

На правах рукописи

Рудометова Елизавета Сергеевна

**Исследование процессов распространения сигнала в солитонных системах  
связи**

Направление подготовки  
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
направленность – Сети, системы и устройства телекоммуникаций  
программа академической магистратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
магистерской диссертации  
на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

Научный руководитель, к.-м.н.,-ф.н. доцент  
кафедры ВМиФ

В.Т. Куаньшев

Рецензент

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9.00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

Секретарь Государственной аттестационной комиссии

О.А. Шумилова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

В целях реализации Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 9 мая 2017г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» Правительством РФ в июле 2017 года была принята Программа «Цифровая экономика Российской Федерации».

Одной из главных целей Программы является создание экосистемы цифровой экономики РФ, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности и в которой обеспечено эффективное взаимодействие бизнеса, научно-образовательного сообщества, государства и граждан.

Для создания цифровой экосистемы необходимо наличие развитой информационной инфраструктуры, которая позволит обеспечить население и социально значимых организаций качественным доступом в «Интернет» с возможностью подключения на всей территории Российской Федерации, что требует создания и развития глобальной инфраструктуры передачи, обработки и хранения данных.

В настоящее время наблюдается большое увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий связи обусловлено увеличением спроса на телекоммуникационные услуги, если взять последние 20 лет, то суммарная скорость передачи информации выросла не менее, чем на пять порядков и достигла величины примерно до десятков Тбит/с. Однако, даже такие скорости передачи информации не смогут удовлетворить все возрастающие потребности пользователей Интернета, поскольку их число непрерывно растет. Быстрый рост потребления Интернет-трафика во всём мире также, в свою очередь, требует повышения пропускной способности информационных каналов.

В свою очередь, прокладка новых линий телекоммуникаций связана с большими финансовыми затратами, значит приоритетным направлением является использование новых способов передачи данных по уже имеющимся волоконно-оптическим линиям связи, что делает тему диссертации весьма актуальной в рамках реализации Программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

При этом ключевую роль в модернизации существующих линий связи и в создании будущего поколения высокоскоростных магистральных линий оптической связи играют методы математического моделирования распространения сигналов в оптическом канале связи, поскольку экспериментальные методы исследования этих систем зачастую оказываются невозможными, а возможности аналитических методов ограничиваются очень узким диапазоном простых модельных задач.

Поскольку математическое моделирование основано, прежде всего, на некотором уравнении, то есть математической модели реально физического явления, то при рассмотрении процессов распространения импульсных сигналов в оптических линиях связи широко используется нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), которое описывает эволюцию огибающей волнового пакета

при распространении в среде с дисперсией групповых скоростей и кубической нелинейностью, что характерно для прикладных задач нелинейной оптики, где уравнение НУШ широко используется для описания распространения коротких (длительностью  $10^{-12}$  с) оптических импульсов. В настоящее время такие импульсы повсеместно применяются для передачи информации на магистральных линиях связи. В этой связи нелинейное уравнение Шрёдингера активно используется для решения широкого круга инженерных оптимизационных задач в области телекоммуникаций.

**Объект исследования** – солитонные системы связи.

**Предмет исследования** – процесс распространения сигнала в солитонных системах связи.

**Целью работы** – исследование процессов распространения сигнала в солитонных системах связи, создание и тестирование алгоритмов и реализующих их программ для изучения эволюции оптических солитоноподобных импульсов в оптоволоконных линиях связи при их распространении по линиям связи.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

- 1) проведение анализа публикаций по теме исследования;
- 2) исследование сущности солитона и его развития в сфере телекоммуникаций;
- 3) анализ солитонных решений в рамках нелинейного уравнения Шрёдингера, компьютерное моделирование взаимодействия солитонов в сигнале;
- 4) исследование принципа действия и расчета основных характеристик X-ответвителя в режиме Nonlinear optical loop mirror.

**Методология и методы исследования.** Солитонное решение уравнения Кортевега-де Вриза, нелинейного уравнения Шрёдингера. Для компьютерного моделирования взаимодействия использовалась система Octave, обладающая хорошими графическими возможностями и высокоуровневым языком программирования, совместно с Matlab.

