

Научная статья

УДК 621.39, 530.182

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-16-26>

Анализ методов управления дисперсией для поддержания квазисолитонного режима распространения импульсов в высокоскоростной волоконно-оптической системе связи

Мария Сергеевна Былина¹, Bylina.Maria@sut.ru
Сергей Федорович Глаголев¹, Glagolev.Sergey@sut.ru
Сергей Эдуардович Доценко²✉, dotsenko.sergei@ya.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, 196128, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. С каждым годом возрастает необходимость в увеличении пропускной способности и дальности передачи данных в волоконно-оптических системах связи. Исследование методов управления дисперсией является актуальным и способствует поддержанию квазисолитонного режима, что важно для обеспечения высокоскоростной и надежной передачи данных в современных телекоммуникационных сетях. Проведенное моделирование и расчеты параметров волоконно-оптической системы связи делает исследование практическим и прикладным, что позволяет инженерам и исследователям точно прогнозировать поведение системы и оптимизировать ее характеристики до внедрения в реальных сетях.

Постановка задачи: исследование процессов поддержания квазисолитонного режима в волокнах с уменьшающейся хроматической дисперсией и при чередовании волокон с разными знаками дисперсии, как с начальным чирпингом, так и без него.

Цель работы: разработка и анализ методов управления дисперсией для поддержания квазисолитонного режима распространения импульсов в одномодовом оптическом волокне.

Используемые методы: исследование процессов поддержания квазисолитонного режима проводилось с помощью методов математического и численного моделирования. Для апробации методов был проведен теоретический анализ и расчеты, а также разработаны схемы квазисолитонной волоконно-оптической системы связи и проведено имитационное моделирование. Анализ **результатов** показал эффективность предложенного метода, продемонстрировав работоспособность и устойчивость предложенных решений в условиях, близких к реальным.

Новизна: разработаны модели волоконно-оптических систем связи для поддержания квазисолитонного режима и методики их исследования, проведен анализ наиболее эффективных методов поддержания длительности и пиковой мощности квазисолитонных импульсов на больших расстояниях.

Практическая значимость: разработанные модели и методики их исследования могут быть использованы в учебном процессе факультета инфокоммуникационных сетей и систем СПбГУТ и при создании реальных волоконно-оптических систем связи.

Ключевые слова: одномодовое волокно с уменьшающейся хроматической дисперсией, дисперсия групповых скоростей, фундаментальный солитон, квазисолитонный режим, фазовая самомодуляция, чирпинг, дискретный оптический усилитель

Ссылка для цитирования: Былина М.С., Глаголев С.Ф., Доценко С.Э. Метод управления дисперсией для поддержания квазисолитонного режима распространения импульсов в высокоскоростной волоконно-оптической системе связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 16–26. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-16-26. EDN:KIGLSY

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-16-26>

Method for Controlling Dispersion in Order to Maintain a Quasi-Soliton Pulse Propagation Mode in High-Speed Fiber-Optic Communications System

 **Maria Sergeevna Bylina**¹, Bylina.Maria@sut.ru
 **Sergey Fedorovich Glagolev**¹, Glagolev.Sergey@sut.ru
 **Sergey Eduardovich Dotsenko**²✉, dotsenko.sergei@ya.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Gazprom transgaz Saint-Petersburg LLC,
St. Petersburg, 196128, Russian Federation

Annotation

Relevance: Every year, there is an increasing need to enhance the bandwidth and range of fiber-optic communication systems. The study of methods to control dispersion is relevant and helps maintain a quasi-soliton regime, which is essential for ensuring high-speed, reliable data transmission. Conducted modeling and calculations make this research practical and applicable. This will enable engineers to accurately predict the system's behavior and optimize its performance before implementing it in real-world networks.

Problem statement: Investigation of the processes of maintaining a quasi-soliton regime in fibers with decreasing chromatic dispersion and alternating fibers with different signs of chromatic dispersion, both with and without initial chirping.

Goal of the work: The development and analysis of techniques to control dispersion in order to maintain a quasi-soliton mode of light propagation in single-mode optical fibers.

Methods: The study of the processes of maintaining a quasi-soliton regime was carried out by mathematical and numerical modeling. To substantiate the methods, theoretical analysis and calculations were carried out and schemes for a quasi-soliton fiber-optic communication system were developed and modeling was carried out.

Result: The analysis of the results demonstrated the effectiveness of the proposed method and showed the efficiency and stability of the solutions in conditions that were close to real-world scenarios.

Novelty: Models for maintaining a quasi-soliton regime and methods for studying them have been developed. The most effective ways to preserve quasi-soliton pulses over long distances have been analyzed.

Practical significance: The developed models and research methods can be applied in the educational process and the development of real fiber-optic communication systems.

Keywords: single-mode fiber with decreasing chromatic dispersion, dispersion of group velocities, fundamental soliton, quasi-soliton mode, phase modulation, chirping, discrete optical amplifier

For citation: Bylina M.S., Glagolev S.F., Dotsenko S.E. Method for Controlling Dispersion in Order to Maintain a Quasi-Soliton Pulse Propagation Mode in High-Speed Fiber-Optic Communications System. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(4):16–26. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-16-26. EDN:KIGLSY

1. Поддержание квазисолитонного режима при использовании волокон с уменьшающейся хроматической дисперсией

Основной недостаток солитонных волоконно-оптических систем связи (ВОСС) с управлением затухания – ограничение длины усилительного участка (УУ) [1]. В 1987 г. была предложена схема

солитонной ВОСС, использующей дискретные оптические усилители (ОУ), которая позволяет увеличить расстояние L_A между усилителями. Эта схема предполагает использование специального одномодового оптического волокна (ОМ ОВ) – волокна с уменьшающейся дисперсией (ВУД), которое было разработано, изготовлено и исследовано

[2, 3]. В этих ОВ модуль отрицательной дисперсии групповых скоростей (ДГС) β_2 по утверждению авторов уменьшается с увеличением расстояния Z .

Рассмотрим процессы распространения по ВУД оптических импульсов, имеющих форму гиперболического секанса, которая характерна для фундаментальных солитонов.

