощности составляет -11 дБ и не зависит от времени. Это характерно для ФМ и кодирования NRZ. Потери в модуляторе передатчика при этом составляют 8 дБ. На рисунке 7б показана спектрограмма сигнала передатчика 1-го канала. Видно, что спектрограмма передатчика с ФМ и кодом NRZ не содержит пика, как при AM (см. рисунок 2).

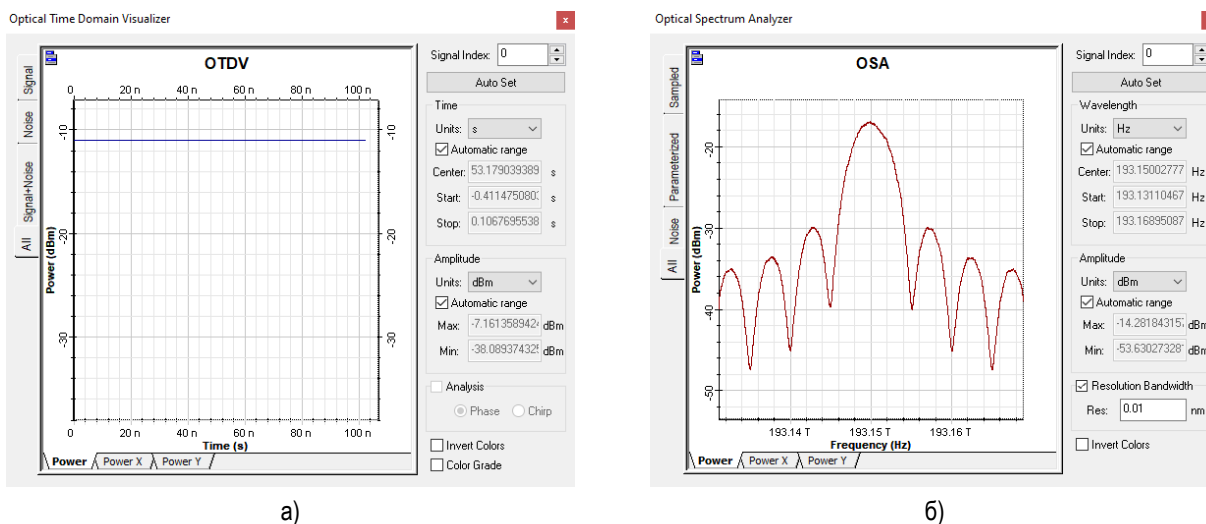


Рис. 7. Осциллограмма (а) и спектрограмма (б) сигнала на выходе передатчика

На рисунке 8 показаны спектрограммы оптического сигнала на входе и выходе пятипролетного ВОЛТ общей длиной 500 км при разрешающей способности OSA $\Delta\lambda = 0,01$ нм. Видно, что амплитуда выходного сигнала меньше входного на 4 дБ. Это связано с тем, что коэффициент усиления предварительного ОУ (16 дБ) в последнем пролете на 4 дБ меньше коэффициента усиления линейного ОУ (20 дБ).