**Научная новизна работы** проведено математическое исследование основного уравнения распространения солитонов, что позволило использовать компьютерное моделирование исследуемых процессов в оптических средах с дисперсией и нелинейностью солитонных решений. В рамках нелинейного уравнения Шрёдингера исследованы солитонные решения для оптических импульсов с огибающей гауссовой формы отдельно в линейном и дисперсионном каналах волоконных линий связи.

**Практическая значимость.** Разработанные подходы к исследованию и результаты компьютерного моделирования, реализующие их программ могут быть применены для изучения волоконно-оптических линий связи, использующих сигналы в виде солитонных решений основного уравнения распространения НУШ в средах, характеризующихся дисперсией и нелинейностью.

Результаты исследований также могут быть использованы для модернизации существующих линий оптической связи при создании сверхскоростных солитонных линий связи.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- 1) результаты теоретического анализа взаимодействия двух солитонов.
- 2) листинг моделирования взаимодействия двух солитонов.
- 3) влияние дисперсии на распространение солитонного импульса.
- 4) распространение двух солитонов различной амплитуды.
- 5) взаимодействие двух солитонов.
- 6) упругое взаимодействие двух солитонов различной амплитуды.
- 7) эволюция мгновенной мощности сигнала на различных расстояниях, кратных длине LD.
- 8) Конфигурация петлевого зеркала.
- 9) графический результат передаточной функции  $|E_{02}|^2 / |E_{IN}|^2$  через входную мощность в киловатт-метрах.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается применением мощного математически-ориентированный синтаксиса со встроенными средствами построения графиков и визуализации при моделировании и исследовании системы Octave свысокоуровневым языком программирования. Тактика проведения исследования обусловлена методами, которые рассмотрены в публикациях. Также, результаты проведения исследования процесса распространения сигнала в солитонных системах связи сформированы согласно техническим требованиям.

### **Апробация результатов.**

- 1) материалы XX студенческой научно-практической конференции УрТИСИ СибГУТИ, II этап, «Солитонные сети», г. Екатеринбург, 2019 г.
- 2) материалы XXI студенческой научно-практической конференции УрТИСИ СибГУТИ, I этап, «Практические вопросы расчета многопортовых ответвителей в солитонных линиях связи», г. Екатеринбург, 2019 г.
- 3) материалы XXI студенческой научно-практической конференции УрТИСИ СибГУТИ, I этап, «Исследование процесса распространения сигнала в солитонных системах передачи», г. Екатеринбург, 2019 г.
- 4) материалы VI Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии и когнитивная электросвязь» (заочная форма проведения, сроки приема статей продлены до 08 июня 2020 г.), УрТИСИСибГУТИ, «Расчет передаточной функции X-ответвителя в режиме нелинейной токовой петли», г. Екатеринбург, 2020г.

По теме диссертации опубликовано 4 научные работы в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ.

По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 46 наименований. Объем диссертации 85 листов, включены также 15 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы магистерской диссертации, определены объект и предмет исследования, приведены цель и задачи работы, описаны научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе «Анализ публикаций по теме исследования»** проведен обзор литературы, связанный с темой исследования, и сделаны следующие выводы. Множество ученых вносили свой вклад в науку о солитонах: В.А. Алешкевич, А.Б. Шабата, R. Stolen, K. Shimoura и другие. Они рассматривали экспериментальные подтверждения возможности использования солитонов для передачи информации в волоконно-оптических линиях передачи. Также, учеными С.К. Турициной, И.Р. Габирова, Е.Г. Шапиро и другими были созданы математические теории нелинейного распространения волн в системах с дисперсионными управлениями. Вышеупомянутые работы благотворно повлияют на исследование процессов распространения сигнала в солитонных системах связи в данной диссертационной работе.

Филиппов А.Т., Слепов Н.Н., Хасэгава А., Гордон Г.И., Заркевич Е.А., Мишнаевский П.А. и другие деятели науки сделали огромный вклад в изучение и продвижение в реализацию солитона как явления, которое способно улучшить качество передаваемой информации в волоконно-оптических системах передачи данных. Таким образом, говоря о проблеме генерации и распознавания солитонных состояний, необходимо разобраться, как можно увеличить скорость передачи данных по волокну. В данной исследовательской работе будет разобран способ использования оптических волокон с синусоидальным изменением дисперсии.