Известно, что для поддержания формы фундаментального солитона в ОВ необходимо, чтобы его пиковая мощность P_m в каждом сечении ОМ ОВ удовлетворяла условию [2]:

$$P_m(Z) = \frac{|\beta_2|(Z)}{(\gamma(Z) \cdot T_0^2)} = \frac{A(Z)}{T_0^2} = P_m(0) \cdot \exp(-\alpha \cdot Z), \quad (1)$$

где γ – коэффициент нелинейности ОМ ОВ; T_0 – каноническая полуширина импульса, имеющего форму гиперболического секанса $\text{sech}(T/T_0)$ (далее секансного импульса); α – коэффициент затухания ВУД; T – внутриимпульсное время, отсчитываемое от вершины импульса при любом значении Z ; $A(Z) = |\beta_2|(Z)/\gamma(Z)$ – параметр ВУД, зависящий от Z .

Из (1) следует, что для сохранения солитонного режима в ВУД необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

$$A(Z) = |\beta_2(Z)|/\gamma(Z) = [|\beta_2(0)|/\gamma(0)] \cdot \exp(-\alpha \cdot Z), \quad (2)$$

$$P_m(0) = \frac{|\beta_2|(0)}{(\gamma(0) \cdot T_0^2)} = \frac{A(0)}{T_0^2}. \quad (3)$$

Процесс изготовления ВУД включал уменьшение диаметра сердцевин ОВ в процессе его вытягивания [3]. Это изменение диаметра сердцевин влияет на волноводную составляющую ДГС и коэффициент нелинейности γ , что приводит к уменьшению значения $A(Z) = |\beta_2(Z)|/\gamma(Z)$. В ходе проведенного исследования $A(Z)$ в ВУД изменялась в 10 раз на расстоянии 40 км. Во столько же раз изменялось требуемое значение пиковой мощности P_m . Фундаментальные солитоны сохраняли свою длительность и форму, даже при наличии потерь, составляющих 10 дБ [3].

Следуя выражениям (2–3) и используя результаты [3], рассмотрим гипотетический пример реализации одного УУ солитонной ВОСС со скоростью $V = 10$ Гбит/с на основе ВУД длиной $L_A = 100$ км и коэффициентом затухания $\alpha = 0,2$ дБ/км. Для последующих расчетов полагаем, что длительность импульсов на уровне половины амплитуды $t_u = 20$ пс, а требуемая для формирования фундаментального солитона на входе в ВУД пиковая мощность $P_m(0) = 17$ мВт (12,3 дБм).

Каноническая полуширина секансного импульсов при этом будет равна [4, 5]:

$$T_0 = t_u/1,763 = 11,34 \text{ пс}. \quad (4)$$

Тогда в соответствии с (3) $A(0) = 2,19$ Вт·пс², $A(100) = 0,0219$ Вт·пс², $P_m(100) = 0,17$ мВт. На рисунке 1 показана зависимость $P_m(Z)$ на УУ с ВУД (синяя кривая). Этот же график одновременно описывает изменения реальной пиковой мощности и требуемой для сохранения фундаментального солитона в ВУД на УУ. Важно отметить, что солитонный режим в такой ВОСС с ВУД будет сохраняться на больших расстояниях при установке дискретных ОУ с коэффициентом усиления $\alpha_{LA} = 20$ дБ через каждые $L_A = 100$ км.

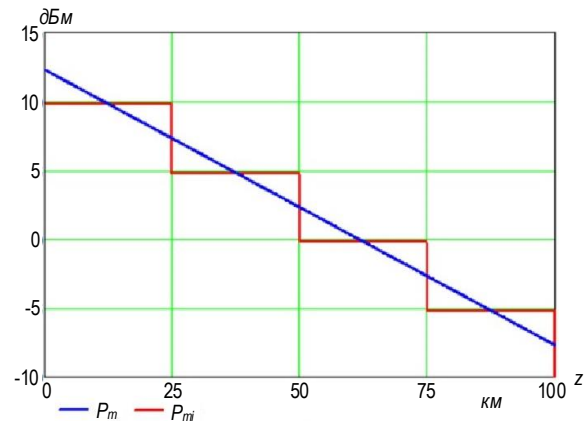


Рис. 1. Изменение пиковой мощности фундаментального солитона в ВУД (синяя линия) и средней пиковой мощности в четырех ОВ с дискретно уменьшающейся дисперсией (красная линия) в зависимости от расстояния на УУ

Fig. 1. The Change in the Peak Power of the Fundamental Soliton in a Fiber with Decreasing Dispersion (Blue Line) and the Average Peak Power in Four Optical Fibers with Discretely Decreasing Dispersion (Red Line) Depending on the Distance in the Amplification Section

В настоящее время ВУД серийно не производятся и ВОСС с их использованием не существует. Рассмотрим возможность создания аналога ВОСС с ВУД, используя УУ с n последовательно соединенными ОМ ОВ с номерами от $i = 0$ до $n-1$ дискретно уменьшающимся параметром A_i . Рассмотрим в качестве примера УУ протяженностью $L_A = 100$ км, разбитый на 4 одинаковых по протяженности ОВ длиной $l_{ob} = 25$ км с номерами от $i = 0$ до 3 с параметрами ОВ A_i , которые соответствуют средним значениям для уже рассмотренного УУ на основе ВУД на каждом 25-километровом участке. Ступенчатые изменения средних требуемых пиковых мощностей P_{mi} вдоль УУ представлены на рисунке 1 (красная кривая). Значение средней требуемой пиковой мощности будет уменьшаться на $\alpha l_{ob} = 5$ дБ при переходе к каждому следующему ОВ.

