

Научная статья

УДК 621.39, 530.182

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-47-56



Квазисолитонный режим в многопролетной волоконно-оптической системе связи с применением оптических усилителей

Сергей Федорович Глаголев, Glagolev.Sergey@sut.ru

Сергей Эдуардович Доценко, Dotsenko.Sergey@sut.ru

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

Аннотация: В работе рассмотрен метод поддержания квазисолитонного режима в многопролетной волоконно-оптической системе связи с использованием дискретных эрбиевых оптических усилителей, а также рамановских усилителей с распределенным усилением со встречной и двунаправленной накачкой. Для моделирования квазисолитонных волоконно-оптических систем связи использовались программы OptiSystem 19. Результаты моделирования сопоставлены с теоретическими данными, продемонстрированы преимущества волоконно-оптических систем связи с усилителями Рамана и двунаправленной накачкой.

Ключевые слова: солитон, квазисолитонный режим, волоконно-оптическая система связи, эрбиевый оптический усилитель, оптический усилитель Рамана, встречная и двунаправленная накачка, OptiSystem

Ссылка для цитирования: Глаголев С.Ф. Доценко С.Э. Квазисолитонный режим в многопролетной волоконно-оптической системе связи с применением оптических усилителей // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 47–56. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-47-56

Quasi-Soliton Mode in a Multi-Span Fiber-Optic Communication System Using Optical Amplifiers

Sergey Glagolev, Glagolev.Sergey@sut.ru

Sergey Dotsenko, Dotsenko.Sergey@sut.ru

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

Abstract: The paper considers a method for maintaining a quasi-soliton mode in a multi-span fiber-optic communication system using discrete Erbium optical amplifiers, as well as Raman amplifiers with distributed amplification with counter and bidirectional pumping. The OptiSystem 19 and OptiPerformer 19 programs were used to model quasi-soliton fiber-optic communication systems. The simulation results are compared with theoretical data, and the advantages of a fiber-optic communication system with a Raman amplifier and bidirectional pumping are demonstrated.

Keywords: soliton, quasi-soliton mode, Raman optical amplifier, OptiSystem 19, OptiPerformer 19

For citation: Glagolev S., Dotsenko S. Quasi-Soliton Mode in a Multi-Span Fiber-Optic Communication System Using Optical Amplifiers. *Proc. of Telecom. Universities.* 2023;9(2):47–56. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-47-56

Введение

Данная статья продолжает работы авторов [1, 2], которые посвящены применению дискретных оптических усилителей (ОУ) на основе эрбиевого оптического волокна (EDFA, аббр. от англ. Erbium Doped Fiber Amplifier) и распределенных усилителей Рамана (РА, аббр. от англ. Raman Amplifier) для поддержания квазисолитонного режима распространения сигналов в многопролетных волоконно-оптических системах связи (ВОСС). Кратко резюмируем полученные ранее результаты.

В одномодовом оптическом волокне (ОМОВ) без потерь могут распространяться, не меняя пиковой мощности P_m (ПМ) и полуширины T_0 , оптические импульсы, имеющие форму гиперболического секанса $P(t) = P_m \operatorname{sech}(t/T_0)$. Такие импульсы называют фундаментальными солитонами или импульсами секансной формы. В реальном ОМОВ с потерями фундаментальные солитоны существовать не могут, так как ПМ оптических импульсов с увеличением расстояния уменьшается и ее становится недостаточно для поддержания солитонного режима, импульсы затухают и расширяются. Разбив волоконно-оптический линейный тракт (ВОЛТ) на несколько участков (пролетов), можно, используя оптическое усиление, добиться в каждом пролете многопролетной ВОСС поддержания с некоторой погрешностью средней ПМ и длительности секансных импульсов (квазисолитонов). Пролеты в таком ВОЛТ называют прозрачными, т.к. ПМ на входе и выходе пролетов одинаковы. Этот метод поддержания квазисолитонного режима в литературе называют «управление затуханием» [1–5].

В статье приводятся результаты исследований, необходимых для оптимального выбора длины L_{np} и количества пролетов N в многопролетной квазисолитонной ВОСС определенной длины $L = NL_{np}$.

Напомним, что фундаментальный солитон может существовать только в ОМОВ без потерь и с аномальной дисперсией при полной компенсации хроматической дисперсии (ХД) в результате действия нелинейной фазовой самомодуляции (ФСМ). ХД характеризуется величиной β_2 дисперсии групповых скоростей (ДГС), а ФСМ – коэффициентом нелинейности γ . Это возможно только при определенном соотношении ПМ фундаментального солитона $P_{\Phi c}$ и его полуширины T_0 , которая однозначно связана с длительностью секансного импульса t_u на уровне половины амплитуды [1–5]:

$$P_{\Phi c} = |\beta_2| / (\gamma \cdot T_0^2) \approx 3,11 \cdot |\beta_2| / (\gamma \cdot t_u^2). \quad (1)$$

Многопролетная квазисолитонная ВОСС с дискретными ОУ EDFA

Схема многопролетной ВОСС с дискретными ОУ (рисунок 1) содержит два конечных пункта с

транспондерами TP1 и TP2, $N + 1$ пролетов длиной L_{np} и N линейных ОУ, которые расположены в усилительных пунктах (УП).

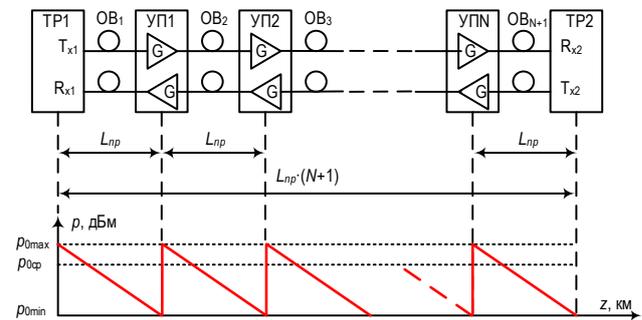


Рис. 1. Схема линейного тракта ВОСС с дискретными ОУ

Fig. 1. Diagram of the Linear Path of a Fiber-Optic Communication System with Discrete Optical Amplifiers

Приведем параметры, использованные для расчета и моделирования квазисолитонной ВОСС: скорость передачи – $B = 10$ Гбит/с; длина волны – $\lambda = 1550$ нм; длительность секансного импульса на уровне половины амплитуды – $t_u = 0,2$ бит (20 пс). Параметры ОВ DSF [6]: коэффициент затухания – $\alpha = 0,2$ дБ/км (0,046 Нп/км) на длине волны $\lambda = 1550$ нм; коэффициент ХД – $D_x = 1$ пс/(км·нм); ДГС – $\beta_2 = -1,275$ пс/нм²; крутизна дисперсионной характеристики – $S_x = 0,085$ пс/нм²/км; эффективная площадь модового поля – $A_{ef} = 41$ мкм²; нелинейный показатель преломления – $n_2 = 26 \cdot 10^{-21}$ м²/Вт; коэффициент нелинейности – $\gamma = 2,57$ 1/(Вт·км).