В книге Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П. Питаевский Л.П. «Теория солитонов: метод обратной задачи», где рассматриваются такие темы, как солитон и его история, аспекты солитонной физики, двойное уравнение синуса-Гордона: система, имеющая физические приложения, нелинейная решетка, прямые методы в теории солитонов, обратное преобразование рассеяния, метод обратной задачи рассеяния и так далее. Инфельд Э., Роуландс Дж. Описали в издании «Нелинейные волны, солитоны и хаос» линейную теорию волн и неустойчивостей в безграничной среде, конвективные и неконвективные неустойчивости, групповая скорость в неустойчивых средах. Также в нем говорится о модельных уравнениях для волн малой амплитуды и солитонов.

Что касается непосредственной базы для понимания, она раскрывается Додд Р., Эйлбек Д., Гиббон Д. в монографии учебного плана «Солитоны и нелинейные волновые уравнения», где довольно четко и понятно солитоны как физическое явление и связанная с ними математика излагаются авторами на основе трех классических моделей, описываемых уравнением Кортевега-де Фриза, так называемым уравнением синус-Гордона и нелинейным уравнением Шрёдингера. В последних двух главах уточняются области применимости интегрируемых моделей и обсуждаются результаты численных экспериментов для уравнений, близких к интегрируемым.

Оптические солитоны могут распространяться только в световоде с небольшим, но конечным значением дисперсии. Однако оптического волокна, сохраняющего требуемое значение дисперсии во всей спектральной ширине многоканального передатчика, просто не существует. А это делает «обычные» солитоны непригодными для использования в сетях с длинными линиями передачи.

Подходящая солитонная технология создавалась в течение ряда лет под руководством Линна Молленауэра, ведущего специалиста Отдела оптических технологий все той же фирмы «Белл». В основу этой технологии легла разработка оптических волокон с управляемой дисперсией, позволившая создать солитоны, форма импульсов которых может поддерживаться неограниченно долго.

Метод управления состоит в следующем. Величина дисперсии по длине волоконного световода периодически изменяется между отрицательным и положительным значениями. В первой секции световода импульс расширяется и сдвигается в одном направлении. Во второй секции, имеющей дисперсию противоположного знака, происходят сжатие импульса и сдвиг в обратном направлении, в результате чего его форма восстанавливается. При дальнейшем движении импульс опять расширяется, затем входит в следующую зону, компенсирующую действие предыдущей зоны, и так далее – происходит циклический процесс расширений и сжатий. Импульс испытывает пульсацию по ширине с периодом, равным расстоянию между оптическими усилителями обычного световода – от 80 до 100 километров. В результате, по заявлению Молленауэра, сигнал при объеме информации более 1 терабита может пройти без ретрансляции по меньшей мере 5-6 тысяч километров со скоростью передачи 10 гигабит в секунду на канал без каких-либо искажений. Подобная технология сверхдальней связи по оптическим линиям уже близка к стадии реализации.

Изучив источники по теме диссертации и, несмотря на довольно масштабное количество литературы, было выявлено, что изданий, описывающих многопортовые ответвители, их принцип действия, расчет параметров, оказалось немного. Следовательно, в данной исследовательской работе также рассмотрены вопросы солитонного решения уравнения Кортевега-де Вриза, многосолитонные решения уравнения КдВ и моделирование взаимодействия солитонов, линейный канал связи для анализа процесса распространения солитона при линейных условиях. Также описан пример передачи информации с помощью солитоноподобных импульсов гауссовой формы, бездисперсионный канал связи для рассмотрения фазовой самомодуляции, проанализируются вышеперечисленные пункты и исследуется принцип действия и расчет основных характеристик X-ответвителя в режиме Nonlinear optical loop mirror.

**Во второй главе «Открытие и сущность солитона»** исследованы параметры, влияющие на солитонный сигнал. Определено происхождение солитона. Рассмотрено математическое решение уравнение Шреденгера, описывающее физический сигнал солитона в системе передачи. Также были исследованы виды солитонов, их общность и различия.

В математике и физике солитон – это одиночная волна (импульс), которая сохраняет свою форму и скорость при прохождении через среду. Солитоны

создаются тогда, когда нелинейные и дисперсионные эффекты среды взаимно уравнивают друг друга. Солитоны той или иной формы могут существовать во многих средах в виде различных волн. Одним из таких солитонов является электромагнитная волна, движущаяся в диэлектрической среде. Многие эксперименты были проведены с использованием солитонов в волоконно-оптической связи, такие как оптические солитоны, которые часто сокращаются до просто «солитонов».