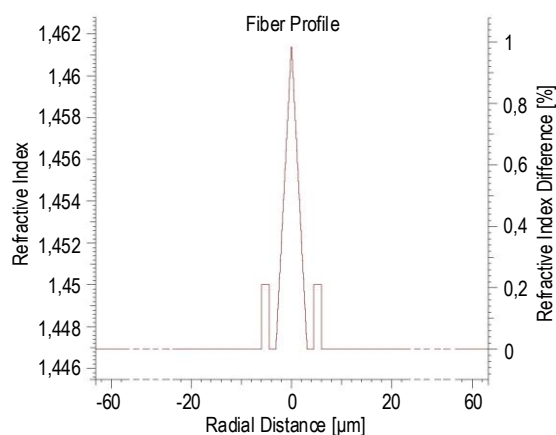
В таблице 1 приведены результаты расчетов требуемых значений средних для i -го ОВ пиковых мощностей P_{mi} и параметров ОВ A_i с учетом $A_0 = A(0) = 2,19$ Вт·пс² (3) по выражению:

$$P_{mi} = \frac{|\beta_{2i}|}{(\gamma_i \cdot T_0^2)} = \frac{A_i}{T_0^2}. \quad (5)$$

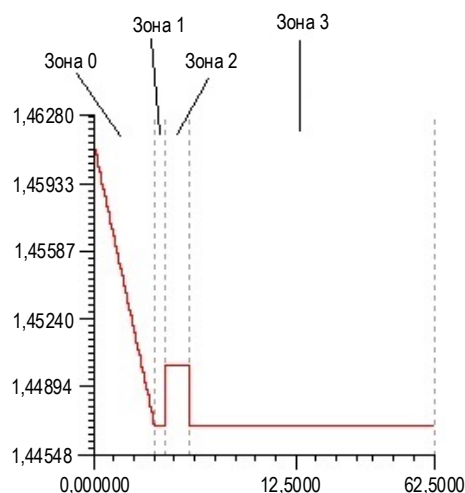
ТАБЛИЦА 1. Расчетные параметры УУ ВОСС с дискретно изменяющимися параметрами ОВ

TABLE 1. Calculated Parameters of the Amplifying Section of a Fiber-Optic Communication System with Discretely Varying Optical Fiber Parameters

Номер ОВ, i	0	1	2	3
Расстояние до начала i -го ОВ, км	0	25	50	75
Средн. пик. мощн. в i -ом ОВ P_{mi} , мВт	9,55	3,02	0,95	0,30
Уров. средн. пик. мощности p_{mi} , дБм	9,80	4,80	-0,20	-5,20
Параметр A_i , Вт·пс ²	1,23	0,39	0,12	0,04



a)



b)

Рис. 2. Профиль ППП для ОМ ОВ типа DSF (a) и изменение параметров ППП в OptiFiber (b)

Fig. 2. Refractive Index Profile for Single-Mode Optical Fiber Type DSF (a) and Changing the Parameters of the Refractive Index Profile in OptiFiber (b)

Программа OptiFiber использует метод численного решения и другие специализированные модели, которые позволяют оценивать широкий спектр параметров оптических волокон, включая хроматическую дисперсию (ХД) D_x , нелинейный показатель преломления n_2 и площадь модового поля A_{ef} . Параметры D_x , n_2 и A_{ef} , подобранные с помощью программы OptiFiber и обеспечивающие требуемые значения A , приведены в таблице 2. Величина ДГС β_{2i} и коэффициент нелинейности γ_i рассчитывались для синтезируемых ОВ по нижеприведенным выражениям [6] и помещались в таблицу 2:

$$\beta_{2i} = -D_{xi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{2\pi \cdot c}, \quad (6)$$

$$\gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{n_2}{A_{ef}}, \quad (7)$$

где c – скорость света; λ_0 – длина волны излучения.

Для подтверждения возможности создания квазисолитонной ВОСС проведено моделирование процессов распространения квазисолитонных им-

Для подтверждения возможности создания ОМ ОВ с заданными в таблице 1 параметрами для реализации квазисолитонной ВОСС с УУ длиной 100 км использовалась программа OptiFiber. В качестве прототипа для синтезируемых ОВ в программе было выбрано ОВ со смещенной дисперсией (DSF, аббр. от англ. Dispersion-Shifted Single Mode Fiber), которое имеет профиль показателя преломления (ППП), показанный на рисунке 2а. Для синтеза ОВ с заданными свойствами изменялись геометрические параметры ППП, в частности радиусы зон 0–2 (рисунок 2б).

пульсов в многопролетной схеме ВОСС (рисунок 3) в программе OptiSystem.

Программное обеспечение OptiSystem предназначено для проектирования и оптимизации систем оптической связи. Оно состоит из более чем 600 различных компонентов, что позволяет детально планировать, тестировать и моделировать разнообразные типы оптических линий связи, включая сверхдальние ВОСС.

Каждый пролет волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ) составлен из четырех ОМ ОВ и ОУ типа EDFA. В качестве источника сигнала использован генератор периодической битовой последовательности (0101101110) со скоростью передачи данных $B = 10$ Гбит/с, который модулирует оптический генератор секансных импульсов. Длительность такта $\Delta T = 100$ пс, длительность импульсов на уровне половины пиковой мощности $t_u = 20$ пс. Для изменения количества УУ N_u в OptiSystem используется петлевой элемент. Для минимизации шумов и улучшения качества передающего сигнала перед фотоприемным устройством установлен оптический полосовой фильтр.

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования в программе OptiFiber и расчетов параметров синтезируемых ОВ
TABLE 2. The Results of Modeling in the OptiFiber Program and Calculations of Parameters of Synthesized Optical Fibers

Тип ОВ	Радиус зон ППП ОМ ОВ, мкм				Результаты моделирования на длине волны 1550 нм			Расчетные значения		
	Зона 0	Зона 1	Зона 2	Зона 3	$D\chi$, пс/нм·км	A_{ef} , мкм ²	n_2 , м ² /ВТ	β_2 , пс ² /км	γ , (Вт·км) ⁻¹	A , Вт·пс ²
DSF	3,10	1,32	1,50	57,30	0,00	53,50	$18,35 \cdot 10^{-21}$	0,000	1,390	0,000
ОВ ₀	3,42	1,00	1,50	56,58	1,63	48,55	$19,49 \cdot 10^{-21}$	-2,071	1,627	1,273
ОВ ₁	3,21	1,21	1,50	56,58	0,43	51,75	$18,72 \cdot 10^{-21}$	-0,548	1,466	0,374
ОВ ₂	3,14	1,28	1,50	56,58	0,13	53,18	$18,43 \cdot 10^{-21}$	-0,171	1,405	0,122
ОВ ₃	3,12	1,31	1,50	56,58	0,04	53,76	$18,32 \cdot 10^{-21}$	-0,056	1,381	0,041