Проведем расчеты в соответствии с [1, 2]: канонической полуширины секансного импульса – $T_0 = t_u / 1,763 = 11,34$ пс, мощности, необходимой для поддержания солитонного режима в ОВ без потерь по уравнению (1) $P_{\Phi c} = -\beta_2 / (\gamma \cdot T_0^2) = 3,9$ мВт и дисперсионной длины $L_D = T_0^2 / (-\beta_2) = 100$ км.

Схема имитационного моделирования многопролетной квазисолитонной ВОСС, созданная в программе OptiSystem 19 [7] (рисунок 2), включает оптический передатчик с амплитудной модуляцией и импульсами секансной формы для передачи логических «1», ВОЛТ с любым количеством одинаковых пролетов, оптический полосовой фильтр и фотоприемное устройство (Rx). Один прозрачный пролет содержит ОВ длиной L_{np} с затуханием $a_{np} = \alpha L_{np}$ и линейный оптический усилитель EDFA с усилением $G = a_{np}$.

Для контроля оптических и электрических сигналов в схеме (см. рисунок 2) используются оптические измерители мощности (Optical Power Meter), осциллографы (Optical Time Domain Visualizer) и спектроанализаторы (Optical Spectrum Analyzer), электрические осциллографы (Oscilloscope Visualizer) и анализатор ошибок (BER Analyzer).

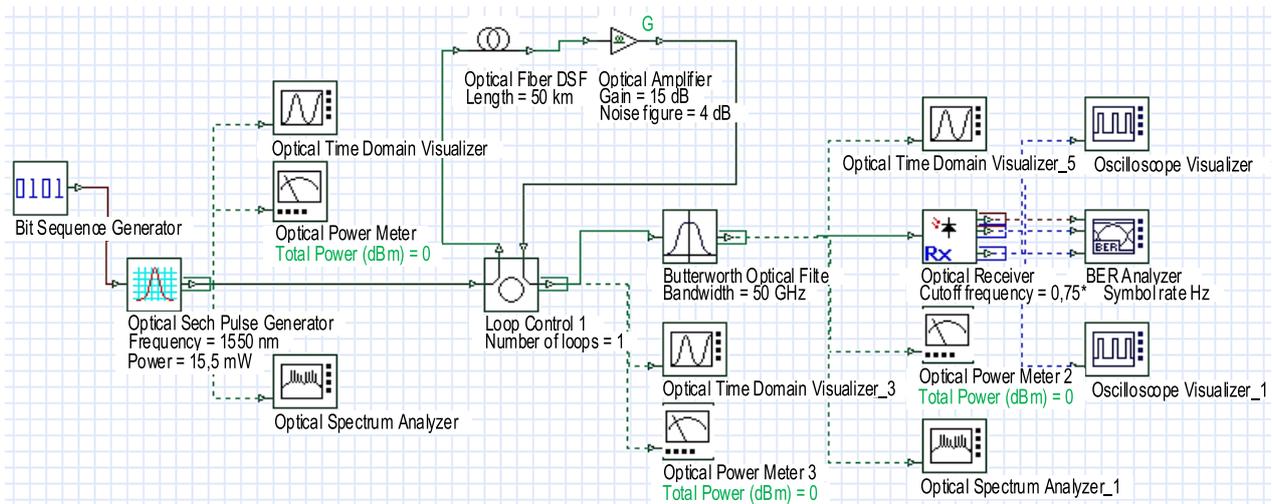


Рис. 2. Схема моделирования многопролетной квазисолитонной ВОСС с дискретными ОУ

Fig. 2. Simulation Scheme of a Multi-Span Quasi-Soliton Fiber-Optic Communication System with Discrete Optical Amplifiers

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов и имитационного моделирования для ВОСС с дискретными линейными ОУ

TABLE 1. Results of Calculations and Measurements for a Fiber-Optic Communication System with Discrete Linear Optical Amplifiers

Установленные и расчетные величины							Результаты имитационного моделирования		
Количество пролетов	Длина ОМОВ, км	Эффективная длина ОМОВ, км	Коэффициент усиления ОУ, дБ	Расчетная входная ПМ, мВт	Длительный входной импульс, пс	Установка входной ПМ, мВт	Выходная ПМ, мВт	Длительность выходного импульса, пс	Q фактор
1	25	14,86	5	6,56	20	7,5	7,6	20	315
2	50	14,86	5	6,56	20	7,5	7,6	20	252
4	100	14,86	5	6,56	20	7,5	7,7	20	200
8	200	14,86	5	6,56	20	7,5	7,7	20	144
12	300	14,86	5	6,56	20	7,5	7,8	20	127
20	500	14,86	5	6,56	20	7,5	7,8	19,5	95
1	50	19,56	10	9,97	20	11	11,4	19,5	247
2	100	19,56	10	9,97	20	11	11,4	20	209
4	200	19,56	10	9,97	20	11	11,2	20	144
8	400	19,56	10	9,97	20	11	10,8	20	106
10	500	19,56	10	9,97	20	11	10,6	20,5	95
1	75	21,0	15	13,9	20	15,5	16,2	20	195
2	150	21,0	15	13,9	20	15,5	16	20	147
4	300	21,0	15	13,9	20	15,5	15,3-16	18-21	102
6	450	21,0	15	13,9	20	15,5	14-14,4	22-23	78
1	100	21,5	20	18,1	20	22	23	20	140
2	200	21,5	20	18,1	20	22	23	20	94
3	300	21,5	20	18,1	20	22	21,8-23,0	19,8-20,8	75
4	400	21,5	20	18,1	20	22	18,4-20,6	22-26	64

Исследования проводились для четырех длин пролетов 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 L_D , (25, 50, 75 и 100 км). Для каждой L_{np} рассчитывалась эффективная длина ОМОВ $L_{ef} = [1 - \exp(-\alpha \cdot L)]/\alpha$ (α в Нп/км), ПМ на входе пролета $P_{Om} = P_{Фс} \cdot L_{np}/L_{ef}$ и коэффициент усиления $G = \alpha \cdot L_{np}$. Результаты расчетов и измерений приведены в таблице 1, а формы импульсов на выходе ВОСС на рисунке 3.