Существует два типа оптических солитонов, а именно пространственные и временные солитоны. Пространственные солитоны – это непрерывные волны или импульсы, которые поддерживают баланс между дифракцией и оптическим эффектом Керра (нелинейный эффект). Показатель преломления среды изменяется в зависимости от поперечного профиля интенсивности пучка и, таким образом, действует как волновод для пучка (аналогично градуированному индексному волокну). Если это поле также является распространяющейся модой волновода, то оно будет оставаться ограниченным и распространяться без изменения формы.

Обычно существует три основных типа дисперсий для импульса, проходящего через оптоволоконный кабель. Это хроматическая дисперсия, интермодальная дисперсия и поляризационная модовая дисперсия. Интермодальная дисперсия обусловлена различными модами, имеющими различную групповую скорость, и ее можно устранить с помощью одномодовых волокон. На практике большинство дальнемагистральных волоконно-оптических систем связи используют одномодовые волокна. Хроматическая дисперсия далее делится на материальную дисперсию и волноводную дисперсию.

Из-за дисперсии материала спектральные компоненты импульса, содержащие числа различных частот, перемещаются с разной скоростью, поскольку они эффективно испытывают различные показатели преломления из-за дисперсии. Некоторые частоты приходят раньше других, заставляя импульс «вибрировать», и в целом ширина импульса расширяется, смотрите рисунок 1. На рисунке 1 под пунктом а) показана флуктуация длины волны в аномальной дисперсионной среде, в которой высокие частоты перемещаются быстрее, и под пунктом б) – нормальная дисперсионная среда, в которой низкие частоты перемещаются быстрее. В обоих случаях пульс расширяется.

Одним из подходов в современной волоконно-оптической связи является использование дисперсионного компенсационного волокна, представляющего собой сегменты волокон, предназначенные для того, чтобы иметь параметр  $D$ , имеющий противоположный знак. В этом случае импульс испытывает периодическое расширение и сжатие по мере своего распространения. Временные солитоны также могут быть использованы для смягчения этой проблемы, поскольку можно создать импульс, который не будет изменять свою форму по мере распространения по волокну. Именно на это и будет направлен данный проект.

Вторая форма хроматической дисперсии – это волноводная дисперсия, при которой некоторое количество света перемещается в оболочковом слое вместо ядра.



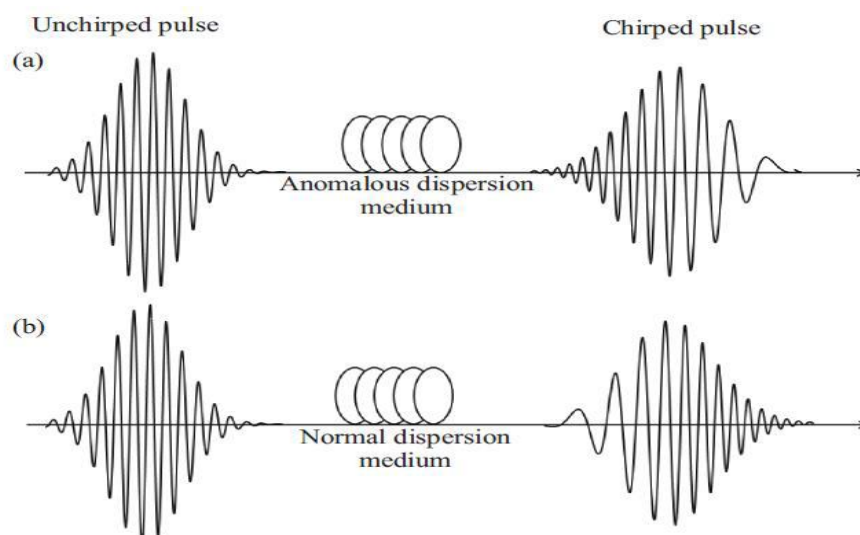


Рисунок 1 – Перемещение спектральных компонентов импульса

Дисперсия происходит потому, что свет движется быстрее в оболочке с более низким показателем преломления, чем в ядре с более высоким индексом. Степень дисперсии зависит от доли света, проходящего в оболочке относительно того, что проходит в ядре.

Одним из подходов в современной волоконно-оптической связи является использование дисперсионного компенсационного волокна. Нелинейное уравнение Шредингера может описывать как временные, так и пространственные солитоны. На самом деле, пространственные солитоны – это просто двойственные временные солитоны, причем переменные в уравнениях принимают аналогичные значения параметры. Тогда как для временных солитонов огибающая является функцией  $z$  и  $t$ , где дисперсия групповой скорости вызывает искажение при увеличении  $t$ . Интуитивно понятно, что для пространственных солитонов огибающая должна быть функцией  $z$  и  $x$  (одного из поперечных направлений), а дифракция (или пространственная дисперсия) вызывает искажение в поперечных направлениях. Опять же, вывод состоит в том, что в этих солитонах существует четко определенная форма огибающей поля и зависимость между шириной импульса  $X_0$  и амплитудой поля  $Q_0$ . Предполагается, что оптическое поле является квазимонохроматическим, а это означает, что спектр импульсов, центрированный на несущей частоте  $\omega_0$ , имеет полосу пропускания  $\Delta\omega$ , такую, что  $\Delta\omega \ll \omega$ . Это хорошее приближение для  $\omega_0 \sim 10^{15}$  рад/с импульсами столь же короткими, как 0,1 пс. Поскольку основной проблемой при передаче с высокой пропускной способностью является дисперсия групповой скорости, а не пространственная, происходит ограничение. Поскольку оптическое поле внутри оптоволоконного кабеля уже пространственно ограничено. Хотя теоретически дальнейшее увеличение пространственного ограничения может привести к уменьшению дисперсии волноводов.

**В третьей главе «Экспериментальная часть»** приведены с подробным выводом аналитические выражения, описывающие процессы распространения гауссовских импульсов по одномодовым ОВ в линейном приближении. Их

правильность подтверждена многочисленными теоретическими исследованиями и моделированием.

Проанализированы различные параметры линейного тракта квазисолитонных высокоскоростных волоконных оптических сетей связи. Проведено их моделирование в широком диапазоне изменения расстояний, параметров источников сигнала с полученной частотной модуляцией в результате распространения по оптоволокну и различными мощностями.

Подтверждено, что качество связи в таких оптоволоконках практически не зависит от формы оптических импульсов при передаче информационного сигнала, то есть это могут быть секансные (солитонные решения уравнения Кортевега-де Вриза) и гауссовские импульсы одинаковой длительности, что также согласуется с результатами работы.

Точные аналитические решения, приведенные выше, необходимы для проверки правильности численного моделирования. При этом для этих выражений выполняется проверка сохранения интегралов движения, то есть закон сохранения энергии.

В настоящее время подобные импульсы применяются для передачи информации на магистральных линиях связи. Поскольку современные технологии характеризуются быстрым ростом потребления Интернет-трафика, то во всём мире актуальной проблемой является повышение пропускной способности информационных каналов. Подход к этой задаче путем экстенсивного решения, то есть прокладки новых линий телекоммуникаций, связан с большими финансовыми затратами. Поэтому приоритетным направлением является использование новых способов передачи данных по уже имеющимся волоконно-оптическим линиям связи.

Солитон распространяется в оптическом волокне без искажения формы, следовательно, его можно рассматривать как естественный «бит» информации. Световой импульс, имеющий форму, немного отличающуюся от солитонной, может эволюционировать к ней в процессе распространения, что является актуальным для современных систем связи.

Таким образом, солитон имеет большое значение для нужд волоконной связи на сверхдальние расстояния, поэтому возникает необходимость четкого математического описания процессов и ясной формулировки физических принципов, лежащих в основе данных явлений.

При решении какой-либо физической задачи сначала происходит ввод данных, а затем на основании данных решаются математические уравнения для данной системы. Более сложной задачей оказывается получение точных решений таких нелинейных уравнений.