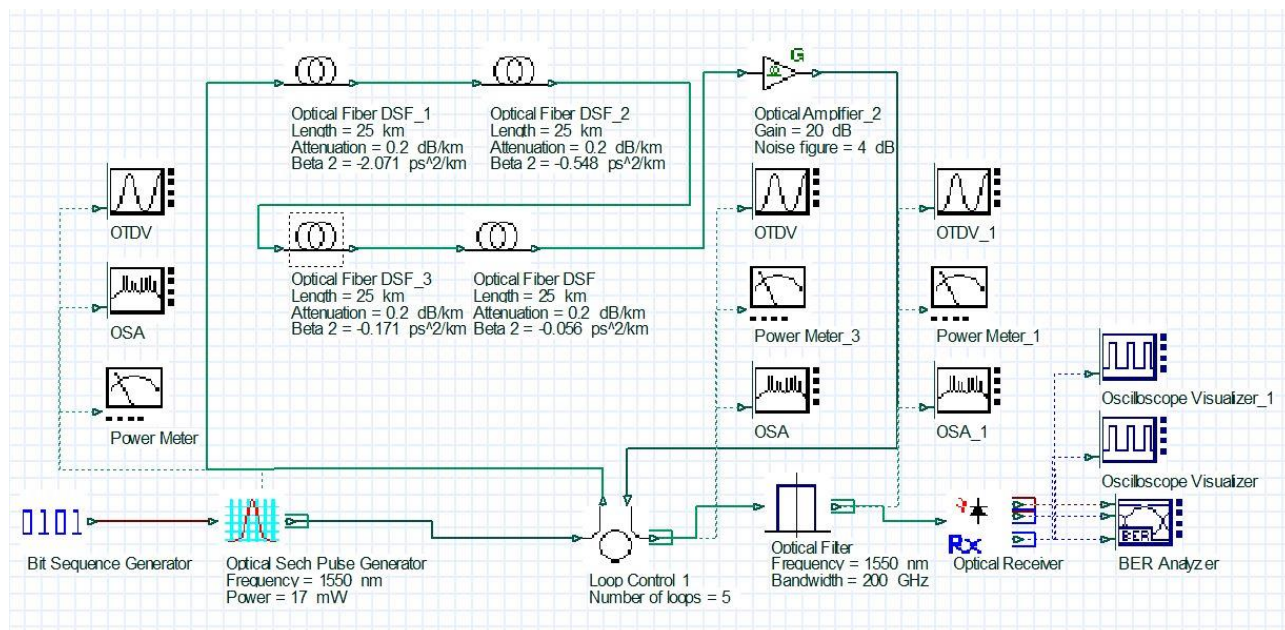


Рис. 3. Схема квазисолитонной многопролетной ВОСС с управлением дисперсией

Fig. 3. Schematic of Quasi-Soliton Multispan Fiber-Optic Communication System with Dispersion Control

Исходные данные и результаты исследований при длительности входного импульса $t_{ul} = 20$ пс и пиковой мощности $P_{m0} = 17$ мВт приведены в таблице 3 и на рисунке 4. Видно, что проведенное в программе OptiSystem моделирование многопролетной ВОСС с четырьмя ОВ в пролете, подтверждает высокую эффективность такого способа поддержания квазисолитонного режима. Максимальное отклонение пиковой мощности P_{m1} на вы-

ходе квазисолитонной ВОСС длиной до 1000 км составляет не более 2,9 %, а отклонение длительности t_{ul} выходного импульса – не более 1,5 %.

Недостатком такого способа управления дисперсией является необходимость использования сравнительно большого количества специальных ОВ и сравнительно большой пиковой мощности на входе в пролет.

ТАБЛИЦА 3. Результаты исследований квазисолитонной ВОСС

TABLE 3. Research Results of Quasi-Soliton Fiber Optic Communication System

№ п/п	Исходные данные		Измеренные величины		
	Кол-во пролетов, N_{up}	Общая длина, L , км	Вых. пик. мощн., P_{m1} , мВт	Длит. вых. импульса, t_{ul} , пс	Q
1	1	100	17,15	19,9	99
2	3	300	17	20,2	62
3	5	500	16,95	20,2	51
4	10	1000	16,60–16,80	20,3	30

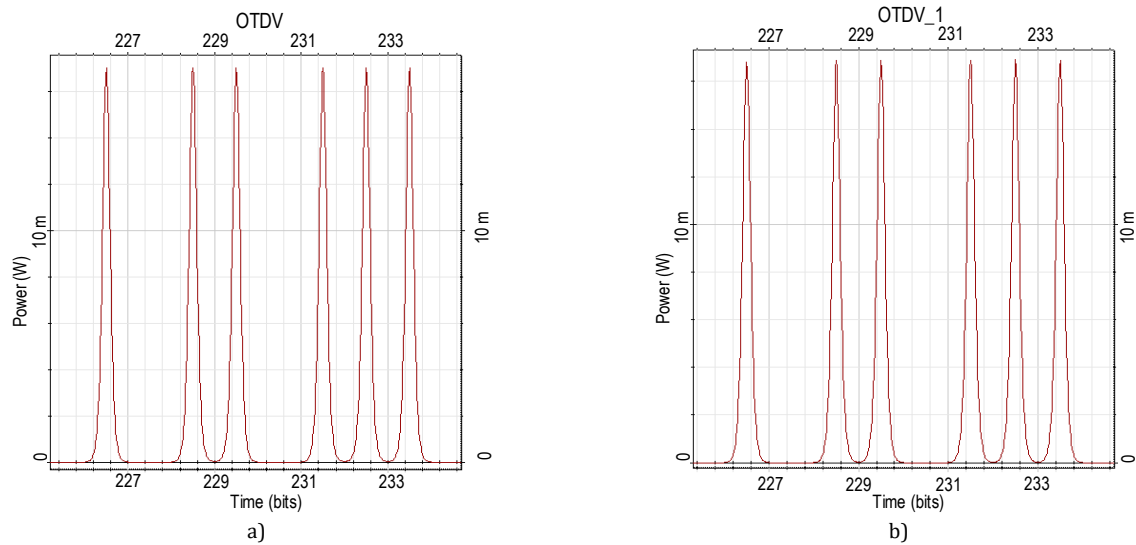


Рис. 4. Импульсы на входе (а) и выходе (б) моделируемой ВОСС длиной 1000 км

Fig. 4. Pulses at Input (a) and Output (b) of a Simulated 1000 km Fiber Optic Line

2. Поддержание квазисолитонного режима при использовании чередования волокон без потерь с разными знаками ХД

2.1. Использование источников излучения без начального chirping для ВОЛТ

В [7] было показано, что чередование двух ОМ ОВ с разными знаками ДГС позволяет реализовать квазисолитонный режим даже при использовании волокон со сравнительно большими ее отрицательными (нормальными) β_{2n} и положительными (аномальными) β_{2a} значениями, но при низкой величине средней ДГС:

$$\Delta\beta_2 = \frac{\beta_{2n} \cdot l_n + \beta_{2a} \cdot l_a}{l_n + l_a}, \quad (8)$$

где l_n и l_a – длины ОМ ОВ с нормальной и аномальной ДГС.