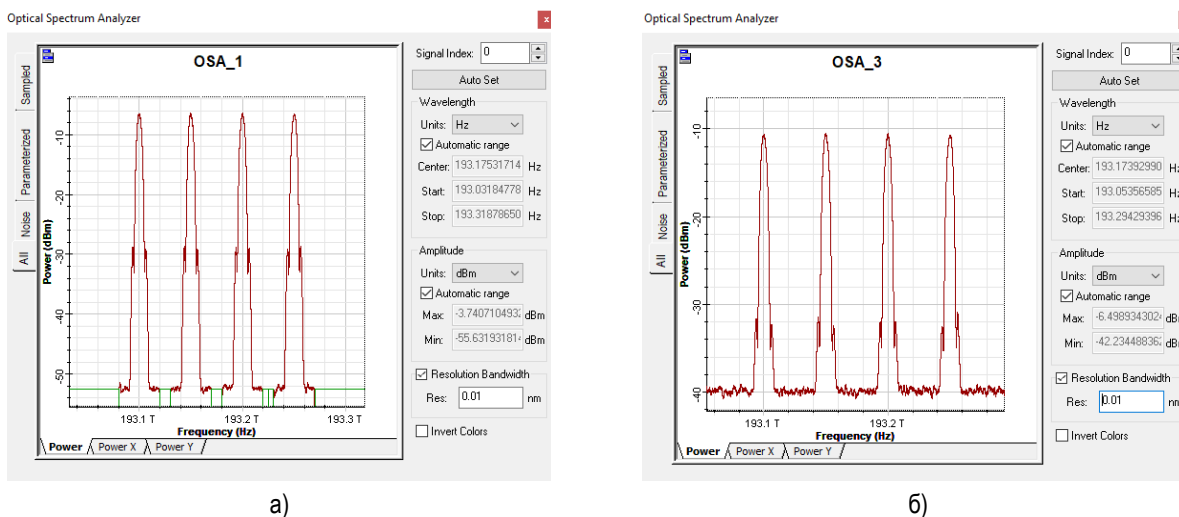


Рис. 8. Спектрограмма сигнала на входе (а) и выходе (б) ВОЛТ

На рисунке 9а показана спектрограмма сигнала на выходе ВОЛТ при разрешающей способности $OSA \Delta\lambda = 0,1$ нм. Оптическое отношение сигнала к шуму составило 25 дБ. На рисунке 9б показана спектрограмма оптического сигнала на выходе 4-го канала демультиплексора и на входе ФПУ. Видно, что демультиплексор полностью подавляет сигналы соседних каналов.

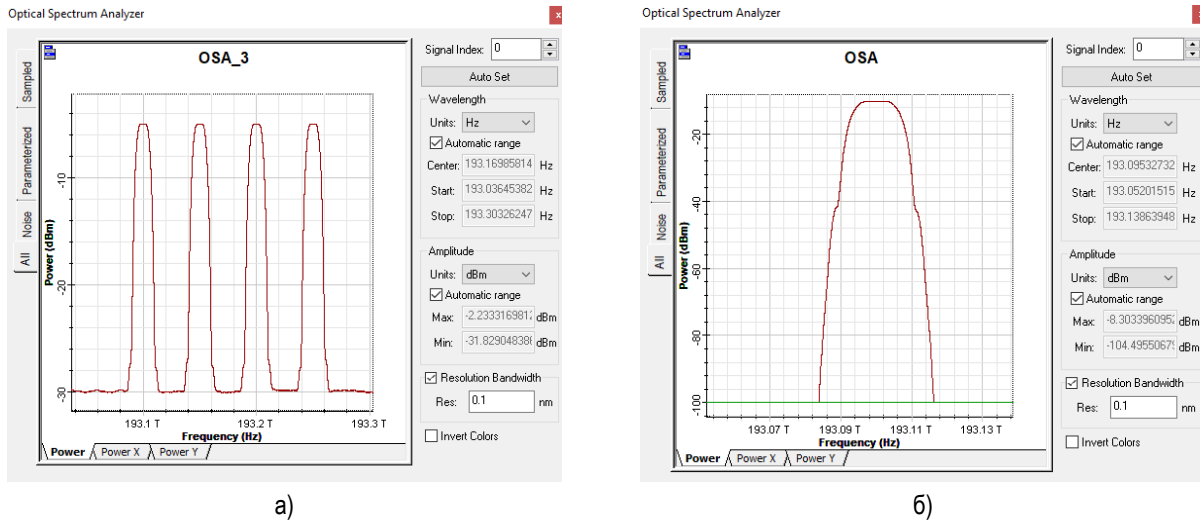


Рис. 9. Спектрограммы сигналов на выходах ВОЛТ (а) и демультиплексора (б)

С выхода каждого ФПУ два потока цифровых электрических сигналов, соответствующие синфазной и квадратурной составляющим данного символа, поступают на входы DSP, где подвергаются ЦОС. На рисунке 10а показан перечень подключенных алгоритмов в DSP моделируемой ВОСС с КП, который включает 11 наименований, в том числе компенсацию ХД (Dispersion Compensation) и нелинейных искажений (Nonlinear Compensation), а также восстановление несущей частоты и ее фазы и т. п. На рисунке 10б показан перечень параметров 1-го канала моделируемой многопролетной ВОСС с КП, включающий частоту несущей, параметры ОВ, общую длину ВОСС и пролетов и др. (в общей сложности 15 параметров).