Математические модели, описывающие задачи распространения уединенных солитоноподобных импульсов, представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, обладающие солитонными решениями. Одной из разновидностей солитонов или солитоноподобных решений являются кинки (от английского kink – перегиб). Формально кинк можно рассмотреть, например, как решение, описываемое гиперболическим тангенсом, таких известных нелинейных уравнений в частных

производных, как уравнение Кортевега-де Вриза. Важность нелинейного уравнения Шредингера как математической модели распространения импульсных сигналов малой длительности в последние годы связана с тем, что исследование оптических солитонов в волоконных световодах переместилось в область более коротких, фемтосекундных импульсов, используемых для решения широкого круга инженерных оптимизационных задач в области телекоммуникаций.

Если фазовая скорость волны не совпадает с групповой, то такую среду называют средой с дисперсией, или диспергирующей средой. При наличии дисперсии монохроматические волны разных частот распространяются с разными скоростями. Так как любую сложную по форме некогерентную волну с произвольным профилем можно представить с помощью разложения в ряд или интеграла Фурье как сумму монохроматических волн, то в диспергирующей среде, где эти монохроматические составляющие распространяются с различными скоростями, их сумма в различные моменты времени будет давать различные профили некогерентной волны. Дисперсия, как и нелинейность, приводит к искажению профиля распространяющейся волны.

Одновременный учет дисперсии и нелинейности приводит к уравнению Кортевега-де Вриза (КдВ), что обусловило универсальность этого уравнения при моделировании волновых процессов различной физической природы с учетом дисперсии и слабой нелинейности.

Для волнового решения уравнения КдВ предполагаем, что искажение профиля волны вследствие нелинейности может быть скомпенсировано изменением профиля распространяющейся волны, вызванным эффектами дисперсии. Поэтому, учитывая возможность такой компенсации, находим решение уравнения КдВ в виде бегущей волны со стационарным профилем.

В численном эксперименте с применением ЭВМ, выполненном в 1965 г. М. Крускалом и М. Забуски, было исследовано «столкновение» двух солитонов с разными амплитудами, когда быстрый солитон обгоняет медленный. Оказалось, что по мере сближения в результате взаимодействия солитоны начинают обмениваться амплитудами и скоростями. При этом быстрый солитон как бы проходит сквозь медленный без нарушения их формы. После столкновения возникают точно такие же по форме солитоны, что и до столкновения. Это свойство солитонов сохранять свою форму при взаимодействиях позволяет назвать солитон «частицеподобным» решением уравнения КдВ. При этом процесс взаимодействия солитонов можно описать точным аналитическим решением уравнения КдВ.

Для компьютерного моделирования взаимодействия использовалась система Octave, обладающая хорошими графическими возможностями и высокоуровневым языком программирования. В листинге показан основной фрагмент программы моделирования взаимодействия двух солитонов. Численный метод, используемый в программе решения уравнения КдВ, основан на применении преобразования Фурье.

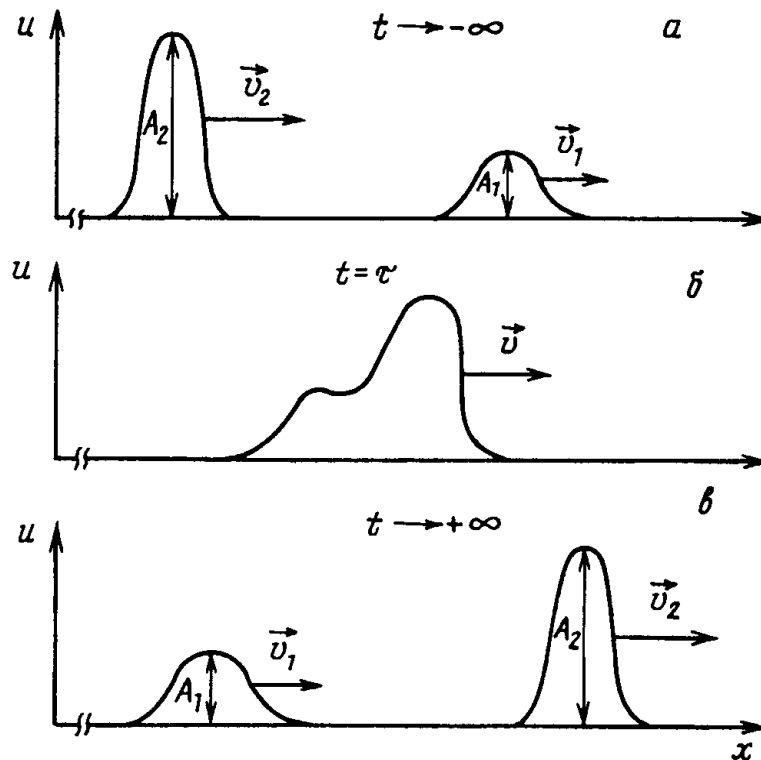


Рисунок 2 – Результаты теоретического анализа взаимодействия двух СОЛИТОНОВ

Листинг моделирования взаимодействия двух солитонов:

```
function u_now = tstep(u_now, dt, N);
% u_t = - u_xxx + Non where Non = - 6 u u_x
% d/dt u_k = i*k^3 u_k + Non_k
% u_k(t) = u_k(0) exp(ik^3 t) + int_0^t exp(ik^3 (t-s)) Non_k(s) ds
% u_0_new = u_0_now.
    Non = -3*u_now.^2;
    Non = fft(Non);
    Non(1) = 0;
    for k=1:(N/2-1)
        Non(1+k) = i*k*Non(1+k);
        Non(N-k+1) = -i*k*Non(N-k+1);
    end
    v = fft(u_now);
    for k=1:(N/2-1)
```

```

v(1+k) = v(1+k)*exp(i*k^3*dt) + i/k^3*Non(1+k)*(1-exp(i*k^3*dt));
v(N-k+1) = v(N-k+1)*exp(i*(-k)^3*dt) + i/(-k)^3*Non(N-k+1)*(1-exp(i*(-k)^3*dt));
end

```

Результаты моделирования показаны на рисунках 3-7. На рисунке 3 показан одиночный солитон с большой амплитудой.

