

## ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ DWDM

Рассматривается алгоритмическое и программное решение задачи динамического моделирования в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП). В качестве базового метода численного моделирования используется метод разделения по физическим факторам. Особенность применяемого алгоритма сводится к линеаризации фазового коэффициента нелинейных эффектов. Параметрические установки максимально приближены к характеристикам реальных ВОСП DWDM в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т. Общий диапазон от 1460 нм до 1640 нм (приблизительно шириной 20 ТГц) в зависимости от частотного плана равномерно делится на соответствующее количество каналов. Для базовой ширины канала 25 ГГц общее количество каналов 903, тогда как для ширины канала 100 ГГц их количество 225. Модель позволяет выбирать для исследований любой частотный канал в диапазоне. При этом адекватным образом пересчитываются дисперсионные характеристики, параметры затухания и нелинейности. Моделирование выполняется для ВОСП с длиной линии от 10 км до 2000 км. Шаг моделирования может изменяться от 1 м до 10 км. Для исследований можно выбрать тип оптического волокна (ОВ) из списка стандартного ОВ и вариантов ОВ со смещенной дисперсией. В качестве начальной формы оптического сигнала можно выбирать различные варианты: сигналы Найквиста, гауссов импульс, приподнятый косинус, гиперболический секанс. Также можно задавать начальный чирпинг оптического сигнала. Также имеется возможность моделирования эффектов в многоканальных ВОСП. Количество каналов может быть 1, 3 или 5. Эффекты интерференции между импульсами моделируются пакетами импульсов от 1 до 5.

**Ключевые слова:** дисперсия, затухание, оптический сигнал, спектр, преобразование Фурье, нелинейные эффекты, расщепление по физическим факторам.

N.A. ODEGOV

Odessa National O.S. Popov Academy of Telecommunications

### DYNAMIC MODELLING OF LINEAR AND NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS OF DWDM TRANSMISSION SYSTEMS

The algorithmic and software solution of the dynamic modeling problem in fiber-optic transmission systems (FOTS) is considered. As a basic method of numerical modeling, the method of separation by physical factors is used. The peculiarity of the applied algorithm reduces to linearization of the phase coefficient of nonlinear effects. Parametric settings are as close as possible to the characteristics of real FDM DWDM in accordance with ITU-T recommendations. The total range from 1460 nm to 1640 nm (approximately 20 THz wide), depending on the frequency plan, is evenly divided into the corresponding number of channels. For a basic channel width of 25 GHz, the total number of channels is 903, while for a channel width of 100 GHz their number is 225. The model allows you to choose any frequency channel in the range for research. In this case, the dispersion characteristics, attenuation and nonlinearity parameters are adequately recalculated. Simulations are performed for FOTS with a line length of 10 km to 2000 km. The simulation step can vary from 1 m to 10 km. For research, you can select the type of optical fiber (S) from the list of standard S and options for S with bias dispersion. As the initial form of the optical signal, various options can be chosen: Nyquist signals, Gaussian impulse, raised cosine, hyperbolic secant. You can also set the initial chirping of the optical signal. It is also possible to simulate effects in multi-channel FOTS. The number of channels can be 1, 3 or 5. The effects of interference between pulses are modeled by bursts of pulses from 1 to 5. Application of the developed software and algorithmic software allows solving both educational and scientific problems. In this case, such effects are adequately modelled as: pulse distortion in the linear mode, pulse distortion and spectra in nonlinear modes. The program also allows you to simulate solution effects in organic matter.

**Keywords:** dispersion, attenuation, optical signal, spectrum, Fourier transform, nonlinear effects, splitting by physical factors.

#### Введение

Развитие средств вычислительной техники позволяет исследователям переходить от решения расчетных задач к решению задач имитационного моделирования. При этом создается принципиальная возможность наблюдать модели реальных явлений в виде процессов. В данной статье рассматривается класс задач имитационного моделирования явлений в оптическом волокне (ОВ) применительно к современным оптическим системам передачи (ВОСП).

Большинство методов моделирования эволюции сигналов в ОВ основываются на модели в форме обобщенного дифференциального уравнения Шредингера [1]. Для современных ВОСП можно ограничиться относительно простым вариантом этого уравнения:

$$\frac{\partial U}{\partial z} - j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} U = -j\gamma |U|^2 U, \quad (1)$$

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 [1] – дисперсия групповых скоростей);  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности.

В уравнении (1) параметр  $t$  (время) – это условный временной параметр. Его значения привязаны к абсолютному времени  $T$  распространения ОС вдоль ОВ соотношением между фиксированными и

«бегущими» координатами:  $t = T - z/V_{gr}$ , где  $V_{gr}$  – групповая скорость распространения ОС. Уже на этом шаге интерпретации уравнения (1) видна определенная условность: совершенно очевидно, что групповая скорость зависит от частоты. Для сигнала с более-менее широким спектром данный параметр приходится учитывать как частотно зависимую функцию. При этом значение  $t = 0$  соответствует энергетическому центру ОС, перемещающемуся с групповой скоростью  $V_{gr}(f_0)$ , где  $f_0$  – центральная (несущая) частота соответствующего канала DWDM. Зависимостью  $t(f)$  обычно пренебрегают.