Из таблицы 1 и рисунка 3 следует, что при длинах пролета 0,25 и 0,5 L_D и общей длине до 500 км квазисолитонный режим сохраняется, джиттер отсутствует. При этом длительность секансного импульса и его амплитуда при изменении количества пролетов сохраняются в пределах 2,5 и 4 %, соответственно.

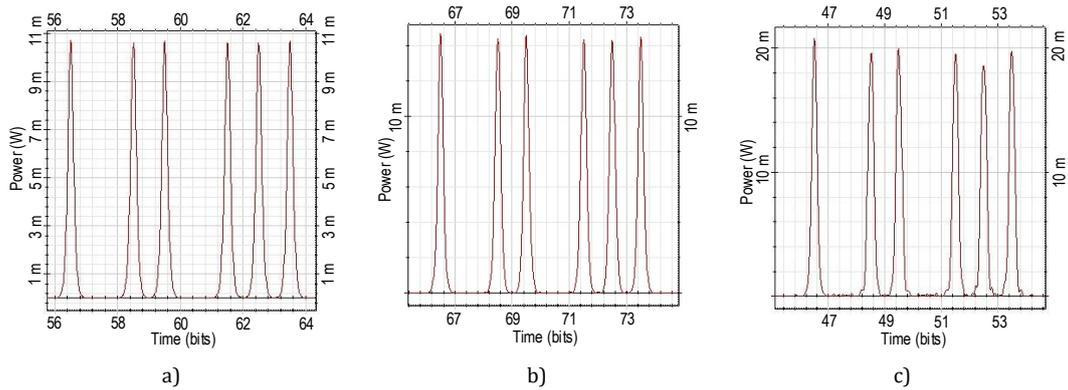


Рис. 3. Форма импульсов на выходах многопролетных квазисолитонных ВОСС: длина 50 км × 10 = 500 км (а); 75 км × 6 = 450 км (б); 100 км × 4 = 400 км (с)

Fig. 3. The Shape of Pulses at the Outputs of Multi-Span Quasi-Soliton Fiber-Optic Communication Systems: Length 50 km × 10 = 500 km (a); 75 km × 6 = 450 km (b); 100 km × 4 = 400 km (c)

При длине пролета 0,75 и 1,0 L_D и общей длине до 200 км квазисолитонный режим сохраняется, джиттер отсутствует. После 300 км наблюдается значительный джиттер, который приводит к колебаниям ПМ и длительности импульсов от импульса к импульсу в пределах 5 %.

Расчетные значения входных ПМ для поддержания квазисолитонного режима оказались недостаточными и реальные мощности (см. таблицу 1) были больше в 1,1–1,2 раза.

Многопролетная ВОСС с РА и встречной накачкой

Рассмотрим схему (рисунок 4) многопролетной ВОСС с РА, которые также называют ОУ вынужденного комбинационного рассеяния (ОУ ВКР) со встречной накачкой [8–10]. В оконечных пунктах ВОСС находятся транспондеры ТР1, ТР2. Для поддержания квазисолитонного режима в многопролетной ВОСС, с выхода каждого пролета в ОМОВ через направленный ответвитель (НО) с технологией мультиплексирования в волновой области (WDM) подается навстречу сигналу непрерывное излучение от источника накачки (ИН).

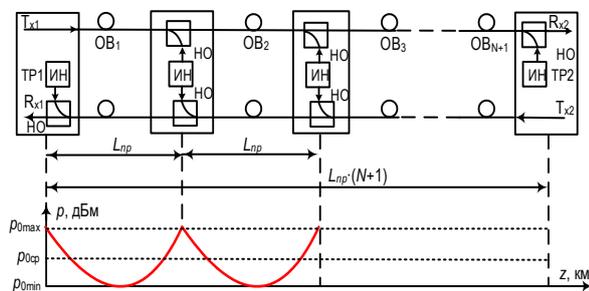


Рис. 4. Схема линейного тракта ВОСС с РА и встречной накачкой

Fig. 4. Diagram of the Linear Path of a Fiber-Optic Communication System with Counter-Pumping of the Raman

Рассмотрим процессы распространения секансных импульсов в одном пролете (на одном усилительном участке УУ) квазисолитонной ВОСС. За-

пишем дифференциальное уравнение для изменений ПМ $P_m(z)$ на малом участке dz в ОВ с усиливательной способностью $g(z)$ и коэффициентом затухания α [1–5]:

$$\frac{dP_m(z)}{dz} = [g(z) - \alpha] \cdot P_m(z). \tag{2}$$

На УУ длиной L_{np} усиливательная способность $g(z)$ зависит от z и определяется уровнем накачки в этой точке. В конце УУ при $z = L_{np}$ усиливательная способность $g(z) = g_0$ и уровень мощности накачки максимальны. При $g(z) < \alpha$, ПМ на участке dz уменьшается, а при $g(z) > \alpha$ – возрастает.

Из рисунка 4 видно, что в начале пролета уровень сигнала с увеличением расстояния убывает, в связи с тем, что мощность накачки мала и преобладает затухание $g(z) < \alpha$. С увеличением расстояния z мощность накачки постепенно возрастает и сигнал, пройдя минимум, начинает возрастать, т. к. $g(z) > \alpha$. В конце пролета сигнал приобретает первоначальный уровень. Средний пиковый уровень сигнала в пролете должен быть равен пиковому уровню фундаментального солитона $P_{Фс}$.