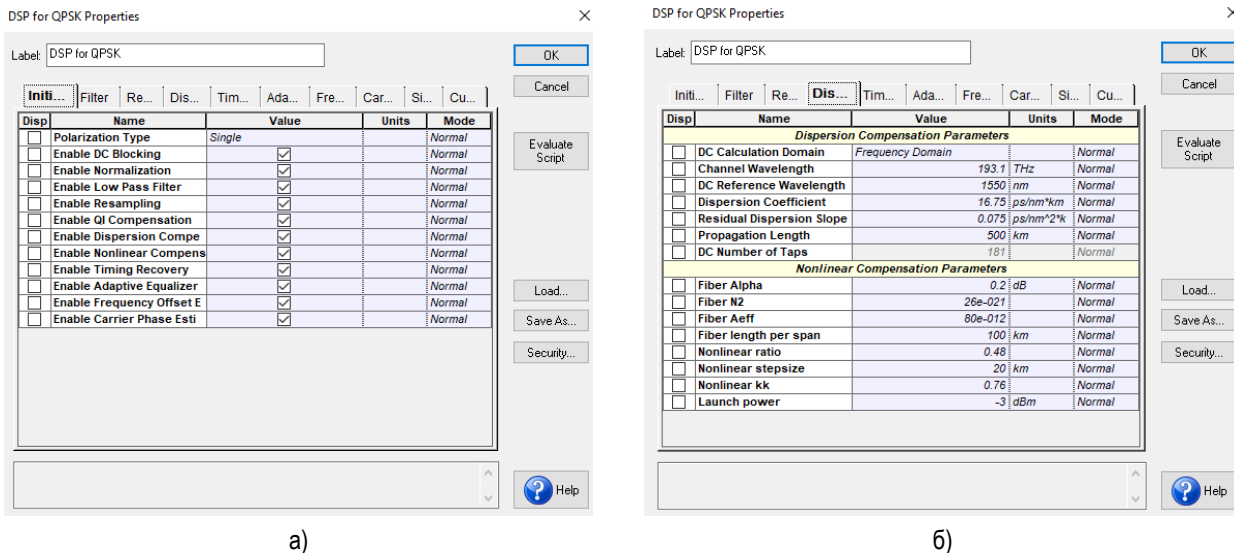


Рис. 10. Перечни: а) алгоритмов ЦОС в DSP, б) параметров ВОСС, необходимых для ЦОС в DSP

На рисунке 11а показано сигнальное созвездие для 1-го канала после ЦОС в DSP. Видно, что все четыре символа надежно разделены, а Q-фактор равен 12,6. На рисунке 11б показан синфазный электрический сигнал 1-го канала после цифро-аналогового преобразования сигнала из DSP. Он имеет вид бинарного сигнала с кодом NRZ, однако шумовая составляющая в нем присутствует. Такой же сигнал можно вывести из DSP для квадратурной составляющей.

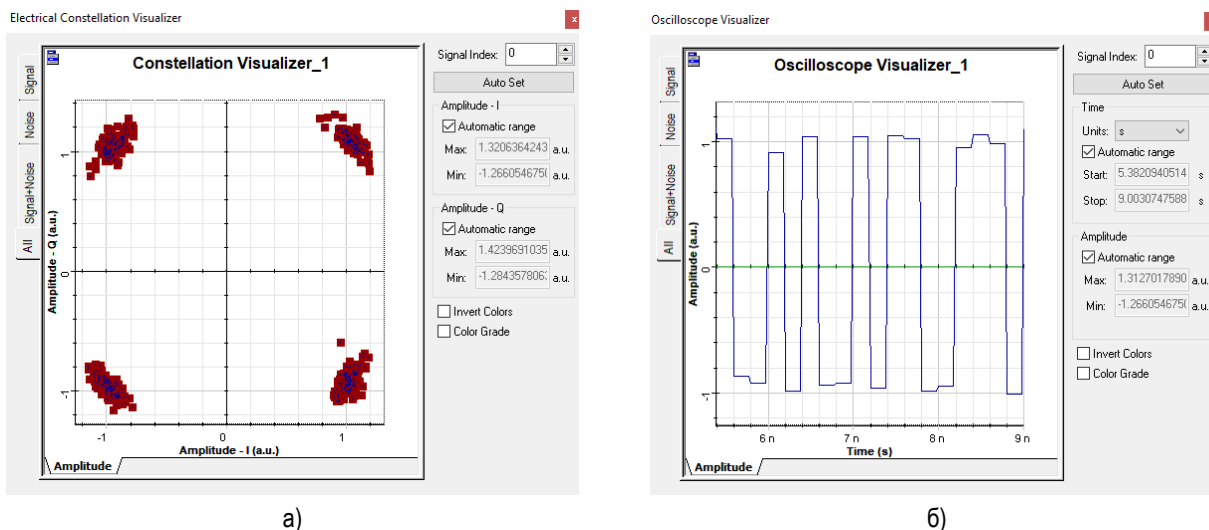


Рис. 11. Сигнальное созвездие (а) и синфазная составляющая сигнала с выхода DSP (б) для 1-го канала