Из выражения (8) следует, что остаточная ДГС может иметь очень малое отрицательное значение

при достаточно больших ДГС каждого ОМ ОВ в отдельности. Это существенно снижает влияние эффектов четырехволнового смешения и ХД 3-го порядка в каждом отдельном ОМ ОВ. В результате в каждой секции из двух ОМ ОВ можно обеспечить небольшую отрицательную остаточную ДГС, которую затем компенсируют нелинейным эффектом фазовой самомодуляции. В пределах секции пиковая мощность, длительность, chirping и форма квазисолитонного импульса будут периодически осциллировать. Такие квазисолитоны получили название солитонов с управляемой дисперсией [7].

Оценим значение требуемой входной пиковой мощности секансных P_{0m} импульсов, необходимой для компенсации остаточной средней ДГС $\Delta\beta_2$ в секции, состоящей из двух ОМ ОВ без потерь [2]:

$$P_{0m} = \frac{|\Delta\beta_2|}{\gamma \cdot T_0^2}. \quad (9)$$

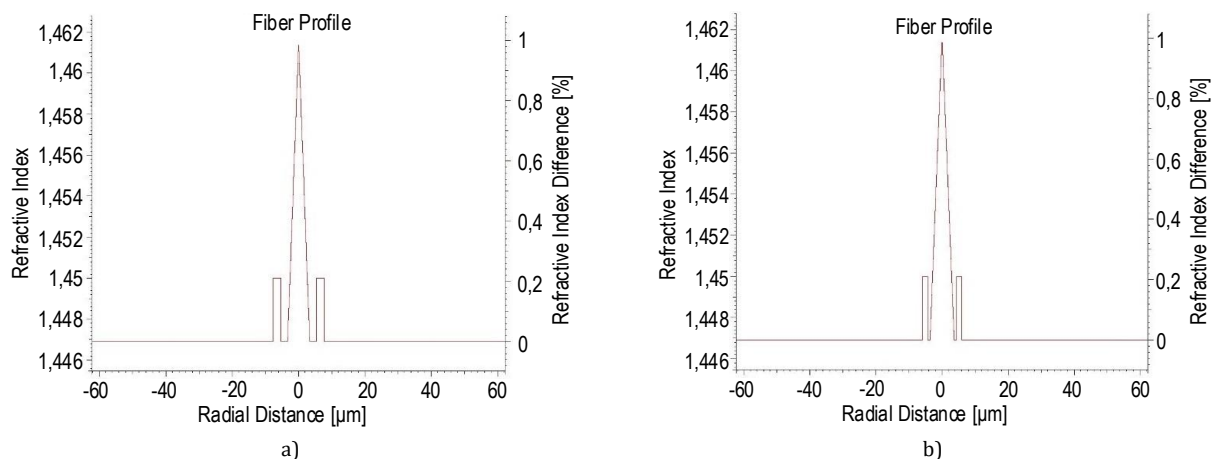


Рис. 5. ППП ОМ ОВ с ДГС 4,5 пс²/км (а) и -4,5 пс²/км (б)

Fig. 5. The Refractive Index Profile of an Optical Fiber with a Group Velocity Dispersion of 4,5 ps²/km (a) and -4,5 ps²/km (b)

Используя программу OptiFiber, проведем синтез двух ОМ ОВ, которые имеют ДГС разных знаков $\pm 4,5$ пс²/км. На рисунке 5 показаны ППП для таких ОМ ОВ. Параметры синтезированных ОМ ОВ приведены в таблице 4.

В программе OptiSystem проведено моделирование квазисолитонной ВОСС с чередующимися ОМ ОВ без потерь с параметрами, приведенными в таблице 4, с источником излучения без начального chirping (рисунок 6а).

Для реализации квазисолитонного режима в секции из двух ОМ ОВ с остаточной ДГС секции $\Delta\beta_2 = -0,4$ пс²/км выберем длину первого ОМ ОВ с нормальной ХД $l_n = 10$ км и рассчитаем по (8) длину второго ОМ ОВ l_a с аномальной дисперсией:

$$l_a = \frac{l_n \cdot (\beta_{2n} - \Delta\beta_2)}{\Delta\beta_2 - \beta_{2a}} = 11,84 \text{ км.}$$

ТАБЛИЦА 4. Результаты моделирования в программе OptiFiber и расчетов параметров, синтезируемых ОВ

TABLE 4. The Results of Modeling Using the OptiFiber Software and Calculations of the Parameters of Synthesized Optical Fibers

Тип ОВ	С норм. ХД	С аном. ХД
ДГС, β_2 , пс ² /км	4,512	-4,537
Коэффициент ХД, $D\chi$, пс/(нм км)	-3,54	3,56
Площадь модового поля, A_{eff} , мкм ²	52,50	46,08
Коэффициент затухания, α , дБ/км	0,2	0,2
Нелинейный показатель преломления, n_2 , м ² /Вт	18,54	20,3
Коэффициент нелинейности, γ , (Вт·км) ⁻¹	1,432	1,786
Параметр A , Вт·пс ²	3,152	2,541
Пиковая мощность P_{mi} , мВт	24	20

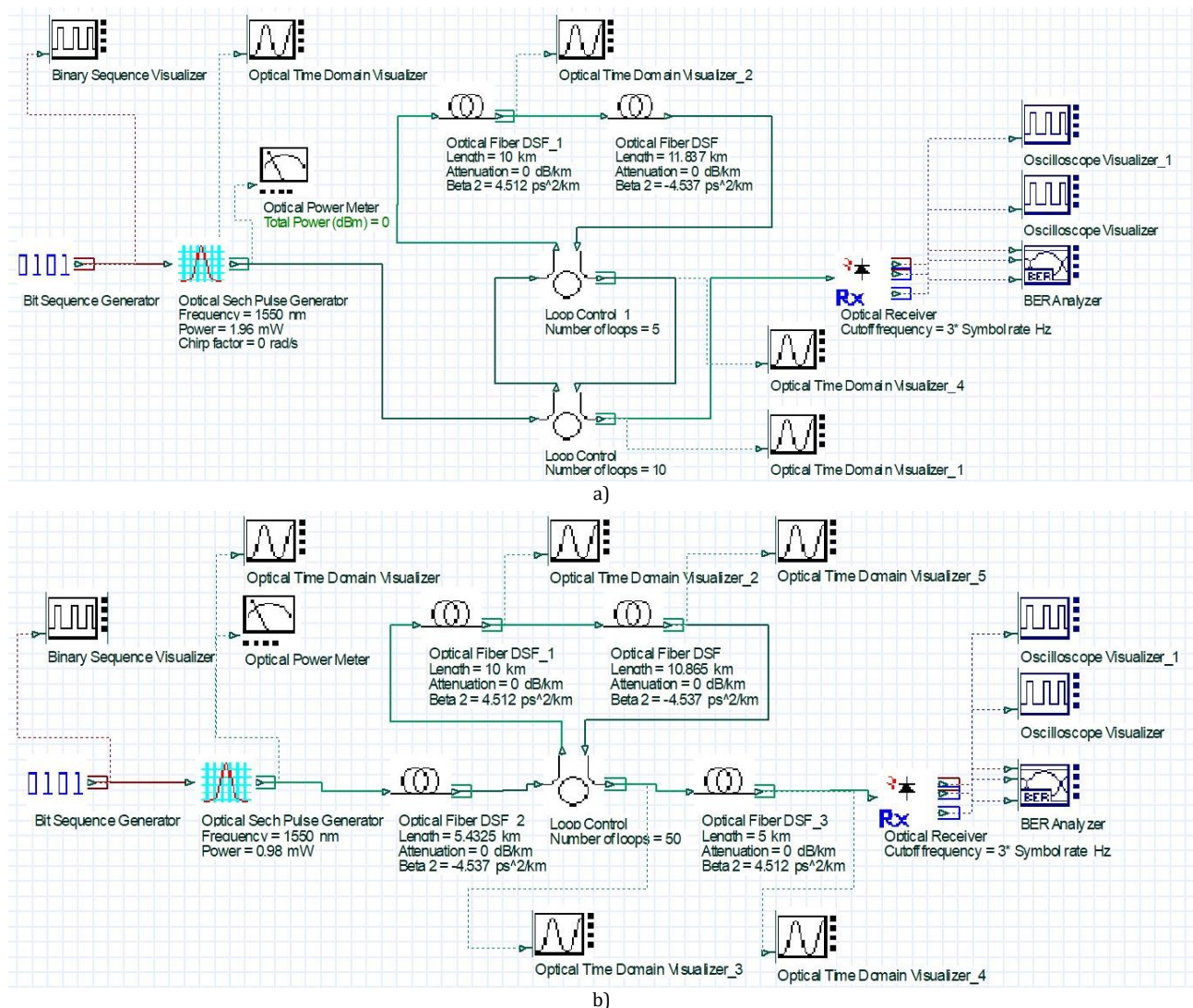


Рис. 6. Схема исследования квазисолитонной ВОСС с чередованием ОМ ОВ без потерь и без начального chirping (а) и с ОМ ОВ без потерь с начальным chirpingом, создаваемым волокном (б)

Fig. 6. The Study of a Quasi-Soliton Fiber-Optic Communication System Using Alternating Optical Fibers with No Loss and No Initial Chirping (a) and Using Lossless Optical Fiber, with Initial Chirping Caused by the Fiber (b)

Необходимые пиковые мощности для поддержания солитонного режима в синтезированных ОМ ОВ без потерь по уравнению (9) составили с нормальной ХД $P_{0m} = 2,17$ мВт, с аномальной ХД $P_{0m} = 1,74$ мВт. Для моделирования использовалась средняя мощность на секцию из двух ОМ ОВ $P_{0m} = 1,96$ мВт. Результаты исследований солитонного режима в ОМ ОВ без потерь и без начального чирпинга при разных значениях $\Delta\beta_2$ и l_n для длины линии порядка 1000 км приведены в таблице 5а (количестве пролетов $N = 10$).

Из таблицы 5а видно, что выходной импульс сохраняет свою форму при значениях остаточной дисперсии $\Delta\beta_2$ в пределах от $-0,2$ до $-0,4$ пс²/км и длины $l_n \leq 10$ км. При $l_n > 10$ км квазисолитонный режим поддерживается значительно хуже, учиты-

вая, что дисперсионная длина ОМ ОВ больше и равняется $L_D = 28$ км. С увеличением модуля $\Delta\beta_2 > -0,4$ пс²/км наблюдается джиттер, который приводит к колебаниям пиковой мощности и длительности импульсов от импульса к импульсу в пределах 5 %.

2.2. Использование на входе секции излучения с начальным чирпингом, создаваемым ОВ без потерь

Схема моделирования аналогична схеме на рисунке 6а, но с добавлением ОМ ОВ длиной $l_a/2$ для создания начального чирпинга в начало ВОЛТ и ОМ ОВ длиной $l_n/2$ для компенсации остаточного чирпинга в конце ВОЛТ (рисунок 6б) [8]. Результаты моделирования приведены в таблице 5б.

ТАБЛИЦА 5. Результаты исследований квазисолитонной ВОСС с чередованием ОВ без потерь и без начального чирпинга (а) и с использованием ОМ ОВ без потерь и с начальным чирпингом (б)

TABLE 5. The Research Results of a Quasi-Soliton Fiber-Optic Communication System Using Alternating Optical Fibers with No Loss (a) and Using Lossless Optical Fibers with Initial Chirping (b)

N , п/п	$\Delta\beta_2$	l_n , км	l_a , км	Кол-во секций на пролете	Длина пролета, L_N , км	Длина общая, L , км	Вх. пик. мощн., P_{0m} , мВт	Вых. пик. мощн., P_{lm} , мВт	Длит. вых. имп., t_{ul} , пс	Q
1	-0,1	10	10,39	5	101,9	1019	0,49	0,51	19,5	69
2	-0,2	5	5,43	10	104,3	1043	0,98	1,02	19,8	119
3	-0,2	10	10,87	5	104,3	1043	0,98	1,00	20,1	119
4	-0,2	15	16,30	4	125,2	1252	0,98	0,97	21,1	116
5	-0,3	5	5,68	10	106,8	1068	1,47	1,52	19,6	157
6	-0,3	10	11,36	5	106,8	1068	1,47	1,49	20,3	156
7	-0,3	15	17,04	4	128,1	1281	1,47	1,39	21,9	134
8	-0,4	5	5,94	10	109,4	1094	1,96	2,02	19,7	182
9	-0,4	10	11,84	5	109,2	1092	1,96	1,96	20,3	169
10	-0,4	15	17,81	4	131,2	1312	1,96	1,72–1,77	22,9–24	89
11	-0,6	10	12,99	5	114,9	1149	2,94	2,75–2,89	20,7–21,7	81
12	-0,8	10	14,22	5	121,1	1211	3,92	3,67–3,72	20,9–21,2	177

а)

1	-0,2	5	5,43	10	109,5	1095	0,98	0,98	20,0	122
2	-0,2	10	10,87	5	114,8	1148	0,98	0,97	20,4	121
3	-0,2	15	16,30	4	140,8	1408	0,98	0,93	21,2	120
4	-0,3	5	5,68	10	112,1	1121	1,47	1,49	19,9	164
5	-0,3	10	11,36	5	117,5	1175	1,47	1,45	20,3	159
6	-0,3	15	17,04	4	144,2	1442	1,47	1,40	21	162
7	-0,4	5	5,94	10	114,8	1148	1,96	2,00	19,8	201
8	-0,4	10	11,84	5	120,1	1201	1,96	2,03	19,5	207
9	-0,4	15	17,81	4	147,6	1476	1,96	1,89	21,1	168
10	-0,6	10	12,99	5	126,4	1264	2,94	4	14,8	309

б)

При моделировании квазисолитонного режима в ВОЛТ с начальным чирпингом выходной импульс сохраняет свою форму при значениях остаточной дисперсии $\Delta\beta_2$ в пределах от $-0,2$ до $-0,4$ пс²/км и длины $l_n \leq 10$ км. При $l_n > 10$ км квазисолитонный режим поддерживается хуже, но Q -фактор остается высоким.

3. Поддержание квазисолитонного режима в ВОСС с чередованием ОМ ОВ с потерями и разными знаками ХД

3.1. Использование источников излучения без начального чирпинга

Проведем исследование солитонного режима в ВОСС с чередованием ОМ ОВ с коэффициентом затухания $\alpha = 0,20$ дБ/км и без начального чирпинга. Схема моделирования и параметры ВОСС аналогичны схеме на рисунке 6а, но с включением в

каждый пролет ВОЛТ ОУ с коэффициентом усиления G , полностью компенсирующим затухание на УУ, которое рассчитывается в зависимости от количества секций M из двух ОМ ОВ l_n и l_a :

$$G = \alpha \sum_{i=1}^M (\alpha \cdot l_n + \alpha \cdot l_a). \quad (10)$$

Для поддержания на УУ средней пиковой мощности на его вход надо подавать существенно большую пиковую мощность. Ее можно определить по выражению [2]:

$$P_m = K \cdot P_{0m}, \quad (11)$$

где $K = g(G) \cdot \ln(g(G)) / (g(G) - 1)$ и $g(G) = 10^{\frac{G}{10}}$ раз.

Результаты исследования и расчетов по выражению (10 и 11) представлены в таблице 6, где количество УУ – 10.

ТАБЛИЦА 6. Результаты исследований квазисолитонной ВОСС с использованием ОМ ОВ с потерями без начального чирпинга (а) и с использованием ОМ ОВ с потерями и начальным чирпингом (б)

TABLE 6. Research Results of a Quasi-Soliton Fiber Optic Communication System Using Optical Fibers with Attenuation without Initial Chirping (a) and Using Optical Fibers with Attenuation and Initial Chirping (b)

N, п/п	$\Delta\beta_2$	l_n , км	l_a , км	Кол-во секций на УУ	Длина УУ, L_n , км	Длина общая, L , км	Результаты расчета		Результаты моделирования		
							G , дБ	Вх. пик. мощн., P_{0m} , мВт	Вых. пик. мощн., P_{lm} , мВт	Длит. вых. имп., t_{ul} , пс	Q
1	-0,2	5	5,43	10	104,3	1043	20,86	4,75	4,85	19,9	13
2	-0,2	10	10,87	5	104,3	1043	20,87	4,75	4,9	20,3	13
3	-0,2	15	16,30	4	125,2	1252	25,04	5,67	5,48	21,9	8
4	-0,3	5	5,68	10	106,8	1068	21,36	7,28	7,45	20	14
5	-0,3	10	11,36	5	106,8	1068	21,36	7,28	7,15	21,1	14
6	-0,3	15	17,04	4	128,1	1281	25,63	8,70	7,8–8,1	21,6–23,2	8
7	-0,4	5	5,94	10	109,4	1094	21,87	9,94	9,9	20,1	14
8	-0,4	10	11,84	5	109,2	1140	21,84	9,92	9,6	21,0	14
9	-0,4	15	17,81	4	131,2	1312	26,25	11,87	9,3–9,8	25–27,5	8
10	-0,6	10	12,99	5	114,9	1149	22,99	15,64	12,8–14,2	22,2–24,9	15

а)

1	-0,2	5	5,43	10	109,5	1095	21,91	4,98	5,08	19,8	11
2	-0,2	10	10,87	5	114,8	1147	22,95	5,20	5,20	20,2	10
3	-0,2	15	16,30	4	140,8	1406	28,17	6,37	6,21	20,8	6
4	-0,3	5	5,68	10	112,1	1121	22,43	7,64	7,82	19,8	13
5	-0,3	10	11,36	5	117,5	1175	23,49	7,99	8,01	20,2	12
6	-0,3	15	17,04	4	144,2	1442	28,83	9,77	9,53	20,8	7
7	-0,4	5	5,94	10	114,8	1148	22,97	10,42	10,61	20	14
8	-0,4	10	11,84	5	120,1	1119	24,02	10,88	11,01	20	13
9	-0,4	15	17,81	4	147,6	1477	29,53	13,34	12,6	21,1	7
10	-0,6	10	12,99	5	126,4	1264	25,28	17,16	16,3–17,1	20–20,9	14

б)

При моделировании квазисолитонного режима в ВОЛТ с затуханием без начального чирпинга выходной импульс сохраняет свою форму при значениях остаточной дисперсии $\Delta\beta_2$ в пределах от $-0,2$ до $-0,4$ пс²/км и длине $l_n \leq 5$ км. При $l_n = 10$ км квазисолитонный режим поддерживается только при остаточной дисперсии $\Delta\beta_2 = -0,2$ пс²/км, в остальных случаях импульс значительно расширяется.

3.2. Использование на входе секции излучения с начальным чирпингом, создаваемым ОМ ОВ

Проведем исследование квазисолитонного режима в ОМ ОВ с потерями и начальным чирпингом, создаваемым ОМ ОВ. Схема моделирования и параметры ВОСС аналогичны схеме без затухания и начальным чирпингом (рисунок 6б), с установленным линейным ОУ.

Для поддержания на УУ средней пиковой мощности на вход линейного тракта надо подавать большую пиковую мощность с учетом затухания в ОМ ОВ для создания и компенсации чирпинга. Результаты расчетов коэффициента усиления по (10) и пиковой мощности по (11) представлены в таблице 6б.

Из таблицы 6б видно, что при моделировании квазисолитонного режима в ВОЛТ с затуханием и начальным чирпингом выходной импульс сохраняет свою форму при значениях остаточной дисперсии $\Delta\beta_2$ в пределах от $-0,2$ до $-0,4$ пс²/км и длине $l_n \leq 10$ км. При $l_n > 10$ км квазисолитонный режим поддерживается хуже.

Предварительное чирпирование не оказывает заметного влияния на качество поддержания квазисолитонного режима. Доказано, что возможно существенно снизить пиковую мощность на входе в пролеты по сравнению с применением ВУД и ОВ с дискретно уменьшающейся дисперсией на ВОЛТ.

Выводы

В статье исследованы методы управления дисперсией для поддержания квазисолитонного режима распространения импульсов в высокоскоростной ВОСС при использовании волокон с уменьшающейся ХД и при чередовании ее ОМ ОВ с разными знаками ХД. Все методы могут быть использованы в высокоскоростных ВОСС.

Наиболее эффективным методом поддержания длительности и пиковой мощности квазисолитонных импульсов на больших расстояниях является чередование ОМ ОВ с разными знаками ХД. Это решение позволяет обеспечить максимальную длину УУ до 120 км при минимальном значении входной пиковой мощности от 5 до 11 мВт.

Изменение длительности выходного импульса, при котором поддерживается квазисолитонный режим для импульса с начальным чирпингом, происходит в пределах от 19,8 до 20,2 пс при $\Delta\beta_2$ от $-0,2$ до $-0,4$ пс²/км и длине $l_n \leq 10$ км. Для импульса без начального чирпинга изменение длительности выходного импульса происходит в пределах от 19,9 до 20,3 пс, но в меньшем диапазоне $l_n \leq 5$ км при $\Delta\beta_2$ от $-0,2$ до $-0,4$ пс²/км и $l_n = 10$ км при $\Delta\beta_2 = -0,2$.

При поддержании квазисолитонного режима на ВОЛТ с длиной УУ 100 км и использовании волокон с уменьшающейся ХД изменение длительности выходного импульса происходит в пределах от 19,9 до 20,3 пс. Такое решение имеет более сложную схему, которая требует подбор ОМ ОВ с определенными параметрами.

Разработанные схемы квазисолитонных ВОСС и результаты их исследования дают представления о возможностях применения таких ВОСС в сетях связи, а также 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., Чаймарданов П.А. Свойства временных оптических солитонов в оптических волокнах и возможность их использования в телекоммуникациях. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 26–35. DOI:10.31854/1813-324x-2018-2-26-35. EDN:XRVQCL
2. 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 3 // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 5–16. DOI:10.31854/1813-324x-2018-4-3-5-16. EDN:МАКQKL
3. Глаголев С.Ф., Лыков Г.Р. Исследование возможности практической реализации многопролетной квазисолитонной ВОСС с чередованием нескольких оптических волокон // Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023)» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 05–07 декабря 2023). Сборник лучших докладов. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 283–287. EDN:TZOZEG
4. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
5. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. Wiley, 2010. 626 p.
6. Трещиков В.Н., Листвин В.Н. DWDM системы. М.: Техносфера, 2021. 420 с.
7. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 648 с.
8. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.

References

1. Andreeva E., Bylina M., Glagolev S., Chaimardanov P. Properties of Temporary Optical Solitons in Optical Fibers and the Possibility of Their Use in Telecommunications. Part 2. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(2):26–35. (in Russ.). DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-5-16. EDN:XRVQCL
2. 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 3. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(3):5–16. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-5-16. EDN:MAKQKL
3. Glagolev S., Likov G. Investigation of the possibility of practical implementation of a multi-span quasi-soliton VOSS with alternating multiple optical fibers. *Proceedings of the All-Russian Scientific, Technical and Scientific-Methodical Conference of Undergraduates and Their Supervisors on Training of Professional Staff in the Master's Degree Program for the Digital Economy, 05-07 December 2023, St. Petersburg, Russian Federation*. Collection of the Best Reports. St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2024. p.283–287. (in Russ.) EDN:TZOZEG
4. Agrawal G. *Nonlinear fiber optics*. Moscow: Mir Publ.; 1996. 323 p. (in Russ.)
5. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley; 2010. 626 p.
6. Treschikov N., Listvin V.N. *DWDM Systems*. Moscow: Technosphaera Publ.; 2021. 420 p. (in Russ.)
7. Kishvar Yu.S., Agrawal G.P. *Optical Solitons. From Fiber Light Guides to Photonic Crystals*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2005. 648 p (in Russ.)
8. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrykov D.V. *Optical Fibers for Communication Lines*. Moscow: LESARart Publ.; 2003. 288 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 17.07.2024; принята к публикации 29.07.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 17.07.2024; accepted for publication 29.07.2024.

Информация об авторах:

БЫЛИНА
Мария Сергеевна

кандидат технических наук, заведующий кафедрой фотоники и линий связи
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-9818-4060>

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

ведущий инженер производственной лаборатории связи Службы связи
ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»
 <https://orcid.org/0000-0003-0299-0469>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.