Также отметим, что и коэффициент затухания является частотно зависимой функцией. В широкополосных ВОСП на больших расстояниях передачи его влияние также может стать значительным [2]. Но и этой зависимостью обычно пренебрегают. В нашем понимании любая модель является некоторым компромиссом между принятыми условностями (ограничениями, предположениями), и теми задачами, которые ставит перед собой исследователь. Хотя, абсолютно точной моделью реального явления все равно останется само это явление.

Отметим два типа целевых установок. Научные модели позволяют с относительно большой точностью моделировать реальность. Цель: открытие новых явлений. Или, скромнее, подтверждение давно уже известных фактов. Модели учебного характера должны демонстрировать основные закономерности явлений, ранее изученные наукой. Цель – убедить обучаемых, дать им взгляд на физическую картину реального мира. Две эти цели в некоторой степени противоречивы. Если исследователь может запустить некоторый вычислительный процесс «на ночь», а то и на пару недель, то в учебных целях надо ограничиваться продолжительностью одной пары занятий. Реально: демонстрации процессов на лекционных занятиях вряд ли должны продолжаться больше 1–3 минут. На лабораторных занятиях каждый наблюдаемый процесс вряд ли должен длиться больше 5–10 минут.

В данной работе рассматривается подкласс имитационных моделей – динамические модели. Их особенностью заключается в том, что процесс искажений ОС в ОБ представляется не только в его начальной и финальной стадии, а в том, что вид ОС плавно меняет свою форму при распространении вдоль ОБ. Этот, так сказать, мультфильм требует существенных вычислительных затрат. Соответственно, необходимо найти компромисс между скоростью и точностью решения задач.

Нелинейные дифференциальные уравнения (1) в общем случае не решаются аналитически. Исторически первыми численными методами их решения были конечно-разностные схемы, включая метод Рунге-Кутты. Данный класс методов при определенном выборе шага численного дифференцирования дает наибольшую точность, но приводит к очень значительным затратам времени. Современные методы сводятся к линеаризации, например, к использованию разложения функций в ряды Вольтерра [3].

Более типичным является применение метода разделения по физическим параметрам (например, [4, 5]). В этом случае последовательно выполняются операции линейных и нелинейных преобразований.

**Целью данной статьи является** разработка алгоритмического и программного обеспечения, которое позволяет решать комплекс учебных задач, а также получать качественные выводы о наблюдаемых явлениях.

### **Общее описание программы Nonlinear**

Программное обеспечение для решения поставленных задач разработано на кафедре Физики и волоконно-оптических систем передачи ОНАС им. А.С. Попова. Программы написаны на языке C# с использованием свободной платформы Visual Studio. Общий вид окна программы дан на рис. 1.

Окно содержит панель настроек и управляющих кнопок, таблицу для заполнения результатов наблюдений и два графических окна. В разных вариантах в этих окнах отображаются модули сигнала и спектральной плотности, дисперсионные характеристики и функции коэффициента затухания. Сетки графиков формируются с достаточно мелким шагом для снятия количественных значений.

Начальная форма сигналов выбирается из списка вариантов: гауссов импульс, различные варианты импульсов Найквиста, гиперболический секанс и др. Ширина полосы отдельного канала выбирается из вариантов 12,5 ГГц, 25 ГГц, 50 ГГц и ли 100 ГГц, что соответствует частотным планам DWDM по рекомендациям МСЭ-T [6]. На рис. 1 дан пример импульса Найквиста со спектральной плотностью в виде приподнятого косинуса с коэффициентом скругления 0,5.

Программа позволяет изменять масштабы оси времени и частоты в широких пределах в статическом и динамическом режиме воспроизведения.

Имеется возможность выбора одного из вариантов ОБ – стандартное ОБ (SF) и ОБ со смещенной дисперсией (NZ DSF +, NZ DSF -). Все эти варианты имеют различные дисперсионные характеристики в исследуемом диапазоне S-L-C (от 1460 нм до 1640 нм). Пример дисперсионных характеристик для ОБ типа NZ DSF+ дан на рис. 2. При выборе конкретного частотного канала отображаются фрагменты таких графиков в окрестности несущей (центральной) частоты.

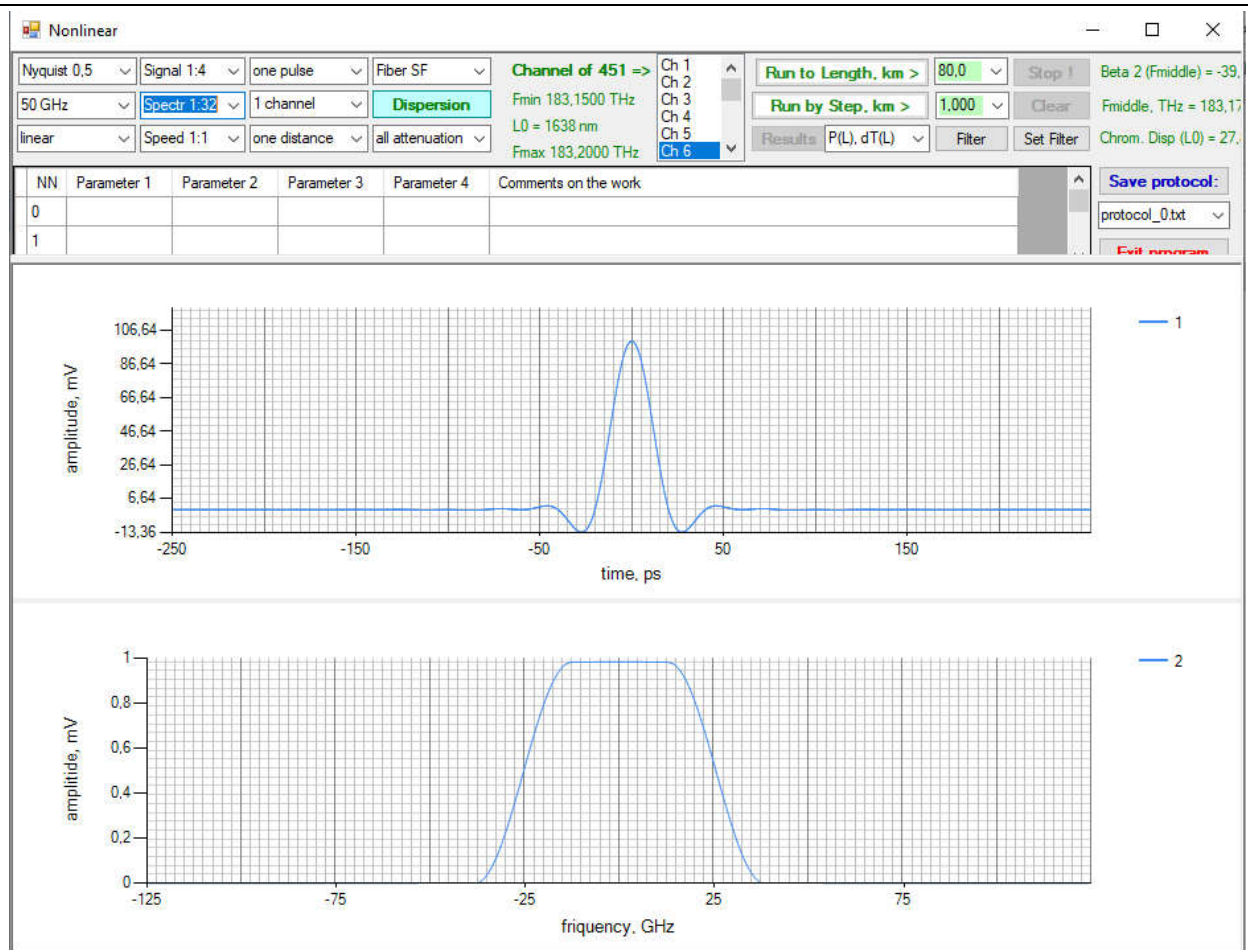


Рис. 1. Общий вид окна программы Nonlinear

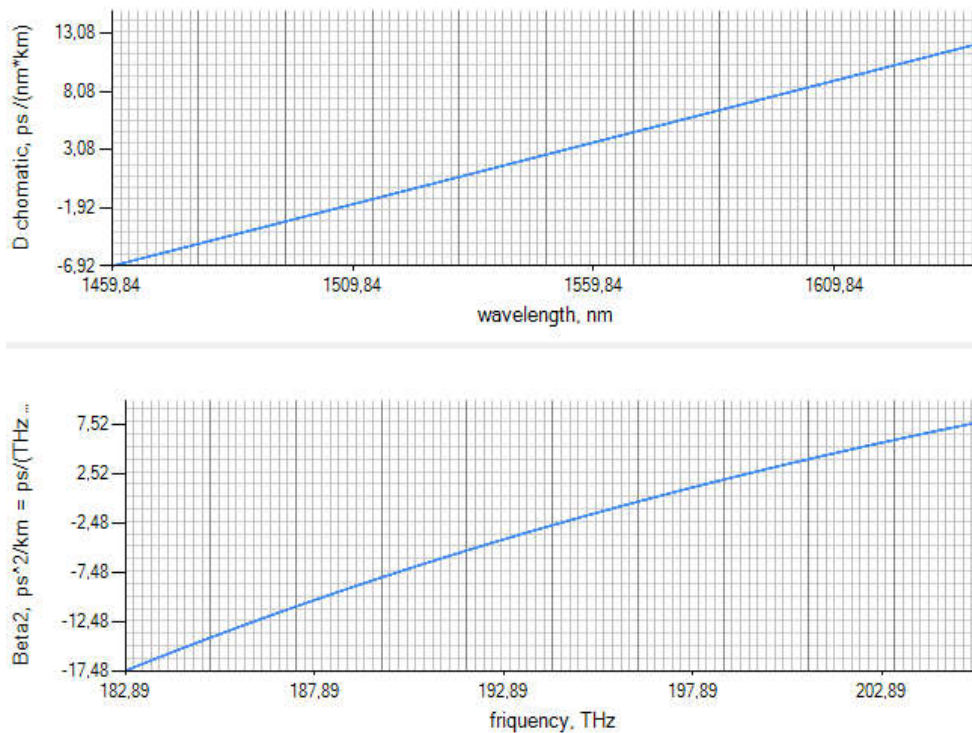


Рис. 2. Отображение дисперсионных характеристик ОВ типа NZ DSF+

Аналогично, имеется возможность отображения характеристик коэффициента затухания. Зависимость коэффициента затухания от частоты для всего диапазона дана на рис. 3

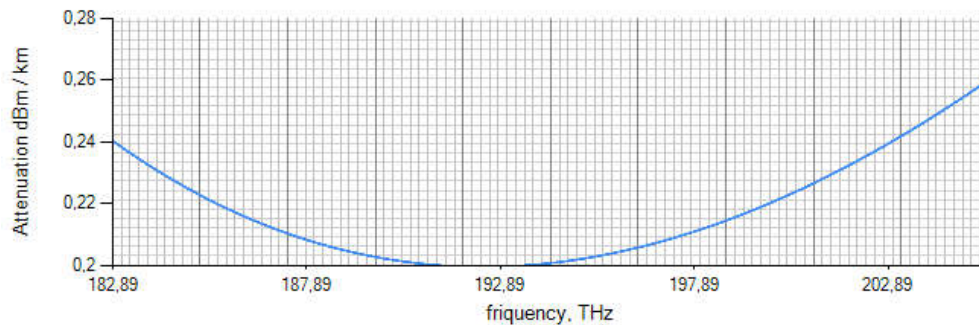


Рис. 3. Отображение коэффициента затухания от частоты

Отметим основные возможности рассматриваемой системы моделирования. Программа Nonlinear позволяет наблюдать основные эффекты линейных и нелинейных искажений ОС в ОБ, включая:

- исследование деформаций ОС вследствие дисперсии;
- исследование деформаций ОС с учетом дисперсии и неравномерности коэффициента затухания;
- наблюдение фазовой самомодуляции (ФСМ) с учетом фактора нелинейности;
- наблюдение квазисолитонного режима передачи ОС;
- наблюдение эффектов фазовой кросс-модуляции (ФКМ) и относительной задержки импульсов в многоканальных системах.

Количество каналов может быть 1, 3, 5. Для наблюдения наиболее интересных явлений этого достаточно. График спектральной плотности и амплитуды ОС для 5-канальной ВОСП дан на рис. 4.

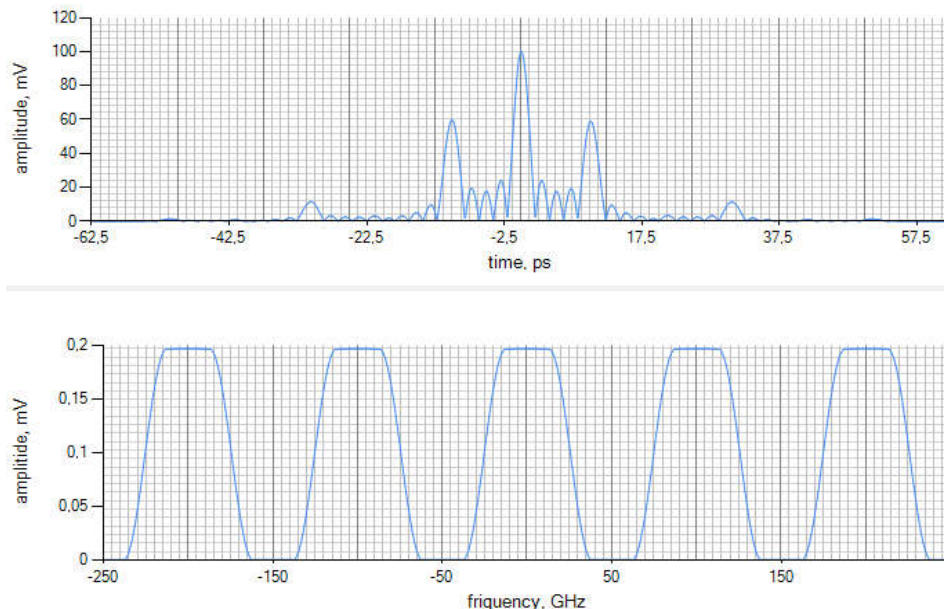


Рис. 4. Графики функций в 5-канальной ВОСП

Соответственно, во временной области можно формировать пачки импульсов одинаковой формы для исследования межимпульсной интерференции. При этом расстояния между каналами в спектральной области и между импульсами во временной области также можно изменять с различным шагом.

Значения моделируемой длины ВОСП можно устанавливать в широких пределах – от 10 км до 3000 км. Шаг моделирования можно изменять от 1 м до 10 км.

Протокол результатов, внесенный в таблицу можно сохранить в текстовом файле с разделителями табуляции. Такой файл впоследствии может быть отправлен преподавателю, например для оценки результатов лабораторной работы. Также он может быть открыт в Excel, после чего исследователь может выполнить дополнительную обработку результатов измерений.

### Особенности алгоритмического и программного обеспечения

В общем плане применяемый алгоритм не отличается от базового алгоритма расщепления по физическим параметрам [1, 4, 5].

На каждом шаге моделирования по длине ОБ  $h$  последовательно выполняются четыре оператора: сначала над сигналом во временной области  $U(t)$  выполняется быстрое преобразование Фурье (БПФ), затем полученная спектральная плотность  $G(\omega)$  преобразуется оператором линейных искажений  $D_L$ , который учитывает дисперсию и затухание, далее выполняется обратное БПФ и, наконец, во временной

области выполняется преобразование оператором нелинейных искажений  $D_{NL}$ .

Условно этот алгоритм можно записать так:

$$\begin{cases} G(\omega, z+h) = F[U(t, z)] \otimes D_L[G, \omega, h] \\ U(t, z+h) = F^{-1}[G(\omega, z+h)] \otimes D_{NL}[U, t, h] \end{cases} \quad (2)$$

где  $F$  и  $F^{-1}$  обозначают соответственно операторы прямого и обратного БПФ. Знак  $\otimes$  означает: «применить оператор», что в алгоритмических решениях сводится к комплексным умножениям на значения поворачивающих множителей.

Реализация операторов (2) требует адекватного выбора шага моделирования  $h$ . Здесь требуется компромисс между точностью моделирования и возможностями отображения образов сигналов на экране. Если ограничиться только линейными эффектами при условии  $\alpha(\omega) = \alpha(2\pi f) \approx const$ , то точность моделирования не будет зависеть от шага. В самом деле, преобразование в частотной области означает умножение спектральной плотности на коэффициент передачи  $H_L(\omega)$ :

$$G(\omega, z+h) = G(\omega, z)H_L(\omega), \quad H_L(\omega, h) = \exp(-j\beta_2(\omega)h\omega^2/2). \quad (3)$$

Разделим общую длину  $L$  линии ВОСП на  $n$  равных участков, тогда  $h = L/n$  и

$$H_L(\omega, L) = \prod_{k=1}^n \exp(-j\beta_2(\omega)h\omega^2/2) = \exp(-j\beta_2(\omega)\omega^2/2 \sum_k h) = \exp(-j\beta_2(\omega)L\omega^2/2)$$

независимо от выбора шага.

Совершенно иная ситуация при совместном моделировании линейных и нелинейных эффектов. Нетрудно убедиться, что моделировать нелинейные эффекты абсолютно точно невозможно. Речь может идти о приемлемой точности моделирования. При этом для выбранного шага необходимо сравнивать полученный результат моделирования с некоторым эталоном. Если расхождение неприемлемо, шаг следует уменьшить. Иной вопрос – а где взять эталон? В программе nonlinear с этой целью применен метод обратного преобразования, а в качестве эталона берется сигнал и его спектр в начальной фазе.

Общая длина линии делится пополам. При движении до середины линии выполняются преобразования с шагом  $h$ , затем изменяются на противоположные операторы  $D_L$  и  $D_{NL}$ . Для этого значения поворачивающих фазовых множителей изменяются на комплексно сопряженные и соответствующим образом коэффициент затухания заменяется коэффициентом усиления. В частности, зависимость (3) приобретает вид:  $H_L(\omega, h) = \exp(-j\beta_2(\omega)h\omega^2/2)$ . Шаг моделирования делится пополам и обратные преобразования выполняются с заведомо большей точностью (с шагом  $h/2$ ). Мерой точности моделирования может быть любая метрика в пространстве сигналов и спектров. В программе выбран простейший вариант линейной метрики:

$$R(U) = \int_{-T}^T |U(t,0) - U(t,L)| dt, \quad R(G) = \int_{-\Omega}^{\Omega} |G(t,0) - G(t,L)| dt. \quad (4)$$

Интегралы в зависимостях (4) вычисляются, естественно, численными методами.

Данный простой прием позволяет дополнительно продемонстрировать эффекты компенсации искажений ОС. Например, можно показать, как в волокне с противоположным знаком дисперсии выполняется полная или частичная компенсации данного фактора.

Наиболее сложный вопрос в моделировании нелинейных эффектов – опять-таки компромисс между точностью и возможностью воспроизведения в удобном масштабе времени экспозиций. Простой и достаточно точный вариант нелинейных преобразований (2) во временной области дается оператором [1]:

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

где  $\phi_{NL}(t, z)$  – фазовая функция нелинейных искажений, которая в литературе определяется разными эквивалентными способами. При этом используются разные параметры [7]. Приемлемым в нашем случае является определение [1]:

$$\phi_{NL}(t, z, h) = P(t, z)z_{eff} / L_{NL}, \quad z_{eff} = \frac{1}{\alpha}(1 - \exp(-\alpha h)), \quad P(t, z) = |U(t, z)|^2, \quad (5)$$

где  $P(t, z)$  – распределение мгновенной мощности вдоль временной оси ОС;  $z_{eff}$  – эффективная длина начального участка ОБ;  $L_{NL}$  – нелинейная длина, на которой максимум фазовой функции (5) достигает значения 1. В расчетах моделей оказалось допустимым при малом шаге использовать приближение  $z_{eff} \approx h$ , а также принять некоторую усредненную величину для разных типов ОБ в расчете на 1 км длины линии:  $\eta_{NL} = z_{eff}^* / L_{NL}^*$ . Тогда изменение фазы (5) получается в простой форме:

$$\varphi_{NL}(t, z, h) = P(t, z)\eta_{NL}h.$$

Наиболее значимым проявлением нелинейных эффектов является деформация спектра ОС, включая его расширение. Данное явление обычно представляют в виде сдвига мгновенной частоты [1, 7]:

$$\Delta\omega(t, z, h) = -\frac{\partial\varphi_{NL}(t, z, h)}{\partial t} = -\eta_{NL}h\frac{\partial P(t, z)}{\partial t}. \quad (6)$$

Реализация спектральных преобразований вида (6) требует неоправданных вычислительных затрат. В этом случае приходится выполнять нелинейные преобразования собственно частотной оси. При этом теряется точность за счет пересчета значений массива частот, а также пересчета промежуточных значений спектральной плотности. Если полагать, что изменение фазы незначительно на каждом шаге, а функции  $P(t, z)$  достаточно гладкие, то можно ограничиться разложением множителя  $H_{NL}(t, z)$  в ряд Тейлора с удержанием членов не выше первого порядка:

$$H_{NL}(t, \Delta t, z, h) = 1 + j\frac{\partial P(t, z)}{\partial t}\eta_{NL}h\Delta t \cdot \exp(jP(t, z)\eta_{NL}h). \quad (7)$$

Тогда деформация сигнала во временной области (2) выражается так:  $U(t, z + h) = U(t, z)(1 + \Delta H_{NL})$ , где

$$\Delta H_{NL}(t, \Delta t, z, h) = \frac{\partial P(t, z)}{\partial t}\eta_{NL}h\Delta t \cdot [-\sin(P(t, z)\eta_{NL}h) + j\cos(P(t, z)\eta_{NL}h)]. \quad (8)$$

Как видим, выражение (8) для приращения множителя  $H_{NL}(t, z)$  позволяет одновременно учитывать девиацию фаз, а также зависимость от производной мгновенной мощности. Последнее дает возможность исследовать нелинейные эффекты в зависимости от вида фронтов ОС.

В качестве меры длительности ОС и ширины спектра в алгоритмах предусмотрены соответственно расчетная длительность и расчетная ширина спектра (РДИ и РШС [8]). Данные оценки позволяют сравнивать параметры искажений ОС различной формы.

Среди приемов программирования, обеспечивающих высокое быстродействие, отметим: вынесение расчетов константных параметров за пределы циклов, передачу в методы больших массивов по ссылкам, а не по значениям и т.п.

Отображение промежуточных стадий динамического моделирования требует значительных затрат времени. Поэтому в программе предусмотрены варианты, когда вычисления выполняются с мелким шагом, а отображения выполняются с увеличенными в 5, 10 и 20 раз шагами.

### Модели квазисолитонных режимов в оптическом волокне

В короткой статье невозможно дать информацию обо всех эффектах, подтверждаемых или обнаруживаемых с помощью программы nonlinear, а тем более показать картину деформаций ОС в динамическом режиме. Поэтому остановимся только на одном нелинейном явлении, которое удастся моделировать – на возникновении солитонного режима передачи. Считается, что данный режим может быть в основе перспективных ВОСП с рекордной скоростью передачи [9].

Строго говоря, получить оптический солитон на более-менее большом расстоянии невозможно. В то же время, в определенных диапазонах частот вблизи точек нулевой дисперсии ОС может сжиматься [1]. Режим, в котором РДИ уменьшается вследствие компенсации дисперсии нелинейными эффектами, а далее увеличивается до начального значения можно назвать квазисолитонным режимом. При этом скорость передачи на данном расстоянии будет определяться начальной длительностью импульса.

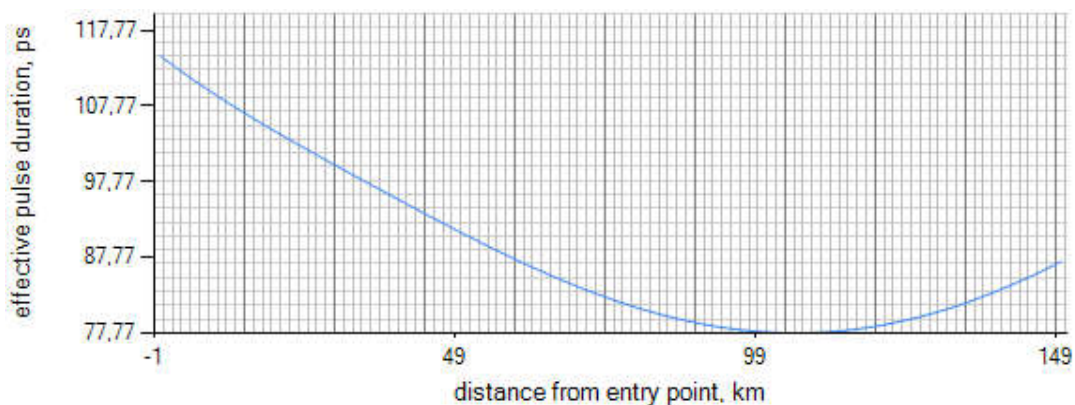


Рис. 5. Квазисолитонный режим вблизи точки нулевой дисперсии

На рис. 5 приведен график изменения РДИ для канала шириной 50ГГц в условиях небольшой дисперсии  $\beta_2 = 3,4711$  [пс/(ТГц\*км)] ( $D = -2,752$  [пс/(нм\*км)]). Начальная форма сигнала – гауссов импульс,

центральная частота  $f_0=195,325$  ТГц. Как видно, РДИ постепенно уменьшается до расстояния порядка 100 км, а затем начинает увеличиваться. Представляет интерес исследовать, на каком расстоянии и для какого диапазона частот будет наблюдаться квазисолитонный режим. Параметром для сравнения будет служить длина перекомпенсации  $L_{comp}$ , когда РДИ уменьшается.

В табл. 1 даны результаты моделирования для нескольких частотных каналов при той же начальной форме ОС.

Таблица 1

Длина перекомпенсации для каналов шириной 50 ГГц

Nк	$f_0$ , ТГц	$\beta_2$ , пс/ТГц/км	$L_{comp}$ , км	Nк	$f_0$ , ТГц	$\beta_2$ , пс/ТГц/км	$L_{comp}$
1	195,375	3,5246	115	11	195,875	4,0554	230
2	195,425	3,5781	124	12	195,925	4,1080	275
3	195,475	3,6314	126	13	195,975	4,1606	310
4	195,525	3,6847	130	14	196,025	4,2130	375
5	195,575	3,7379	140	15	196,075	4,2654	480
6	195,625	3,7910	148	16	196,125	4,3177	620
7	195,675	3,8441	160	17	196,175	4,3699	800
8	195,727	3,8970	170	18	196,225	4,4220	1600
9	195,775	3,9499	190	19	196,275	4,4741	2300
10	195,825	4,0027	220	20	196,325	4,5261	60

В табл. 1 примечателен характер увеличения длины перекомпенсации от 115 до 2300 км, после чего наблюдается резкий спад. Частота, на которой квазисолитонный режим становится незначительным в данном случае (ОВ типа NZ DSF-, РШС примерно 50 ГГц) приблизительно равна 196,325 ТГц (центральная длина волны 1528,66 нм). При этом значения коэффициентов дисперсии групповых скоростей и хроматической дисперсии составляют 4,4741 пс/(ТГц\*км) и -3,588 пс/(нм\*км). Таким образом, моделирование подтверждает теоретические выводы о том, что солитонный режим может возникать при небольшой отрицательной дисперсии [1].

Другое положение теории подтверждает рис. 6.

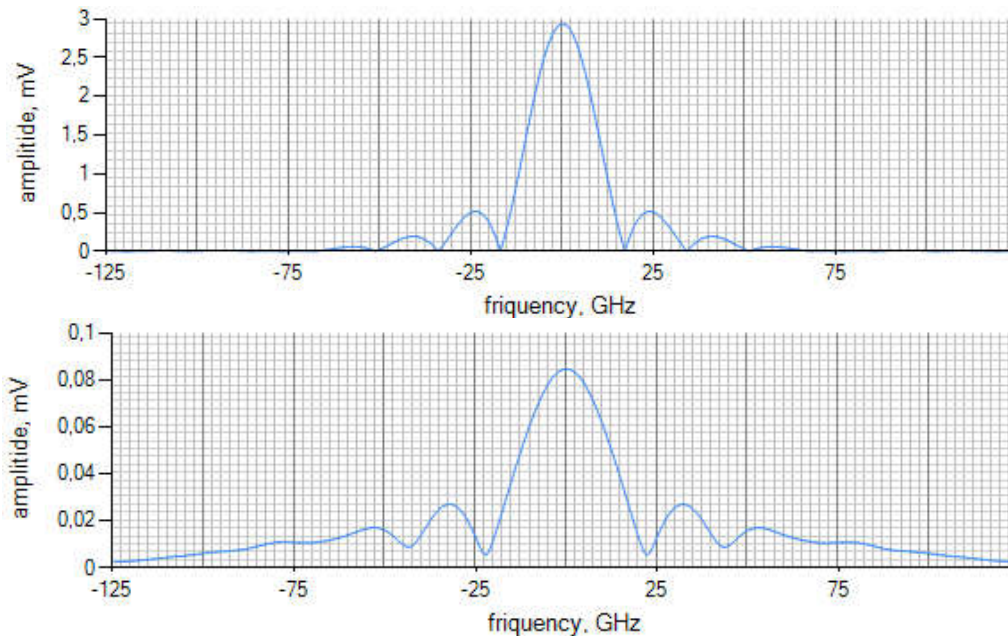


Рис. 6. Начальная и финальная форма амплитудного спектра ОС в виде приподнятого косинуса

Из последнего рисунка видно, что спектр ОС расширяется за счет нелинейных эффектов, что также согласуется с положениями теории нелинейной волоконной оптики.

### Заключення

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение реализуют метод расщепления по физическим параметрам. Особенность данной реализации метода заключается в использовании большого класса начальной формы сигналов, а также привязка к параметрам, характерным для реальных ВОСП. При этом за счет использования достаточно точной линеаризации удается наблюдать различные процессы в одноканальных и многоканальных ВОСП в режиме динамического моделирования.

Выполненные многочисленные исследования с помощью программы nonlinear подтверждают основные выводы теории нелинейной волоконной оптики. При определенных настройках модели позволяют наблюдать такие сложные явления, как солитонный режим передачи ОС.

В целом, рассматриваемые алгоритмы и программы могут использоваться как в учебных, так и в научных целях.

### Литература

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М. : Мир, 1996. – 323 с.
2. Одегов Н.А. Зависимость длительности и формы оптических сигналов от неравномерности коэффициента затухания / Н.А. Одегов, А.И. Гузун // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 1. – С. 194–203.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. Recommendation ITU-T G.694.1. 2012. 16 p.
7. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи / Э.Л. Портнов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
8. Одегов Н.А. Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 42–72.
9. Макаров Т.В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи / Т.В. Макаров. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.

### References

1. Agraval G. Nelinejnaya volokonnaya optika / Agraval G. – M. : Mir, 1996. – 323 s.
2. Odegov N.A. Zavisimost dlitelnosti i formy opticheskikh signalov ot neravnomernosti koefficienta zatuhanija / N.A. Odegov, A.I. Guzun // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – S. 194–203.
3. Pedyash V.V. Usovershenstvovanie modeli rasprostraneniya opticheskogo signala na baze ryadov Volterra / V.V. Pedyash // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. – 2015. – № 2. – S. 96–103.
4. Issledovanie rasprostraneniya svetovykh impulsov v opticheskikh voloknah / [O.E. Naniy, V.G. Volkov, V.G. Voronin, V.A. Kamynin]. – M. : MGU. NII yadernoj fiziki im. D.V. Skobelcyna, 2011. – 25 s.
5. Sultanov A.H. Modelirovanie rasprostraneniya WDM-signalov v volokonno-opticheskoy linii peredachi v usloviyah nelinejnostej i polyarizacionno-modovoj dispersii / A.H. Sultanov, V.H. Bagmanov, R.V. Kutlyarov, S.V. Haritonoov // Vestnik UGATU. Elektronika, izmeritelnaya tehnik, radiotekhnika i svyaz. – 2012. – T. 16, № 8 (53). – S. 29–35.
6. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. Recommendation ITU-T G.694.1. 2012. 16 p.
7. Portnov E.L. Opticheskie kabeli svyazi i passivnye komponenty volokonno-opticheskikh linij svyazi / E.L. Portnov. – M. : Goryachaya liniya – Telekom, 2007. – 464 s.
8. Odegov N.A. Osnovy teorii approksimacii opticheskikh signalov gaussovymi impulsami / N.A. Odegov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5. – S. 42–72.
9. Makarov T.V. Kogerentnye volokonno-opticheskie sistemy peredachi / T.V. Makarov. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2009. – 220 s.

Рецензія/Peer review : 17.05.2020 р.

Надрукована/Printed : 27.06.2020 р.

Рецензент: к.т.н. К. Л. Горященко