Заключение

Основными критериями сравнения ВОСС с ЭП и КП являются: скорость и дальность передачи, количество каналов в одном ОВ, качество связи, которое характеризуется Q -фактором и $OSNR$, сложность и стоимость оборудования и его эксплуатации.

По предельным скоростям передачи ВОСС с КП существенно превосходят ВОСС с ЭП благодаря возможностям применения многоуровневой модуляции, повышению символьной скорости и более высокой чувствительности ФПУ с КП.

По предельной дальности связи ВОСС с КП существенно превосходят ВОСС с ЭП благодаря более высокой чувствительности ФПУ с КП и исключению потерь в модулях для компенсации ХД.

По возможному количеству каналов в одном ОВ и по качеству связи КП и ЭП равноценны.

Однако ВОСС с КП значительно сложнее и дороже, как в производстве, так и в эксплуатации, чем ВОСС с ЭП.

Таким образом, в настоящее время и обозримом будущем вновь строящиеся и реконструируемые ВОСС могут использовать как КП, так и ЭП. Для более дешевых вариантов построения ВОСС с ограничениями по скорости и дальности вполне пригодны ВОСС с ЭП. Для ВОСС с предельно большими скоростями и расстояниями необходимо использовать более дорогие решения, т. е. ВОСС с КП.

Литература

1. Трещиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM-системы. М.: Техносфера, 2021. 420 с.
2. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Дюбов А. С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приема цифровых информационных оптических сигналов. Часть 1. Энергетический прием // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 12–20. EDN: ZIWOIH
3. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Дюбов А. С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приема цифровых информационных оптических сигналов. Часть 2. Когерентный прием // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 21–28. EDN: YMIHMY
4. Наний О. Е., Трещиков В. Н., Убайдуллаев Р. Р. Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. № 9. С. 13–19. EDN: VNVUUJ
5. OptiSystem. Tutorials. Vol. 1: Optical Communication System Design Software. Version 14. Ottawa: OptiWave, 2015. 489 p.

Статья поступила 28 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 09 декабря 2024 г.
Принята к публикации 13 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Глаголев Сергей Федорович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: glagolev.sergey@sut.ru

Какусилумезо Сандру Эдуарду — студент 1-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: Kakusilumezo.se@sut.ru

Агоштињу Пенаш Созинью — студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Comparative Study of Multi-channel Multi-span Fiber-optic Communication Systems with Energy and Coherent Reception

S. Glagolev, S. Kakusilumezo, P. Agostinho

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Statement of the problem. Currently, transport and backbone communication networks use multi-channel multi-span fiber-optic communication systems with energy and coherent reception of digital optical signals. They all use dense wave-domain multiplexing and linear optical amplifiers in each hop. **The purpose** of the work is to distinguish between the areas of application of fiber-optic communication systems with energy and coherent reception. For this purpose, a comprehensive comparative study of multi-hop fiber-optic communication systems with a speed of 10 Gbit/s with energy and coherent reception was carried out, using simulation modeling of the processes of generation, amplification, transmission, reception and processing of digital optical signals in modern fiber-optic communication systems. **The novelty** of the work lies in the proposed modeling schemes and methods for their research. The novelty of the work lies in the proposed modeling schemes and methods for their research. **Results:** objective criteria for comparing fiber-optic communication systems with energy and coherent reception were obtained, areas of their use in communication networks were determined. **Practical significance:** the developed modeling schemes can be used in the design of fiber-optic communication systems; they will be used to create laboratory work for students.

Key words: dense multiplexing in the wave domain, energy and coherent reception, threshold sensitivity, optical signal-to-noise ratio, Q-factor

Information about Authors

Glagolev Sergey — Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: glagolev.sergey@sut.ru

Kakusilumezo Sandru — a 1st Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: Kakusilumezo.se@sut.ru

Penash Agostinho — 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications).