

УДК 621.391.63

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ЧАСТОТНЫХ ПЛАНОВ DWDM

*Одегов Н.А., Балеев И.С.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)*

## ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ НЕРІВНОМІРНИХ ЧАСТОТНИХ ПЛАНІВ DWDM

*Одегов М.А., Балеев І.С.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)*

## A NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD FOR THE SYNTHESIS OF OPTIMAL IRREGULAR DWDM FREQUENCY PLANS

*Odegov N.A., Baleyev I.S.*

*O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)*

**Аннотация.** Исследуются возможности повышения пропускной способности волоконно-оптических системы передачи за счет использования неравномерной сетки частот. При этом ширина полосы каждого канала выбирается так, чтобы скорость передачи была одинаковой для всех каналов. В данной статье учитываются как линейные, так и некоторые нелинейные эффекты, приводящие к искажению оптического импульса. Имитационное моделирование нелинейных эффектов основывается на модели в форме обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. В разработанной программе предусмотрено моделирование линейных и нелинейных искажений для диапазона DWDM (от 1460 до 1625 нм). Также предусмотрены характеристики различного типа оптического волокна. Нелинейные эффекты исследуются для волокна со смещенной дисперсией типа NZ DSF-. Решение дифференциальных уравнений осуществляется методом расщепления по физическим факторам. Показано, что для данного типа волокна на расстояниях 100 км и более проявляется солитонный режим передачи. При этом полоса частот солитонного режима может достигать значительных величин (до 5 ТГц) на типичных длинах регенерационных участков порядка 100-300 км. Предложен метод расчета ширины полос неравномерных частотных планов. Данный метод опробован для полосы шириной 15 ТГц. Конкретный пример расчетов приведен для базы сравнения в виде равномерного частотного плана с шириной полосы отдельного канала 50 ГГц. Показано, что оптимальные неравномерные частотные планы позволяют существенно увеличить пропускную способность систем DWDM: в приведенном примере – приблизительно в 3 раза. При этом сложность оборудования увеличивается незначительно.

**Ключевые слова:** волоконно-оптические системы передачи, оптическое волокно, дисперсия, максимальная скорость передачи, нелинейные эффекты, неравномерные частотные планы, квазисолитонный режим передачи.

**Анотація.** Досліджуються можливості підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних системи передачі за рахунок використання нерівномірної сітки частот. При цьому ширина смуги кожного каналу вибирається так, щоб швидкість передавання була однаковою для всіх каналів. У

*Одегов Н.А., Балеев И.С.*

даній статті враховуються як лінійні, так і деякі нелінійні ефекти, що призводять до спотворення оптичного імпульсу. Імітаційне моделювання нелінійних ефектів ґрунтується на моделі у формі узагальненого нелінійного рівняння Шредингера. У розробленій програмі передбачено моделювання лінійних і нелінійних спотворень для діапазону DWDM (від 1460 до 1625 нм). Також передбачені характеристики різного типу оптичного волокна. Нелінійні ефекти досліджуються для волокна зі зміщеною дисперсією типу NZ DSF-. Розв'язання диференціальних рівнянь здійснюється методом розщеплення за фізичними факторами. Показано, що для даного типу волокна на відстанях 100 км і більше проявляється солітонний режим передачі. При цьому смуга частот солітонного режиму може досягати значних величин (до 5 ТГц) на типових довжинах регенераційних ділянок порядку 100-300 км. Запропоновано метод розрахунку ширини смуг нерівномірних частотних планів. Даний метод випробуваний для смуги шириною 15 ТГц. Конкретний приклад розрахунків показано для бази порівняння у вигляді рівномірного частотного плану з шириною смуги окремого каналу 50 ГГц. Показано, що оптимальні нерівномірні частотні плани дозволяють суттєво збільшити пропускну здатність систем DWDM: у наведеному прикладі – приблизно в 3 рази. При цьому складність обладнання збільшується незначно.

**Ключові слова:** волоконно-оптичні системи передачі, оптичне волокно, дисперсія, максимальна швидкість передавання, нелінійні ефекти, нерівномірні частотні плани, квазісолітонний режим передачі.

**Abstract.** The possibilities of increasing the throughput of fiber-optic transmission systems by using an uneven frequency grid are investigated. In this case, the bandwidth of each channel is selected so that the transmission rate is the same for all channels. In this work, both linear and some nonlinear effects are taken into account, leading to the distortion of the optical pulse. Simulation of nonlinear effects is based on a model in the form of a generalized nonlinear Schrödinger equation. The developed program provides modeling of linear and nonlinear distortions for the DWDM range (from 1460 to 1625 nm). The characteristics of different types of optical fiber are also provided. Non-linear effects are investigated for NZ DSF-type dispersion-shifted fiber. Differential equations are solved by the method of splitting according to physical factors. It is shown that for this type of fiber at distances of 100 km and more, a soliton transmission mode appears. In this case, the frequency band of the soliton regime can reach significant values (up to 5 THz) at typical lengths of the regeneration sections of the order of 100-300 km. A method for calculating the bandwidth of uneven frequency plans is proposed. This method has been tested for a 15 THz band. A specific example of calculations is given for the comparison base in the form of a uniform frequency plan with a single channel bandwidth of 50 GHz. It is shown that optimal non-uniform frequency plans can significantly increase the throughput of DWDM systems: in the given example, approximately 3 times. At the same time, the complexity of the equipment increases slightly.

**Key words:** fiber-optic transmission systems, optical fiber, dispersion, maximum transmission rate, nonlinear effects, non-uniform frequency plans, quasi-soliton transmission mode.

В настоящее время промышленные высокопроизводительные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) основываются на технологии плотного спектрального мультиплексирования (DWDM). Рекомендации МСЭ-Т [1,2] для DWDM предполагают разделение общей полосы диапазонов S-C-L от 1460 до 1625 нм (приблизительно 20 ТГц) на каналы с равной шириной полосы по 100 или 50 ГГц. В перспективе – полосы каналов предполагается уменьшать до 25 и даже до 12,5 ГГц. Такие частотные планы дальше будем называть RFP-планами (Regular Frequency Plans). Далее рассматривается только вариант бинарного кодирования. При этом максимально достижимая скорость передачи в отдельном канале будет определяться:  $W_k = 1/T_k(L)$ , где  $T_k(L)$  – длительность оптического импульса (ОИ) на расстоянии  $L$  от точки ввода. С учетом искажений ОИ в оптическом волокне (ОВ) в общем виде можно определить:  $T_k(L) = T_{0k} + \Delta T_k(\overline{A}_k, f_k, \Delta F_k, L)$ , где  $\Delta T_k$  – приращение длительности ОИ на расстоянии  $L$ ;  $\overline{A}_k$  – вектор параметров или вектор-функция (коэффициент дисперсии, коэффициент нелинейных искажений и т.п.);  $f_k$  – центральная частота канала;  $\Delta F_k$  – ширина полосы канала. Очевидно, что при равной ширине полос параметр  $\Delta T_k$  может иметь различное значение для разных каналов. При этом решение задач

маршрутизации неизбежно приведет к тому, что суммарная скорость передачи в многоканальной волоконно-оптической системе передачи (ВОСП) будет определяться:

$$W_{\Sigma}(K) = \sum_{k=1}^K W^* = KW^*, \quad W^* = \min[k] W_k = 1 / \max[k] T_k(L), \quad (1)$$

т.е. суммарная скорость передачи будет определяться минимальной из скоростей в отдельных каналах.

В работе [3] предложено выбирать ширину полос  $\Delta F_k$  неравной, но такой, чтобы обеспечивалось условие равных скоростей передачи в каналах. Далее такие деления общей полосы DWDM будем называть IRFP-планами (Irregular Frequency Plans). Расчеты различных вариантов IRFP-планов [4] показали, что с учетом линейных искажений ОИ (дисперсия, затухание), что скорость передачи (1) может быть увеличена примерно в 1,5 раза по сравнению с RFP-планами при одинаковом количестве частотных каналов ВОСП.

**Целью данной статьи** является обоснование метода синтеза IRFP-планов с учетом нелинейных эффектов в ОБ. В качестве исходной принимается модель изменения длительности ОИ на расстоянии  $L$ :

$$T_k(L) = T_{0k}(\Delta F_k) - \Delta T_{NL}(f_k, L) + \Delta T_L, \quad T_{0k}(\Delta F_k) = B / \Delta F_k, \quad \Delta T_L = D(f_k) \Delta F_k L, \quad (2)$$

где  $T_{0k}$  – начальная длительность ОИ;  $\Delta T_{NL}$  – изменение длительности ОИ за счет нелинейных эффектов;  $\Delta T_L$  – изменение длительности ОИ за счет линейных эффектов;  $B$  – база ОИ, которая зависит только от его формы при вводе в ОБ;  $D(f_k)$  – дисперсионный коэффициент, отнесенный к центральной частоте канала. Задача сводится к тому, чтобы обеспечить выполнение условия:  $T_n(L) = T_m(L) \Rightarrow W_n(L) = W_m(L), \quad \forall n, m \in \{1, 2, \dots, K\}$ .

**Метод решения задачи** в самом общем виде сводится к следующим операциям:

1. Определяется базовый RFP-план с разделением общей полосы DWDM на  $K$  равных каналов шириной  $\Delta F_k = \text{const}[k] = \Delta F$  (например, 100 или 50 ГГц). Также существенной величиной в данном случае является ограничение длины линии  $L$ , которую можно рассматривать как длину регенерационного участка ВОСП (РУ).

2. Для каждого из этих каналов определяется значение  $T_k(L)$  по формуле (2).

3. Выбирается группа каналов, для которых выполняется условие компенсации (когда длительность ОИ на расстоянии не превышает начальной длительности):

$$\Delta T_k(L) = -\Delta T_{NL}(f_k, L) + \Delta T_{L,k} \leq 0. \quad (3)$$

Заметим, что условие (3) может выполняться для разных каналов на разном расстоянии  $L$ . Для конкретного канала характерная длина линии  $L_{sr,k}$ , для которой выполнено условие  $\Delta T_k(L_{sr,k}) = 0$  далее называется длиной квазисолитонного режима (длиной КСР). Также заметим, что нелинейные эффекты проявляются при относительно большой мощности ОИ и вследствие затухания постепенно становятся незначительными.

4. Для выбранной группы каналов в количестве  $K^* \leq K$  ширина полос принимается одинаковой и равной полосе  $\Delta F$  для RFP-плана. При этом общая полоса, где выполняется условие КСР  $\Delta F_{\Sigma}^* = K^* \Delta F$ . В этой полосе на расстоянии  $L$  скорость передачи в каждом канале будет максимальной:  $W^* = 1/T_0$ ,  $T_0 = B / \Delta F$ . Суммарная скорость передачи в этой полосе:  $W_{\Sigma}^* = K^* W^*$ .

5. По методике [3,4] рассчитываются полосы  $\Delta F_k < \Delta F$  для соседних каналов из условия равных скоростей передачи во всех каналах:  $W_k = W^*$ . В сумматоре  $\Delta F_\Sigma(K^{**}) = \Delta F_\Sigma(K^{**} - 1) + \Delta F_k$  накапливается ширина полосы каналов, для которых не выполнено условие (3). Алгоритм останавливается, когда суммарная полоса IRFP-плана сравняется или превысит суммарную полосу RFP-плана:  $\Delta F_\Sigma(K^{**}) + \Delta F_\Sigma^* \geq \Delta F$ . Для формирования базы сравнения определяется полученное количество каналов IRFP-плана:  $K_{IRFP} = K^* + K^{**}$ .

6. Как база сравнения формируется новый RFP-план с большим числом каналов равной ширины  $\Delta F_{RFP} = \Delta F_\Sigma / K_{IRFP}$ . Для сравнения RFP- и IRFP-планов (теперь уже с равным числом каналов) с использованием зависимости (1) анализируются суммарные скорости передачи:  $W_{\Sigma,IRFP} = K_{IRFP} \cdot W^*$  и  $W_{\Sigma,RFP} = K_{IRFP} \min[k] \cdot W_{k,RFP}$ .

**Вариант реализации метода.** Принципиально важным в контексте решаемой задачи является выбор модели искажений ОИ по мере его распространения в ОВ. В качестве базовой модели выбираем нелинейное уравнение Шредингера [5]:

$$\frac{\partial U}{\partial z} - j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} U = -j\gamma |U|^2 U, \quad (4)$$

где  $U(t, z)$  – мгновенное значение амплитуды огибающей оптического сигнала (ОС) на расстоянии  $z$  от точки ввода в ОВ;  $\beta_2$  – коэффициент дисперсии групповых скоростей (в терминах [5] – дисперсия групповых скоростей);  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности.

Решению дифференциальных уравнений (4) и подобных им посвящено значительное количество работ. В частных случаях получают аналитические решения (например [6–12]). Для разных моделей распространения ОИ и моделей ОВ исследуются солитонные решения уравнений типа (4) и получают аналитические решения [13–19]. Отмеченные решения имеют несомненную теоретическую ценность, поскольку позволяют выявлять общие параметры реальных процессов, которые обеспечивают, в том числе, существование солитонного режима. К сожалению, для решения прикладных задач они имеют, за редкими наиболее тривиальными и весьма упрощенными вариантами, два основных недостатка: как правило, выражаются через обобщенные функции, а в решениях содержат огромное количество свободных параметров. При этом свободные параметры сложно выразить через начальные условия решения задачи (форму огибающей ОИ, параметры модуляции, мощность ОИ) и характеристики ВОСП (несущая частота, ширина полосы, характеристики ОВ и т.п.).

Решения, более соответствующие практическим задачам, дают численные и численно-аналитические методы. В частности, используются конечно-разностные схемы (например, метод Рунге-Кутты [20]), линеаризация возможных решений с помощью различных рядов (например, рядов Вольтерра [21]), а также метод расщепления по физическим факторам (РФФ) [5, 22, 23]. Именно последний метод оказался наиболее приемлемым для решения задач динамического моделирования нелинейных эффектов в ОВ [24], поскольку в нем используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Это позволяет отображать деформации ОИ и его спектра в различных фазах распространения вдоль ОВ (рис. 1).

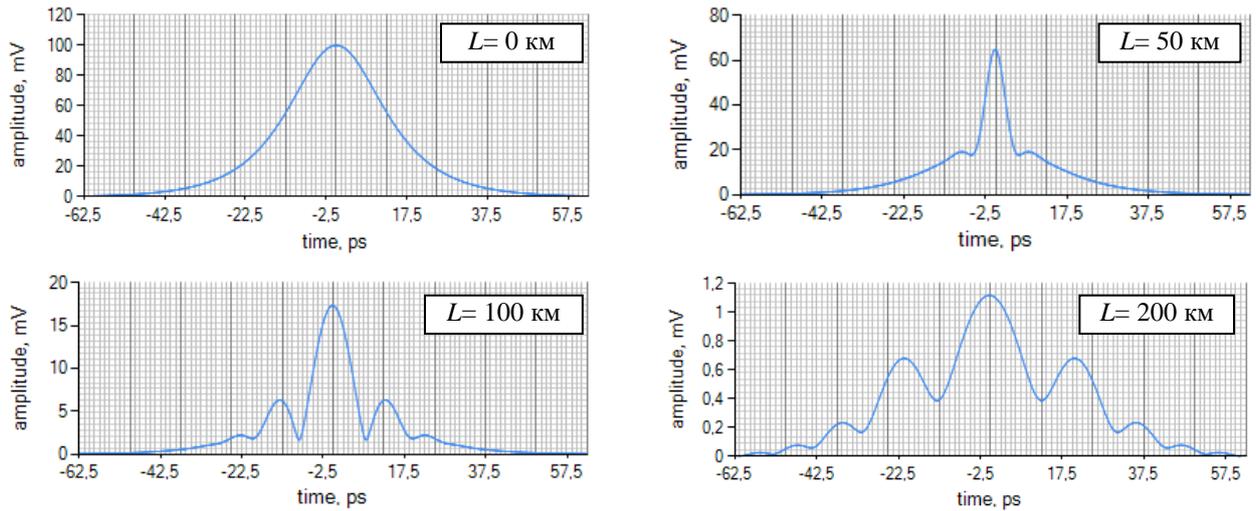


Рисунок 1 – Искажение ОИ в начальной форме  $\text{sech}(t)$  на расстояниях 50, 100 и 200 км

Метод РФФ реализован программой Nonlinear [24], в которой предусмотрена вариабельность вида огибающей ОИ, различные FRP-планы (100, 50, 25 и 12,5 ГГц), различные типы ОВ и др. Такое множество вариантов моделирования позволяет в определенной степени нивелировать частный характер решений, получаемых численными методами.

Вариант метода РФФ сводится к пошаговой реализации операторов преобразований во временной и частотной области:

$$\begin{cases} G(\omega, z+h) = FFT[U(t, z)] \otimes H_L[G, \omega, h], \\ U(t, z+h) = IFFT[G(\omega, z+h)] \otimes H_{NL}[U, t, h], \end{cases} \quad (5)$$

где  $h$  – шаг моделирования по длине ОВ  $z$ ;  $FFT$  и  $IFFT$  – соответственно операторы прямого и обратного БПФ;  $H_L$  – оператор преобразования в частотной области, который моделирует фактор линейных искажений ОИ;  $H_{NL}$  – оператор преобразования во временной области, который моделирует фактор нелинейных искажений ОИ. Особенности используемого варианта сводятся к определению операторов преобразований:

$$G(\omega, z+h) = G(\omega, z)H_L(\omega), \quad H_L(\omega, h) = \exp(-j\beta_2(\omega)h\omega^2/2), \quad (6)$$

$$U(t, z+h) = U(t, z)H_{NL}(t, z), \quad H_{NL}(t, z) = \exp(j\varphi_{NL}(t, z, h)), \quad (7)$$

где  $\varphi_{NL}(t, z)$  – фазовая функция нелинейных искажений, которая довольно сложным образом определяется через параметры ОВ [5]. Для малого шага  $h$  оператор нелинейных преобразований в выражении (7) значительно упрощается [24]:

$$H_{NL}(t, \Delta t, z, h) = 1 + j \frac{\partial P(t, z)}{\partial t} \eta_{NL} h \Delta t \cdot \exp(jP(t, z)\eta_{NL}h), \quad (8)$$

где  $P(t, z)$  – распределение мгновенной мощности по оси времени;  $\eta_{NL}$  – коэффициент нелинейных искажений. В численных алгоритмах производная в выражении (8) определяется численным дифференцированием. Из выражения (8) видно, что нелинейные эффекты существенно зависят от формы огибающей ОИ, особенно от крутизны фронтов. В свою очередь, форма ОИ изменяется вследствие дисперсии. Поэтому должна существовать точка на частотной оси, где нелинейные эффекты типа КСР проявляются в наибольшей степени.

Теоретически эта точка находится в области небольших отрицательных значений дисперсии [5]. Исходя из этих соображений в данной работе в качестве ОВ выбрано волокно со смещенной нулевой дисперсией типа NZ DSF-. Для ОВ этого типа точка нулевой дисперсии приблизительно совпадает с локальным минимумом коэффициента затухания в окне прозрачности 1550 нм, т. е. – приблизительно с серединой полосы DWDM.

На рис. 2 дан пример моделирования для ОВ NZ DSF-, канала шириной 50 ГГц с уровнем дисперсии порядка  $-2$  пс / (нм\*км). Здесь же дан пример определения длины КСР для данного случая.

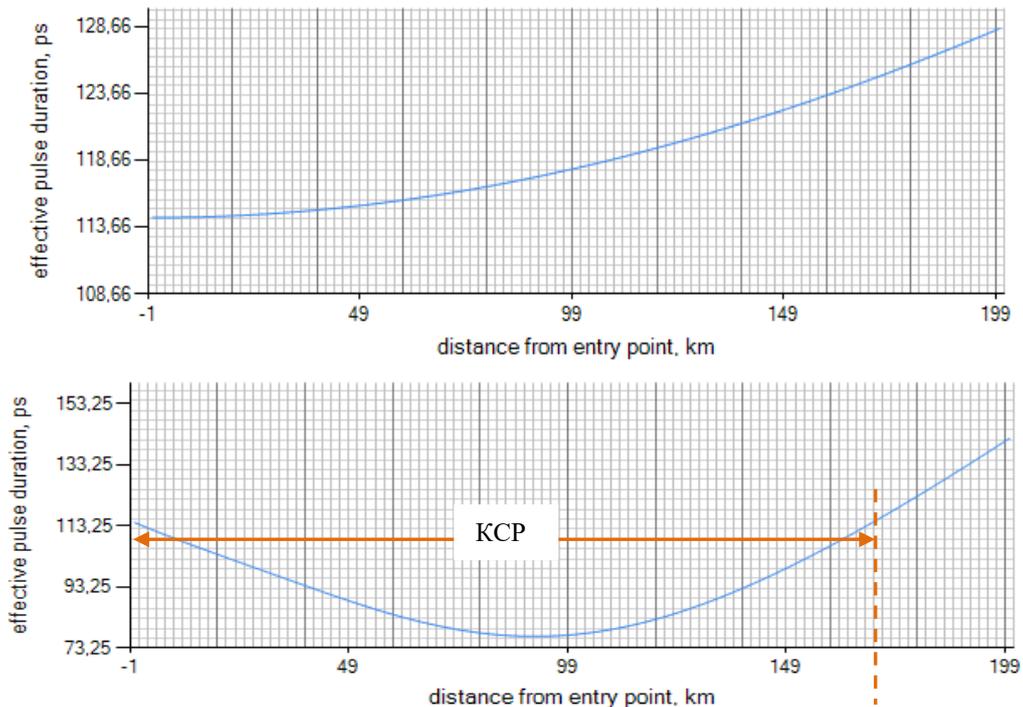


Рисунок 2 – Результаты моделирования: сверху линейный, снизу – нелинейный режим

В программе также рассчитываются значения вспомогательных функций  $D(\lambda)$  и  $\beta_2(f)$ . Пример одного из вариантов показан на рис. 3. Данный график получен экстраполяцией дисперсионных характеристик [5] в линейном приближении:

$$D(\lambda) = D(\lambda_0) + \Delta D \cdot (\lambda - \lambda_0). \quad (9)$$

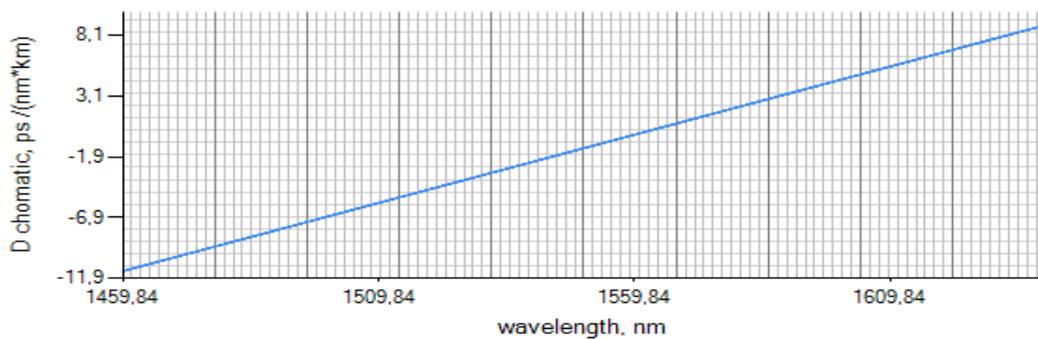


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента дисперсии от длины волны для ОВ NZ DSF-

Для расчетов по формуле (9) в данном случае из графика на рис. 3 можно получить конкретные значения:  $D(\lambda_0) \approx -12 \text{ пс/нм} \cdot \text{км}$  для  $\lambda_0 = 1460 \text{ нм}$ . Коэффициент наклона дисперсионной характеристики:  $\Delta D \approx 30 / (1640 - 1460) \approx 0,182 \text{ пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км})$ .

Приведем некоторые примеры многочисленных прогонов программы для ОИ в форме секанса гиперболического (СГ – рис. 4), гауссова импульса (ГИ – рис. 5) и варианта импульса Найквиста (ИН – рис. 6) со спектральной плотностью в виде приподнятого косинуса с коэффициентом скругления 0,5. Моделирование выполнено для ОИ с эффективной шириной спектра примерно 50 ГГц.

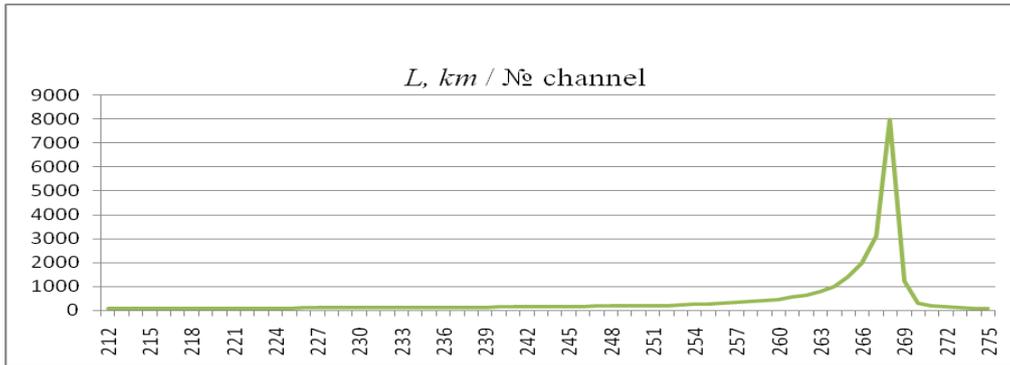


Рисунок 4 – Результаты расчетов длины КСР для СГ в зависимости от номера канала

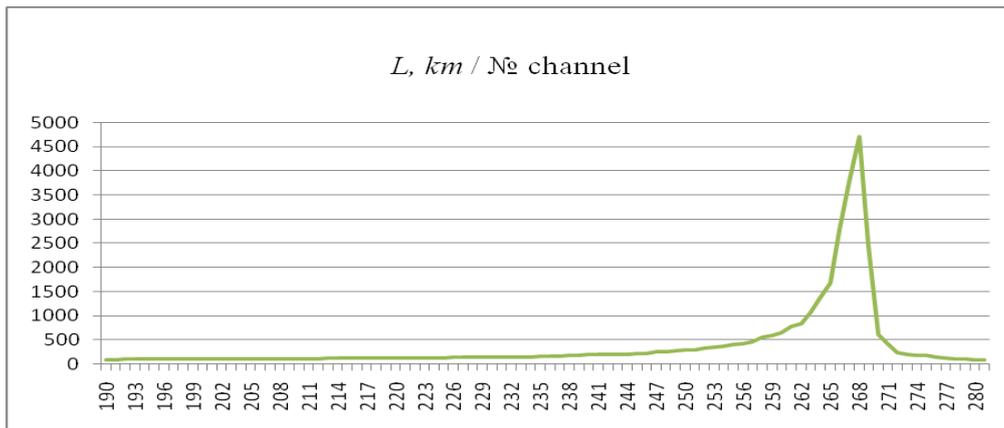


Рисунок 5 – Результаты расчетов длины КСР для ГИ в зависимости от номера канала

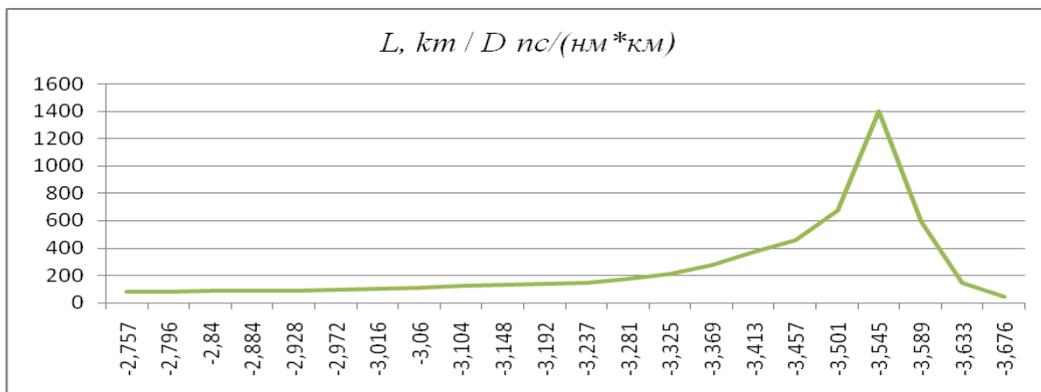


Рисунок 6 – Результаты расчетов длины КСР для ИН в зависимости от коэффициента

дисперсии

Анализ графиков на рис. 4 – 6 показывает, что имеется резко выраженный максимум длины КСР в зависимости от номера канала или от уровня дисперсии в канале. При этом каналы, в которых длина КСР превышает 100 км, занимают существенную полосу. Конкретные данные некоторых расчетов даны в табл. 1, где параметр  $D^*$  соответствует максимальной длине КСР, а параметр  $W^*$  рассчитывается по определению базы  $B$  [25] с отнесением к полосе 50 ГГц.

Таблица 1 – Данные расчетов КСР для некоторых типов ОИ

Сигнал	$\Delta F$ , ГГц	$T_0$ , пс	$B$	$K^*$	$\Delta F_{\Sigma}^*$ , ТГц	$D^*$ , пс/нм*км	$W^*$ , Гбит/с
ИН	114,0	63,9	7,3	21	1,05	-3,544	6,85
СГ	49,4	114,1	5,8	56	2,8	-3,546	8,62
ГИ	36,5	159,3	5,6	90	4,5	-3,545	8,93

Из табл. 1 видно, что максимум КСР достигается при небольшом уровне отрицательной дисперсии (около  $-3,545$  пс/(нм\*км)), что соответствует теоретическим выводам [5]. Также видно, что ширина полосы, в которой обеспечивается КСР на расстоянии порядка 100 км, зависит от базы ОИ, а в наибольшей степени – от ширины полосы. Эти выводы подтверждаются многочисленными расчетами в программе Nonlinear. Также видно, что максимальную скорость передачи в отдельном канале дают ОИ с минимальной базой. Наиболее интересно, что в данной модели полоса частот КСР может достигать значимой величины – почти 20% от общей полосы 20 ТГц диапазона DWDM.

Далее использованы некоторые упрощения, которые не значительно влияют на результат. Для пересчета коэффициента дисперсии по формуле (9) в зависимость от конкретной ширины спектра в формуле (2) удобно пользоваться простым способом пересчета:

$$D(f_k, \Delta F_k) = D(c/f_k) \cdot c \frac{\Delta F_k}{f_k (f_k + \Delta F_k)} \approx D(\lambda(f_k)) \frac{\Delta F_k}{f_k^2} = D(\lambda(f_k)) \cdot 300 \frac{\Delta F_k}{f_k^2} \text{ [пс/км]}$$

где  $c$  – скорость света в вакууме; ширина полосы  $\Delta F_k$  имеет размерность ГГц, а несущая частота  $f_k^2$  – размерность ТГц. Также полагаем, что за пределами полосы КСР нелинейные эффекты отсутствуют, т. е. на рис. 1 длина КСР канала с номером 189 равна нулю (на самом деле – около 96 км).

Вариант расчета ширины полос IRFP-плана показан на рис. 7. Видно, что, начиная с частоты приблизительно 193 ТГц, имеется разрыв графика: ширина полосы отдельного канала уменьшается с базовой величины 50 ГГц до 40 ГГц. Этот эффект объясняется тем, что для низших частот нелинейные эффекты в данном варианте расчетов не учитываются.

В табл. 2 дана сравнительная характеристика RFP- и IRFP-планов для одинаковой базовой полосы 50 ГГц.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики RFP- и IRFP-планов с шириной полос

терагерцах и оценкой скорости передачи в Гбит/с

План	$\Delta F_{\Sigma}$	$\Delta F_{k,\min}$	$\Delta F_{k,\max}$	$K$	$W_{k,\min}$	$W_{k,\max}$	$W_{\Sigma}$
RFP	15,0	0,050	0,050	300	1,858	8,929	557,3
IRFP	15,5	0,024	0,050	424	8,929	8,929	2931,0

Анализ табл. 2 показывает, что суммарная скорость передачи для IRFP-плана существенно выше, чем для RFP-плана. При этом ширина отдельных каналов IRFP-плана варьируется в пределах от 50 до 24 ГГц.

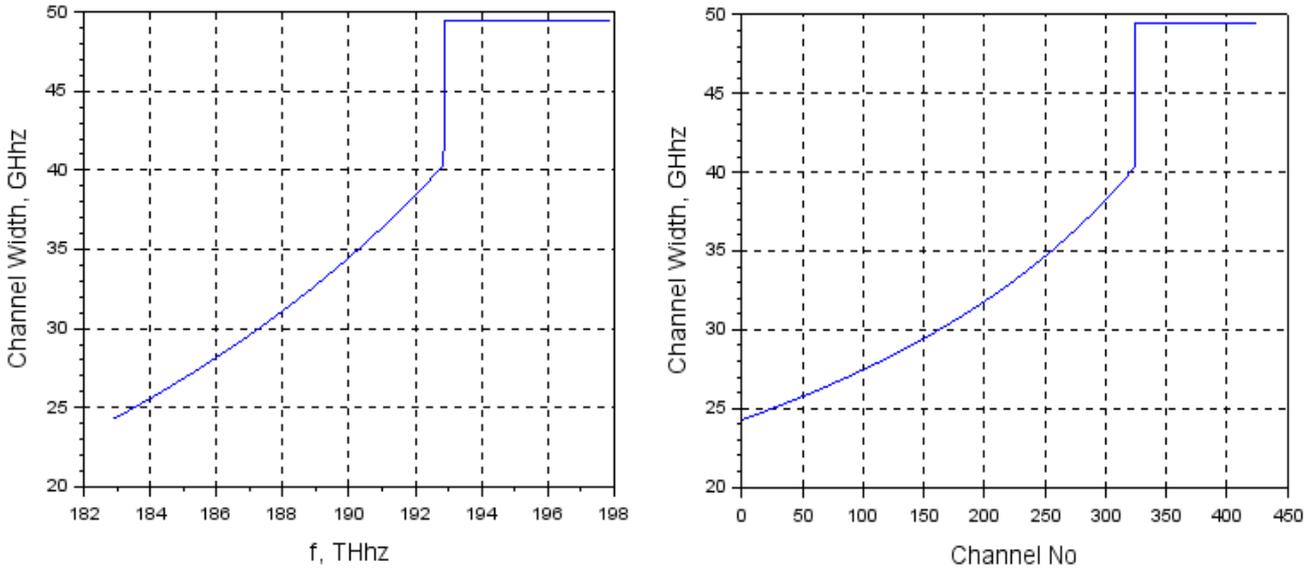


Рисунок 7 – Результаты расчета ширины полос IRFP-плана в зависимости от частоты и номера канала

Как отмечалось, рекомендации МСЭ-T [1,2] предусматривают сетки частот DWDM с разнесением 50 и 25 ГГц. Поэтому двукратную разницу между минимальной и максимальной шириной полосы отдельного канала в данном случае можно считать несущественным обстоятельством. Вместе с тем, IRFP-план делит общую полосу на большее число каналов (424 против 300 для RFP-плана). Увеличение числа каналов почти в 1,5 раза неизбежно приведет к усложнению и, соответственно, удорожанию оборудования и усложнению технической эксплуатации. С учетом этого обстоятельства, выполним расчеты для RFP-плана при равном числе каналов.

В заданной полосе частот 15 ТГц каждый из 424 каналов RFP-плана будет иметь ширину полосы 35,38 ГГц. Расчеты по той же методике дают оценки:  $W_{k,\min} = 2,174$  Гбит/с;  $W_{k,\max} = 6,318$  Гбит/с ;  $W_{\Sigma} = 921,8$  Гбит/с. Сравнение с данными табл. 2 показывает, что для равного числа каналов суммарная скорость передачи для IRFP-плана все равно примерно в 3 раза выше.

Предложенный метод разделения общей полосы частот DWDM основан на теоретических моделях и определенных характеристиках реальных ВОСП. При этом имитационное моделирование дает результаты, которые, по крайней мере, качественно совпадают с известными положениями теории нелинейной оптики.

Полученные результаты позволяют утверждать, что применение оптимальных IRFP-планов обеспечивает существенное повышение скорости передачи в многоканальных ВОСП. При этом техническая осуществимость IRFP-планов также не вызывает сомнений.

В расчетах не учтена зависимость длины квазисолитонного режима вне определенной полосы, где эта величина превышает 100 км. Полученные результаты в дальнейших исследованиях могут быть использованы для синтеза аналитических моделей, устанавливающих связь между этим параметром и характеристиками реальных ВОСП.

Наличие квазисолитонного режима существенно зависит от эффективной ширины спектра сигнала. При широком спектре дисперсия превалирует над нелинейными эффектами. Это обстоятельство является дополнительным аргументом за постепенное деление полосы частот DWDM на более узкие каналы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // Recommendation ITU-T G.694.1. – 2012. – 16 p.
2. Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces // Recommendation ITU-T G.698.1. – 2009. – 26 p.
3. Одегов Н.А. Оценки предельной скорости передачи в магистральных волоконно-оптических системах / Н.А. Одегов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2019. – № 2. – С. 61-86.
4. Балеев І.С. Методика розрахунку частотного плану рівних каналних швидкостей у смузі частот dwdm за рекомендаціями МСЕ-Т G.698.1 / І.С. Балеев при наук. кер. М.А. Одегова // Робота на Всеукраїнський конкурс наукових робіт в галузі телекомунікацій. – 2020. – 30 с.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
6. Eric Tala-Tebue, Cedric Tetchoka-Manemo, Hadi Rezazadeh, Ahmet Bekir, Yu-Ming Chu, Optical solutions of the (2 + 1)-dimensional hyperbolic nonlinear Schrödinger equation using two different methods, Results in Physics, Volume 19, 2020, 103514, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103514>.
7. Abd-Allah Hyder, Ahmed H. Soliman, Exact solutions of space-time local fractal nonlinear evolution equations: A generalized conformable derivative approach, Results in Physics, Volume 17, 2020, 103135, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103135>.
8. Célestin Kurujibwami, Roman O. Popovych, Equivalence groupoids and group classification of multidimensional nonlinear Schrödinger equations, Journal of Mathematical Analysis and Applications, Volume 491, Issue 1, 2020, 124271, ISSN 0022-247X, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2020.124271>.
9. Svetlin G. Georgiev, Khaled Zennir, Classical solutions for a class of IVP for nonlinear two-dimensional wave equations via new fixed point approach, Partial Differential Equations in Applied Mathematics, Volume 2, 2020, 100014, ISSN 2666-8181, <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2020.100014>.
10. Tadahiro Oh, Mamoru Okamoto, Tristan Robert, A remark on triviality for the two-dimensional stochastic nonlinear wave equation, Stochastic Processes and their Applications, Volume 130, Issue 9, 2020, Pages 5838-5864, ISSN 0304-4149, <https://doi.org/10.1016/j.spa.2020.05.010>.
11. Shafqat ur Rehman, Jamshad Ahmad, Modulation instability analysis and optical solitons in birefringent fibers to RKL equation without four wave mixing, Alexandria Engineering Journal, 2020, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.055>.
12. Si-Yu Du, Optical solitons and envelop propagation patterns in birefringent polarization-preserving fiber, Results in Physics, Volume 15, 2019, 102795, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102795>.
13. Tukur Abdulkadir Sulaiman, Abdullahi Yusuf, S. Abdel-Khalek, Mustafa Bayram, Hijaz Ahmad, Nonautonomous complex wave solutions to the (2+1)-dimensional variable-coefficients nonlinear Chiral Schrödinger equation, Results in Physics, 2020, 103604, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103604>.
14. Eduard N. Tsoy, Laziz A. Suyunov, Solitons of the generalized nonlinear Schrödinger equation, Physica: Nonlinear Phenomena, Volume 414, 2020, 132659, ISSN 0167-2789, <https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132659>.
15. Thilagarajah Mathanaranjan, Solitary wave solutions of the Camassa–Holm-Nonlinear Schrödinger Equation, Results in Physics, Volume 19, 2020, 103549, ISSN 2211-3797,

<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103549>.

16. Yi-Xiang Chen, Xiao Xiao, Zhen-Lin Mei, Optical soliton solutions of the (1+1)-dimensional space-time fractional single and coupled nonlinear Schrödinger equations, Results in Physics, Volume 18, 2020, 103211, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103211>.

17. Qian Guo, Jing Liu, New exact solutions to the nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients, Results in Physics, Volume 16, 2020, 102857, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102857>.

18. Zhongli Wu, Shulei Cao, Wanwei Che, Feiwen Yang, Xing Zhu, Yingji He, Solitons supported by parity-time-symmetric optical lattices with saturable nonlinearity in fractional Schrödinger equation, Results in Physics, Volume 19, 2020, 103381, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103381>.

19. Yakup Yıldırım, Anjan Biswas, Anwar Ja'afar Mohamad Jawad, Mehmet Ekici, Qin Zhou, Salam Khan, Abdullah Kamis Alzahrani, Milivoj R. Belic, Cubic-quartic optical solitons in birefringent fibers with four forms of nonlinear refractive index by exp-function expansion, Results in Physics, Volume 16, 2020, 102913, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102913>.

20. A.A. Al Qarni, A.A. Alshaery, H.O. Bakodah, Optical solitons for the Lakshmanan-Porsezian-Daniel model by collective variable method, Results in Optics, Volume 1, 2020, 100017, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.100017>.

20. A.A. Al Qarni, A.A. Alshaery, H.O. Bakodah, Optical solitons for the Lakshmanan-Porsezian-Daniel model by collective variable method, Results in Optics, Volume 1, 2020, 100017, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.100017>.

21. Педяш В.В. Усовершенствование модели распространения оптического сигнала на базе рядов Вольтерра / В.В. Педяш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С. 96-103.

22. Наний О.Е. Исследование распространения световых импульсов в оптических волокнах / О.Е. Наний, В.Г. Волков, В.Г. Воронин, В.А. Камынин. – М: МГУ. НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына. – 2011. – 25 с.

23. Султанов А.Х. Моделирование распространения WDM-сигналов в волоконно-оптической линии передачи в условиях нелинейностей и поляризационно-модовой дисперсии / А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, Р.В. Кутляров, С.В. Харитонов // Вестник УГАТУ. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2012. – Т.16, № 8 (53). – С. 29-35.

24. Одегов Н.А. Динамическое моделирование линейных и нелинейных эффектов в оптических волокнах систем передачи DWDM / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 2. – С. 150–158.

25. Одегов Н.А. Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 42–72.

#### REFERENCES:

1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // Recommendation ITU-T G.694.1. – 2012. – 16 p.

2. Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces // Recommendation ITU-T G.698.1. – 2009. – 26 p.

3. Odegov N.A. Ocenki predel'noj skorosti peredachi v magistral'nyh volokonno-opticheskikh sistemah / N.A. Odegov // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. - 2019. - № 2. – S. 61-86.

4. Baleyev I.S. Metodika rozrahunku chastotnogo planu rivnih kanal'nih shvidkостей u smuzi chastot dwdm za rekomendacijami MSE-T G.698.1 / I.S. Baleyev at nauk. ker. M.A. Odegova // Robota na Vseukraïns'kij konkurs naukovih robit v galuzi telekomunikacij. – 2020. – 30 s.

5. Agraval G. Nelinejnaya volokonnaya optika / Agraval G. – M.: Mir, 1996. – 323 s.6. Eric Tala-Tebue, Cedric Tetchoka-Manemo, Hadi Rezazadeh, Ahmet Bekir, Yu-Ming Chu, Optical solutions of the (2 + 1)-dimensional hyperbolic nonlinear Schrödinger equation using two different methods, Results in Physics, Volume 19, 2020, 103514, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103514>.

7. Abd-Allah Hyder, Ahmed H. Soliman, Exact solutions of space-time local fractal nonlinear evolution equations: A generalized conformable derivative approach, Results in Physics, Volume 17, 2020, 103135, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103135>.

8. Célestin Kurujibwami, Roman O. Popovych, Equivalence groupoids and group classification of multidimensional nonlinear Schrödinger equations, Journal of Mathematical Analysis and Applications, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2020.103135>.

Volume 491, Issue 1, 2020, 124271, ISSN 0022-247X, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2020.124271>.

9. Svetlin G. Georgiev, Khaled Zennir, Classical solutions for a class of IVP for nonlinear two-dimensional wave equations via new fixed point approach, *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*, Volume 2, 2020, 100014, ISSN 2666-8181, <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2020.100014>.

10. Tadahihiro Oh, Mamoru Okamoto, Tristan Robert, A remark on triviality for the two-dimensional stochastic nonlinear wave equation, *Stochastic Processes and their Applications*, Volume 130, Issue 9, 2020, Pages 5838-5864, ISSN 0304-4149, <https://doi.org/10.1016/j.spa.2020.05.010>.

11. Shafqat ur Rehman, Jamshad Ahmad, Modulation instability analysis and optical solitons in birefringent fibers to RKL equation without four wave mixing, *Alexandria Engineering Journal*, 2020, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.055>.

12. Si-Yu Du, Optical solitons and envelop propagation patterns in birefringent polarization-preserving fiber, *Results in Physics*, Volume 15, 2019, 102795, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102795>.

13. Tukur Abdulkadir Sulaiman, Abdullahi Yusuf, S. Abdel-Khalek, Mustafa Bayram, Hijaz Ahmad, Nonautonomous complex wave solutions to the (2+1)-dimensional variable-coefficients nonlinear Chiral Schrödinger equation, *Results in Physics*, 2020, 103604, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103604>.

14. Eduard N. Tsoy, Laziz A. Suyunov, Solitons of the generalized nonlinear Schrödinger equation, *Physica: Nonlinear Phenomena*, Volume 414, 2020, 132659, ISSN 0167-2789, <https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132659>.

15. Thilagarajah Mathanaranjan, Solitary wave solutions of the Camassa–Holm–Nonlinear Schrödinger Equation, *Results in Physics*, Volume 19, 2020, 103549, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103549>.

16. Yi-Xiang Chen, Xiao Xiao, Zhen-Lin Mei, Optical soliton solutions of the (1+1)-dimensional space-time fractional single and coupled nonlinear Schrödinger equations, *Results in Physics*, Volume 18, 2020, 103211, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103211>.

17. Qian Guo, Jing Liu, New exact solutions to the nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients, *Results in Physics*, Volume 16, 2020, 102857, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102857>.

18. Zhongli Wu, Shulei Cao, Wanwei Che, Feiwen Yang, Xing Zhu, Yingji He, Solitons supported by parity-time-symmetric optical lattices with saturable nonlinearity in fractional Schrödinger equation, *Results in Physics*, Volume 19, 2020, 103381, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103381>.

19. Yakup Yıldırım, Anjan Biswas, Anwar Ja'afar Mohamad Jawad, Mehmet Ekici, Qin Zhou, Salam Khan, Abdullah Kamis Alzaharani, Milivoj R. Belic, Cubic-quartic optical solitons in birefringent fibers with four forms of nonlinear refractive index by exp-function expansion, *Results in Physics*, Volume 16, 2020, 102913, ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102913>.

20. A.A. Al Qarni, A.A. Alshaery, H.O. Bakodah, Optical solitons for the Lakshmanan-Porsezian-Daniel model by collective variable method, *Results in Optics*, Volume 1, 2020, 100017, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rso.2020.100017>.

20. A.A. Al Qarni, A.A. Alshaery, H.O. Bakodah, Optical solitons for the Lakshmanan-Porsezian-Daniel model by collective variable method, *Results in Optics*, Volume 1, 2020, 100017, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rso.2020.100017>.

21. Pedyash V.V. Uovershenstvovanie modeli rasprostraneniya opticheskogo signala na baze ryadov Vol'terra / V.V. Pedyash // *Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova*. – 2015. – № 2. – S. 96-103.

22. Nanij O.E. Issledovanie rasprostraneniya svetovyh impul'sov v opticheskikh voloknah / O.E. Nanij, V.G. Volkov, V.G. Voronin, V.A. Kamynin. – M: MGU. NII yadernoy fiziki im. D.V. Skobel'cyna. – 2011. – 25 s.

23. Sultanov A.H. Modelirovanie rasprostraneniya WDM-signalov v volokonno-opticheskoy linii peredachi v usloviyah nelinejnostej i polarizacionno-modovoj dispersii / A.H. Sultanov, V.H. Bagmanov, R.V. Kutlyarov, S.V. Haritonoov // *Vestnik UGATU. Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'*. – 2012. – T.16, № 8 (53). – S. 29-35.

24. Odegov N.A. Dinamicheskoe modelirovanie linejnyh i nelinejnyh effektov v opticheskikh voloknah sistem peredachi DWDM / N.A. Odegov // *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tekhnichni nauki*. – 2020. – № 2. – S.150–158.

25. Odegov N.A. Osnovy teorii approksimacii opticheskikh signalov gaussovymi impul'sami / N.A. Odegov // *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tekhnichni nauki*. – 2018. – № 5. – S. 42–72.

DOI 10.33243/2518-7139-2020-1-2-70-81