В каждой точке ОВ невозможно компенсировать потери, но можно скомпенсировать общее затухание на УУ:

$$\int_0^{L_A} g(z) \cdot dz = \alpha \cdot L_{np}. \tag{3}$$

Пренебрегая истощением накачки, запишем упрощенное выражение для усиливательной способности на УУ:

$$g(z) = g_0 \cdot \exp[-\alpha_p \cdot (L_{np} - z)], \tag{4}$$

где α_p – коэффициент затухания ОВ для накачки.

Решив (2) с учетом (3) и (4), запишем выражение (5) для расчета ПМ сигнала, которая обеспечивает необходимую усиливательную способность g_0 и

при которой ПМ на выходе пролета будет соответствовать входной $P_{0m} = P_m(L_{np})$ [1–5]:

$$P_m(z) = P_{0m} \cdot \exp \left\{ \alpha \cdot \left[L_{np} \cdot \left[\frac{\exp(\alpha_p \cdot z) - 1}{\exp(\alpha_p \cdot L_{np}) - 1} \right] - z \right] \right\} \quad (5)$$

$$= P_{0m} \cdot p(z),$$

где $p(z) = P_m(z)/P_{0m}$ – относительная ПМ в пролете.

В случае использования встречной накачки, ПМ входных импульсов P_{0m} должна быть больше мощности фундаментального солитона $P_{\Phi c}$ в ОМОВ без потерь [1–5]:

$$P_{0m} = P_{\Phi c}/p_0, p_0 = (1/L_{np}) \cdot \int_0^{L_A} p(z) \cdot dz, \quad (6)$$

где p_0 – среднее значение относительной ПМ излучения в пролете.

На рисунке 5а представлены зависимости нормированной относительной ПМ $p_n(z) = P_m(z)/P_{\Phi c}$ от относительного расстояния z/L_{np} в пределах одного пролета для встречной накачки. Для сравнения с методом поддержания квазисолитонного режи-

ма применением дискретных EDFA на рисунке 5б показаны зависимости, аналогичные показанным на рисунке 5а. Были определены по выражениям (6): среднее значение относительной ПМ в пролете p_0 и значение ПМ на входе пролета P_{0m} . Для расчетов использовалось значение мощности фундаментального солитона $P_{\Phi c} = 4,7$ мВт [2], которое было получено в результате моделирования ВОСС на том же ОМОВ, но без учета потерь. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов по выражению (6)

TABLE 2. Results of Calculations by Expression (6)

L_{np} , км	25	50	75	100	125
p_0	0,881	0,636	0,424	0,290	0,214
P_{0m} , мВт	5,38	7,40	11,09	16,19	22,0

На рисунке 6 приведена схема квазисолитонной ВОСС с двумя пролетами. В исследованиях использовались схемы и с большим количеством пролетов (до 20). УУ на схеме разделены оптическими изоляторами.

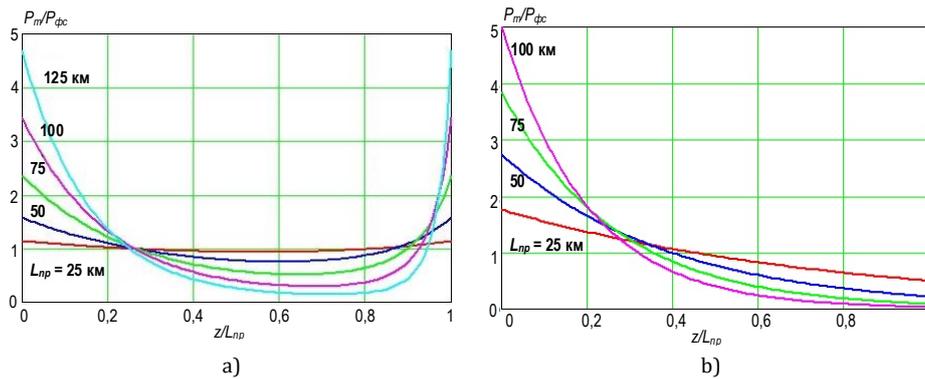


Рис. 5. Зависимости нормированной относительной мощности $p(z)$ от относительного расстояния z/L_{np} в пределах одного УУ: для РА с встречной накачкой (а); дискретных EDFA (б)

Fig. 5. The Dependences of the Normalized Relative Power $p(z)$ on the Relative Distance z/L_{np} within One Amplifying Section: a) для РА с встречной накачкой; б) для дискретных EDFA

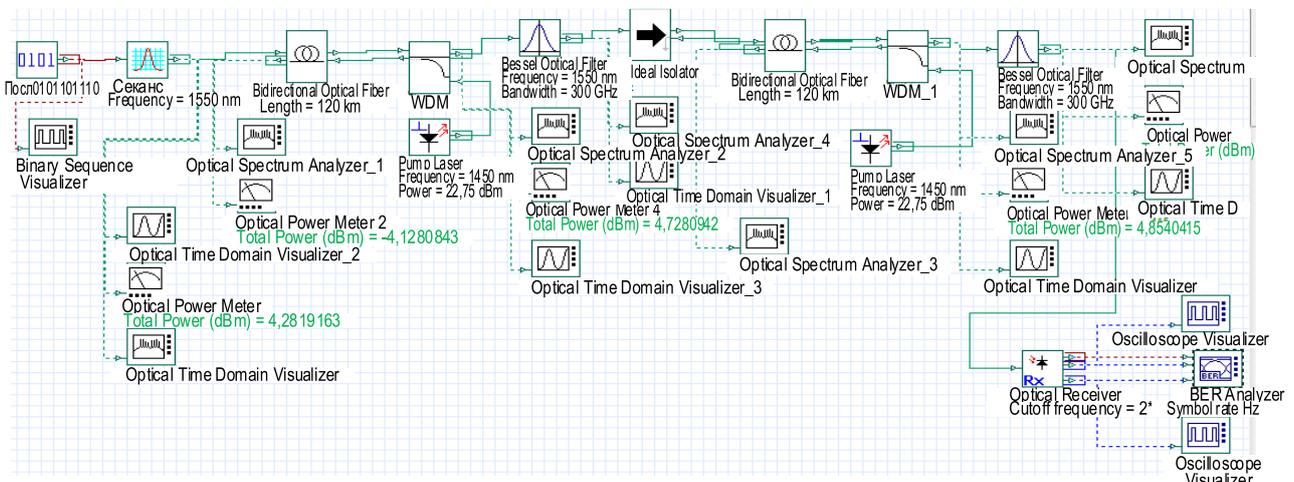


Рис. 6. Схема из двух последовательно соединенных УУ

Fig. 6. A Diagram of two series-connected amplifying sections

Для учета эффекта Рамана в схеме использовались более сложные двунаправленные модели ОМОВ, учитывающие процессы распространения излучения сигнала и накачки в ОМОВ, как вперед, так и назад. Мощность встречной накачки P_p подбиралась в процессе исследования по ПМ выход-

ного импульса P_{lm} , которая должна равняться входной $P_{lm} = P_{0m}$ (таблица 2).

При моделировании длина пролета варьировалась от 25 до 125 км, а их количество от 1 до 20. Общая длина линии достигала 525 км. Результаты исследований приведены на рисунке 7 и в таблице 3.

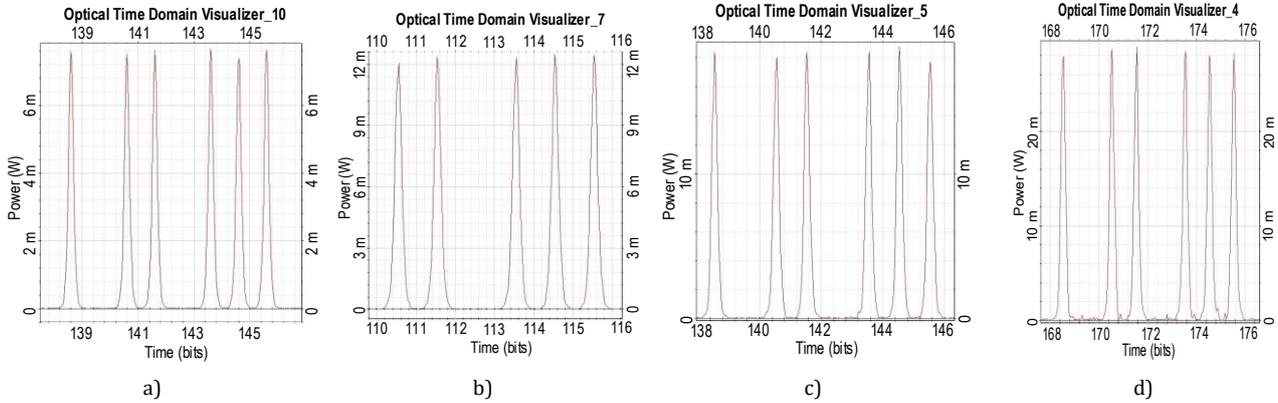


Рис. 7. Форма импульсов на выходах многопролетных квазисолитонных ВОСС: длина 50 км × 10 = 500 км (а); 75 км × 7 = 525 км (b); 100 км × 5 = 500 км (c); 125 км × 4 = 500 км (d)

Fig. 7. The Shape of Pulses at the Outputs of Multi-Span Quasi-Soliton Fiber-Optic Communication Systems: length 50 km × 10 = 500 km (a); 75 km × 7 = 525 km (b); 100 km × 5 = 500 km (c); 125 km × 4 = 500 km (d)

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчетов и имитационного моделирования для квазисолитонной ВОСС с РА и встречной накачкой
TABLE 3. Results of Calculations and Measurements for a Fiber-Optic Communication System with Counter-Pumping of Raman

Установленные и расчетные величины							Результаты имитационного моделирования		
Количество пролетов	Длина ОМОВ, км	Мощность лазера накачки, дБм	Коэф-т усиления ОУ, дБ	Расчетная входная ПМ, мВт	Длительность входного импульса, пс	Установка входной ПМ, мВт	Выходная ПМ, мВт	Длительность выходного импульса, пс	Q фактор
1	25	17,29	5	5,38	20	5,8	5,8	20	309
2	50	17,29	5	5,38	20	5,8	5,8	20	234
4	100	17,29	5	5,38	20	5,8	5,8	20	176
8	200	17,29	5	5,38	20	5,8	5,7–5,9	19,8–20	123
12	300	17,29	5	5,38	20	5,8	5,7–6	19,7–19,9	107
20	500	17,29	5	5,38	20	5,8	5,4–5,8	19,6–20	70
1	50	19,25	10	7,40	20	7,8	7,85	20	266
2	100	19,25	10	7,40	20	7,8	7,8	20	169
4	200	19,25	10	7,40	20	7,8	7,8–8	19,8–20,1	126
8	400	19,25	10	7,40	20	7,8	7,6–7,9	19,9–20,4	80
10	500	19,25	10	7,40	20	7,8	7,5–7,9	19,7–20,3	65
1	75	20,76	15	11,09	20	12,5	12,6	20	236
2	150	20,76	15	11,09	20	12,5	12,7	19,8	148
4	300	20,76	15	11,09	20	12,5	12,7–13	19,8–20	100
6	450	20,76	15	11,09	20	12,5	12–12,6	19,6–20,1	71
7	525	20,76	15	11,09	20	12,5	11,8–12,5	19,7–20,5	66
1	100	21,96	20	16,19	20	18	18	20,5	186
2	200	21,96	20	16,19	20	18	18	20,6	123
3	300	21,96	20	16,19	20	18	18–18,6	19,9–20,5	82
4	400	21,96	20	16,19	20	18	17,3–18,4	20,8–21,3	65
5	500	21,96	20	16,19	20	18	17,9–18,5	20,1–20,9	54
1	125	22,95	25	22	20	25	25–25,5	21,7–22	124
2	250	22,95	25	22	20	25	25–27	22–22,8	77
3	375	22,95	25	22	20	25	25–27	20,5–23,2	42
4	500	22,95	25	22	20	25	27–29	20,1–21,2	45

Из таблицы 3 и рисунке 7 следует, что при длинах пролета от 0,25 до 1,25 L_D и общей длине ВОЛТ до 525 км квазисолитонный режим при встречной накачке сохраняется. Значения длительности секансного импульса и его амплитуда при длинах пролета до L_D сохраняются в пределах 2,5 и 4 %, соответственно. Однако при общей длине более 200 км наблюдается джиттер, который приводит к колебаниям длительности и амплитуды от импульса к импульсу в пределах 4 и 6 %, соответственно.

Многопролетные ВОСС с RA и двунаправленной накачкой

Рассмотрим применение распределенных ОУ ВКР с накачкой (рисунок 8). В этом случае для усиления оптических импульсов непрерывное излучение накачки подается с двух сторон пролета. Обозначения на схеме и исходные данные для расчета и моделирования такие же, как для ВОСС с встречной накачкой.

Выражения (2) и (3) справедливы и для пролета ВОСС с двунаправленной накачкой. Для изменений $g(z)$ в пролете вместо (4) можно записать в виде:

$$g(z) = g_1 \cdot \exp(-\alpha_p z) + g_2 \exp[-\alpha_p (L_{np} - z)], \quad (7)$$

где g_1 и g_2 связаны с мощностями попутной и встречной накачек.

$$P_m(z) = P_{0m} \cdot \exp \left\{ \alpha L_{np} \left(\frac{\text{sh} \left[\alpha_p \left(z - \frac{L_{np}}{2} \right) \right] + \text{sh} \left(\frac{\alpha_p L_{np}}{2} \right)}{2 \cdot \text{sh} \left(\frac{\alpha_p L_{np}}{2} \right)} \right) - \alpha z \right\} = P_{0m} \cdot p(z). \quad (8)$$

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчетов по выражению (8)

TABLE 4. Results of calculations by expression (8)

L_{np} , км	25	50	75	100	125
p_0	1	1,003	1,027	1,106	1,285
P_{0m} , мВт	4,7	4,69	4,58	4,25	3,66

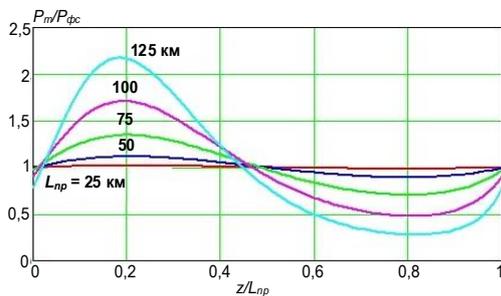


Рис. 9. Зависимости нормированной относительной мощности $p(z)$ от относительного расстояния z/L_{np} в пределах одного УУ

Fig. 9. The Dependences of the Normalized Relative Power $p(z)$ on the Relative Distance z/L_{np} within One Amplifying Section

Как видно из таблицы 4, при использовании двунаправленной накачки ПМ входных импульсов

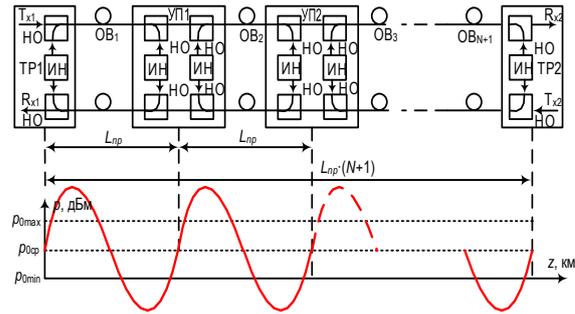


Рис. 8. Схема линейного тракта ВОСС с RA и двунаправленной накачкой

Fig. 8. Diagram of the Linear Path of a Fiber-Optic Communication System with Bidirectional Raman Pumping

Считая, что мощности встречной и попутной накачки равны, и решив уравнение (2) с учетом уравнения (7), получим зависимость мощности секансных импульсов в пролете для двунаправленной накачки [1–5]. Как и для встречной накачки, определим среднее значение нормализованной ПМ в пролете p_0 и значение ПМ на входе пролета P_{0m} с помощью выражения (8) для ВОСС с RA и двунаправленной накачки (таблица 4). На рисунке 9 представлены зависимости нормированной относительной ПМ $p_n(z) = P_m(z)/P_{Фс}$ от относительного расстояния z/L_{np} в пределах одного пролета для двунаправленной накачки.

P_{0m} при увеличении длины пролета становится даже меньше мощности $P_{Фс}$, необходимой для формирования фундаментального солитона.

Схема квазисолитонной ВОСС с двумя пролетами представлена на рисунке 10. При моделировании длина пролета варьировалась от 25 до 125 км, а их количество от 1 до 20. Общая длина ВОЛТ достигала 525 км. Результаты исследования приведены в таблице 5. В ней представлены результаты с использованием оптического фильтра Бесселя при длине УУ ≤ 50 км и без фильтра при длине пролета больше 50 км.

Из таблицы 5 и рисунка 11 следует, что при длинах пролета от 0,25 до 1,25 L_D и общей длине ВОЛС до 525 км квазисолитонный режим при двунаправленной накачке сохраняется. Значения длительности секансного импульса и его амплитуда при изменении количества пролетов имеют незначительные изменения. Однако при длине пролета 1,25 L_D наблюдается джиттер, который приводит к колебаниям длительности и амплитуды от импульса к импульсу в пределах 10 и 7,5 %, соответственно.

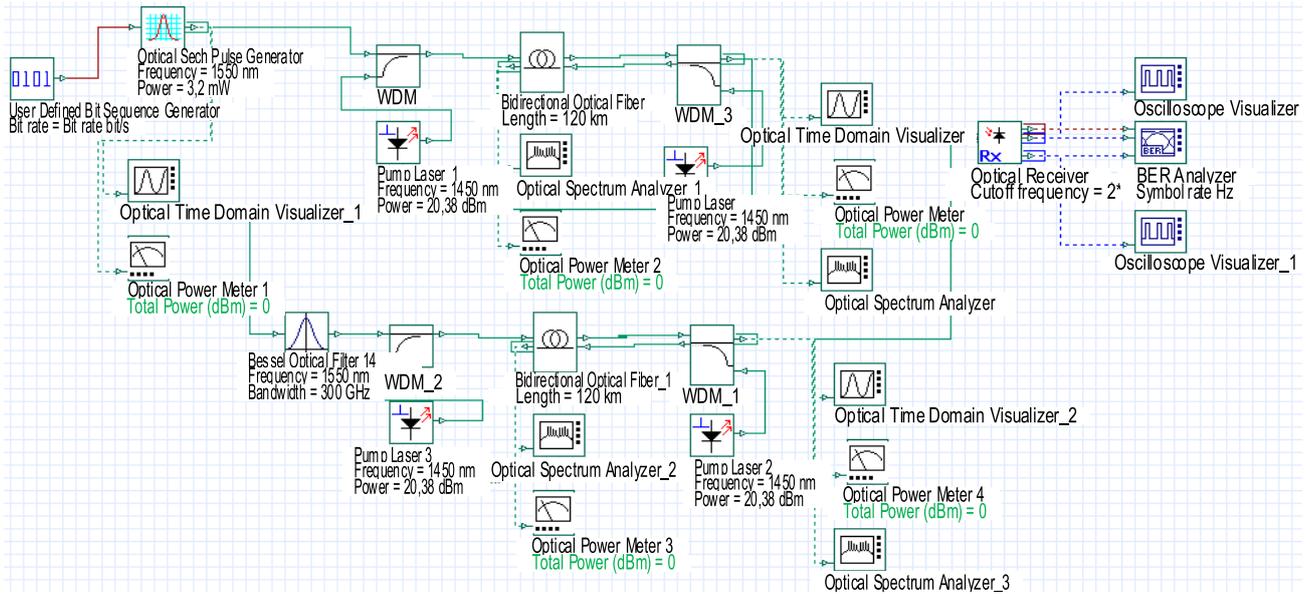


Рис. 10. Схема из двух последовательно соединенных пролетов

Fig. 10. A diagram of Two Series-Connected Amplifying Sections

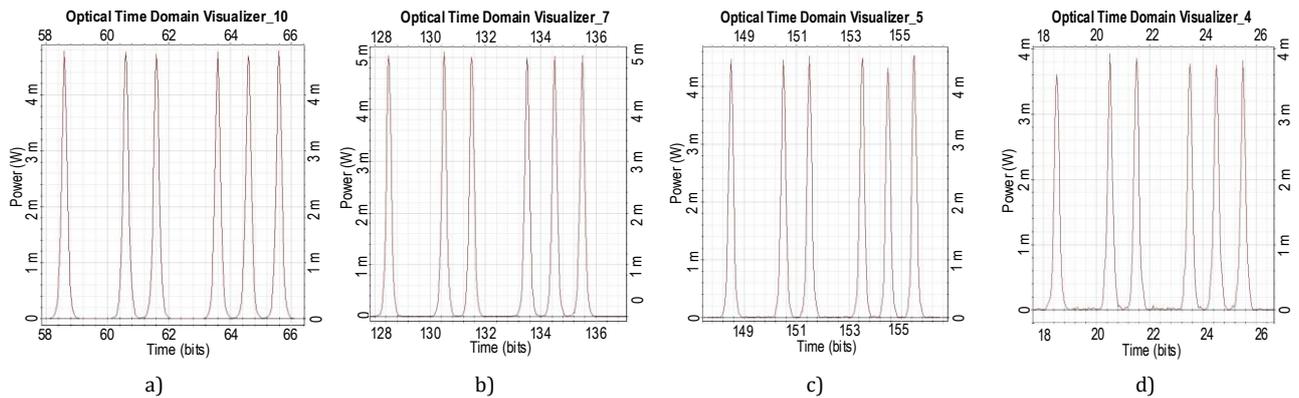


Рис. 11. Форма импульсов на выходах многопролетных квазисолитонных ВОСС: длина 50 км × 10 = 500 км (а); 75 км × 7 = 525 км (b); 100 км × 5 = 500 км (c); 125 км × 4 = 500 км (d)

Fig. 11. The Shape of Pulses at the Outputs of Multi-Span Quasi-Soliton Fiber-Optic Communication Systems: length 50 km × 10 = 500 km (a); 75 km × 7 = 525 km (b); 100 km × 5 = 500 km (c); 125 km × 4 = 500 km (d)

ТАБЛИЦА 5. Результаты расчетов и имитационного моделирования для ВОСС с РА и двунаправленной накачкой

TABLE 5. Results of Calculations and Measurements for a Fiber-Optic Communication System with Bidirectional Raman Pumping

Установленные и расчетные величины							Результаты имитационного моделирования		
Количество пролетов	Длина ОМОВ, км	Мощность лазеров накачки, дБм	Коэф-т усиления ОУ, дБ	Расчетная входная ПМ, мВт	Длительность входного импульса, пс	Установка входной ПМ, мВт	Выходная ПМ, мВт	Длительность выходного импульса, пс	Q фактор
1	25	14,31	5	4,7	20	4,7	4,7	20	304
2	50	14,31	5	4,7	20	4,7	4,65	20,3	249
4	100	14,31	5	4,7	20	4,7	4,65–4,7	20–20,1	200
8	200	14,31	5	4,7	20	4,7	4,6–4,7	20–20,3	129
12	300	14,31	5	4,7	20	4,7	4,7–4,9	19,5–20	96
20	500	14,31	5	4,7	20	4,7	4,7–5	19,6–20,4	65
1	50	16,24	10	4,69	20	4,7	4,75	20	241
2	100	16,24	10	4,69	20	4,7	4,7	20,1	191
4	200	16,24	10	4,69	20	4,7	4,65–4,8	20–20,2	133
8	400	16,24	10	4,69	20	4,7	4,7–4,8	19,9–20,2	82

Установленные и расчетные величины							Результаты имитационного моделирования		
Количество пролетов	Длина ОМОВ, км	Мощность лазеров накачки, дБм	Коеф-т усиления ОУ, дБ	Расчетная входная ПМ, мВт	Длительность входного импульса, пс	Установка входной ПМ, мВт	Выходная ПМ, мВт	Длительность выходного импульса, пс	Q фактор
10	500	16,24	10	4,69	20	4,7	4,7–4,9	19,8–20,1	69
1	75	17,71	15	4,58	20	4,7	4,7	20	200
2	150	17,71	15	4,58	20	4,7	4,7	20	159
4	300	17,71	15	4,58	20	4,7	4,75	20	98
6	450	17,71	15	4,58	20	4,7	4,7–4,9	19,7–20	77
7	525	17,71	15	4,58	20	4,7	5–5,1	19,6–20	61
1	100	18,92	20	4,25	20	4,5	4,6	20	162
2	200	18,92	20	4,25	20	4,5	4,5–4,6	19,7–20	126
3	300	18,92	20	4,25	20	4,5	4,5–4,7	19,7–20,1	92
4	400	18,92	20	4,25	20	4,5	4,4–4,6	19,8–20,6	76
5	500	18,92	20	4,25	20	4,5	4,3–4,6	19,6–20,5	63
1	125	19,88	25	3,66	20	4	4,1–4,2	20	150
2	250	19,88	25	3,66	20	4	4,0–4,1	20	89
3	375	19,88	25	3,66	20	4	3,8–4,0	20–21	70
4	500	19,88	25	3,66	20	4	3,7–4,0	20–22	56

Выводы

В статье исследованы способы поддержания квазисолитонного режима в многопролетных одноканальных ВОСС с дискретными ОУ, а также с RA со встречной и двунаправленной накачками. Все способы могут быть использованы в высокоскоростных ВОСС. Наиболее эффективным способом поддержания длительности и ПМ квазисолитонных импульсов на больших расстояниях является использование RA с двунаправленной накачкой. Это решение позволяет обеспечить максимальную длину пролета до 125 км при минимальных сигналах на входе пролетов с ПМ от 4 до 4,7 мВт практически равной или даже меньше, чем ПМ, необходимая для формирования фундаментальных солитонов в ОМОВ без потерь. Изменение длительности выходного импульса происходит в пределах от 19,5 до 22 пс. При использовании дискретных ОУ EDFA изменение длительности выходного импульса происходит в пределах от 18 до 26 пс, на входе пролетов использовались сигналы с ПМ от 7,5 до 22 мВт, значительно превосходящей ПМ, необходимую для формирования фундаментальных солитонов в ОМОВ без потерь. В таком случае необходимо использовать пролеты меньшей длины до 75 км и сокращать общую протяженность квазисолитонной ВОСС.

Промежуточное положение между рассмотренными способами поддержания квазисолитонного

режима в многопролетных ВОСС занимает использование RA со встречной накачкой. Длительность выходного импульса изменяется в пределах от 19,6 до 23,2 пс, на входе пролетов использовались сигналы с ПМ от 5,8 до 25 мВт, значительно превосходящей ПМ, необходимую для формирования фундаментальных солитонов в ОМОВ без потерь. В такой ВОЛТ пролеты не должны превышать длину 100 км.

Решение с использованием на ВОСС RA со встречной накачкой является более экономичным по сравнению с двунаправленной накачкой, т. к. позволяет использовать меньшее количество усилителей на каждом пролете, но значительно уступает в качестве связи. Значение Q фактора RA с двунаправленной накачкой в среднем на 5 % больше, чем при встречной накачке на длинах пролетов от 25 до 125 км и на 10 % больше, чем при дискретных ОУ EDFA с длиной пролета большей или равной 75 км. При построении ВОСС, где требуется максимальная длина пролетов и повышенное качество связи, т. е. большие значения Q фактора, целесообразно использовать RA с двунаправленной накачкой.

Разработанные схемы квазисолитонных ВОСС и методики их исследования могут быть использованы в учебном процессе для подготовки специалистов по волоконно-оптической связи.

Список источников

1. Андреева Е.И., Былина М.С., Глаголев С.Ф., Доценко С.Э., Чаймарданов П.А. Свойства временных оптических солитонов в оптических волокнах и возможность их использования в телекоммуникациях. Часть 4 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 15–24. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-15-24

2. Глаголев С.Ф., Доценко С. Э. Поддержание квазисолитонного режима в ВОСС с использованием усилителей Рамана // XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Россия, 15–16 февраля 2022). СПб: СПбГУТ, 2022. С. 343–348.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
4. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley, 2012. 626 p.
5. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: Физматлит, 2005. 648 с.
6. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.
7. OptiSystem User Guide and Reference Manual. Optical Communication System Design Software. Version 19. Optiwave Systems Inc. 2022.
8. Андреев В.А. Рамановские усилители на волоконно-оптических линиях передачи. М.: Ириас, 2008. 219 с.
9. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы. М.: Техносфера, 2021. 420 с.
10. Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи // Прикладная фотоника. 2014. Т. 1. № 1. С. 27–50.

References

1. Andreeva E, Bylina M, Glagolev S, Dotsenko S., Chaimardanov P. Properties of Temporary Optical Solitons in Optical Fibers and the Possibility of their Use in Telecommunications. Part 4. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(1):15–24. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-15-24
2. Glagolev S, Dotsenko S. Maintaining a Quasi-Soliton Mode in Fiber-Optic Communication System Using Raman Amplifiers. *Proceedings of the XIth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 15–16 February 2022, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2022. p.343–348. (in Russ.)
3. Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics*. Moscow: Mir Publ.; 1996. 323 p. (in Russ.)
4. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley; 2012. 626 p.
5. Kishvar Yu.S., Agrawal G.P. *Optical Solitons. From Fiber Light Guides to Photonic Crystals*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2005. 648 p (in Russ.)
6. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrvkov D.V. *Optical Fibers for Communication Lines*. Moscow: LESARart Publ.; 2003. 288 p. (in Russ.)
7. *OptiSystem User Guide and Reference Manual. Optical Communication System Design Software*. Version 19. Optiwave Systems Inc. 2022.
8. Andreev V.A. *Raman Amplifiers on Fiber-Optic Transmission Lines*. Moscow: Iriass Publ.; 2008. 219 p (in Russ.)
9. Listvin V.N., Treschikov N. *DWDM Systems*. Moscow: Technosphere Publ; 2021. 420 p. (in Russ.)
10. Leonov A.V., Nanii O.E., Treschikov V.N. Raman Amplifiers in Optical Communication Systems. *Applied Photonics*. 2014;1(1):27–50. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 01.04.2023; принята к публикации 21.04.2023.

The article was submitted 03.03.2023; approved after reviewing 01.04.2023; accepted for publication 21.04.2023.

Информация об авторах:

ГЛАГОЛЕВ
Сергей Федорович

кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-0664-9877>

ДОЦЕНКО
Сергей Эдуардович

инженер кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-0299-0469>