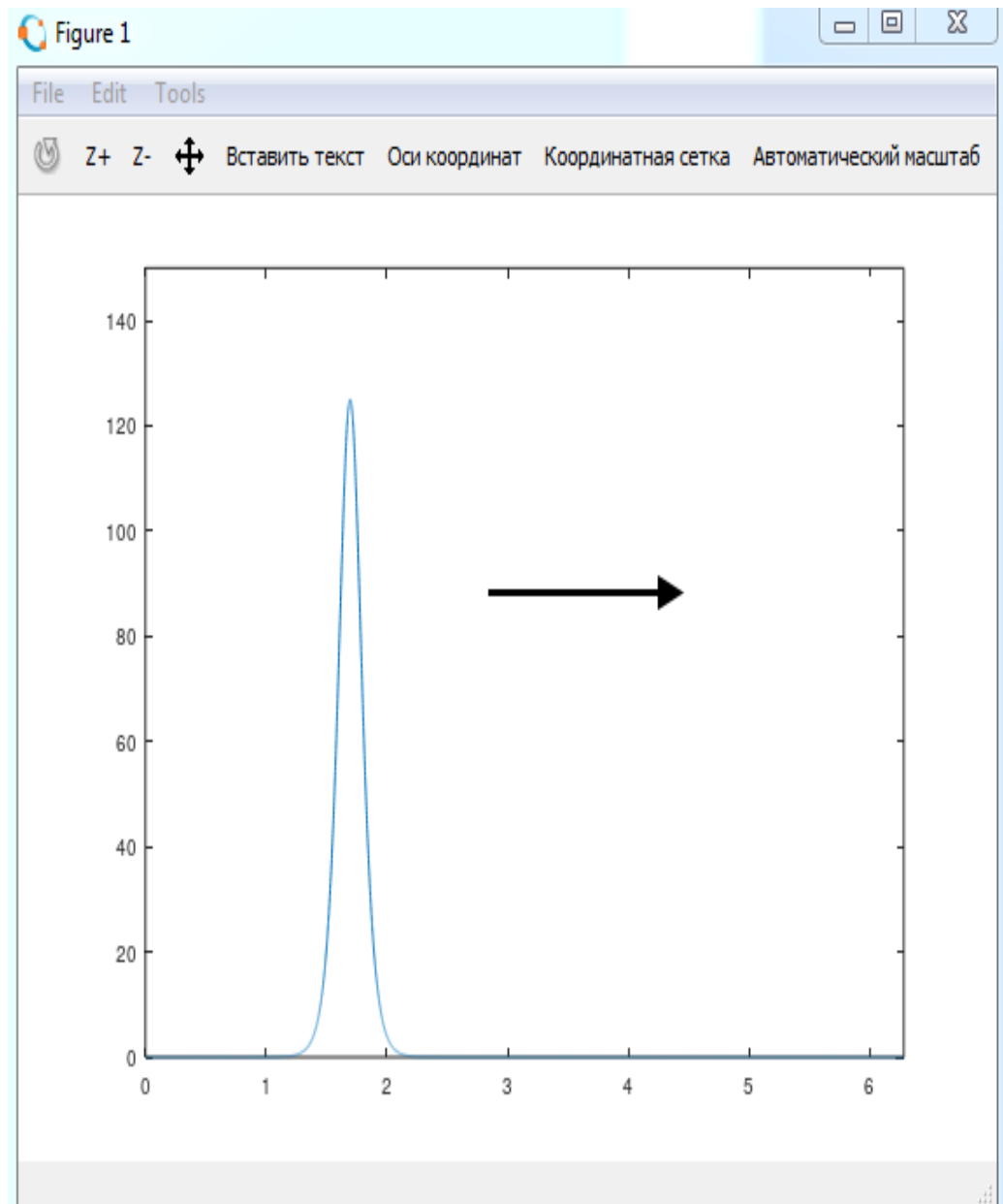


Рисунок 3 – Одиночный солитон (движение импульса слева)

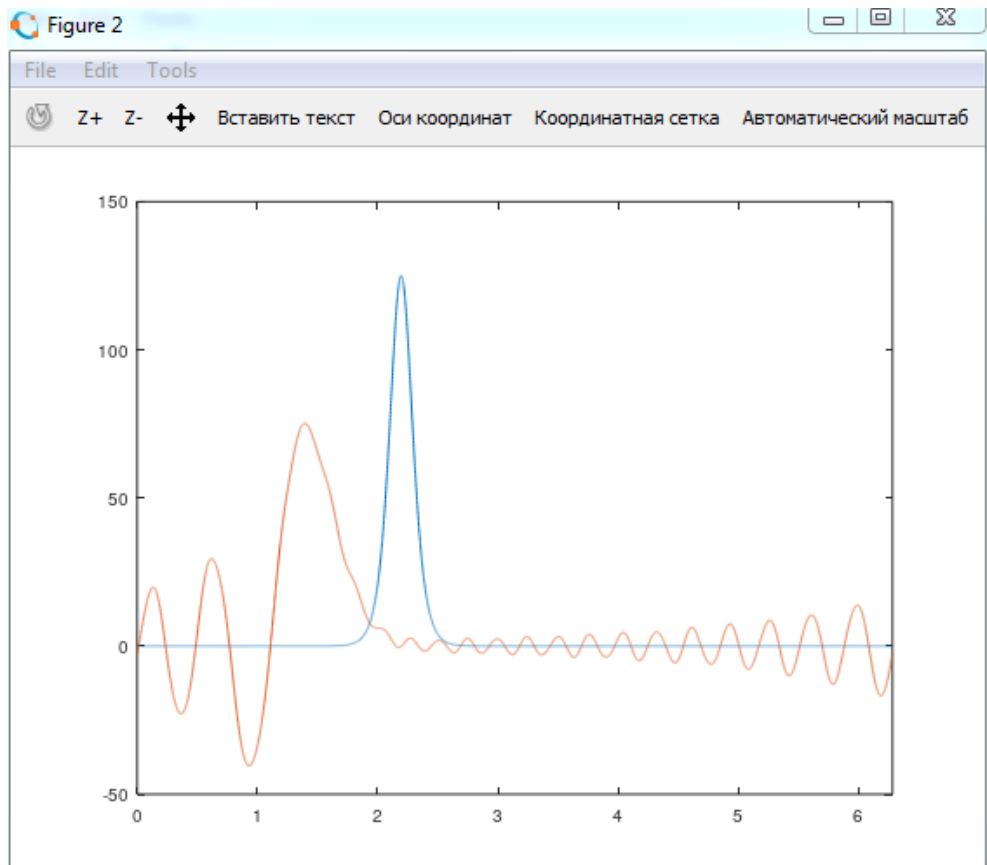


Рисунок 4 – Влияние дисперсии на распространение солитонного импульса

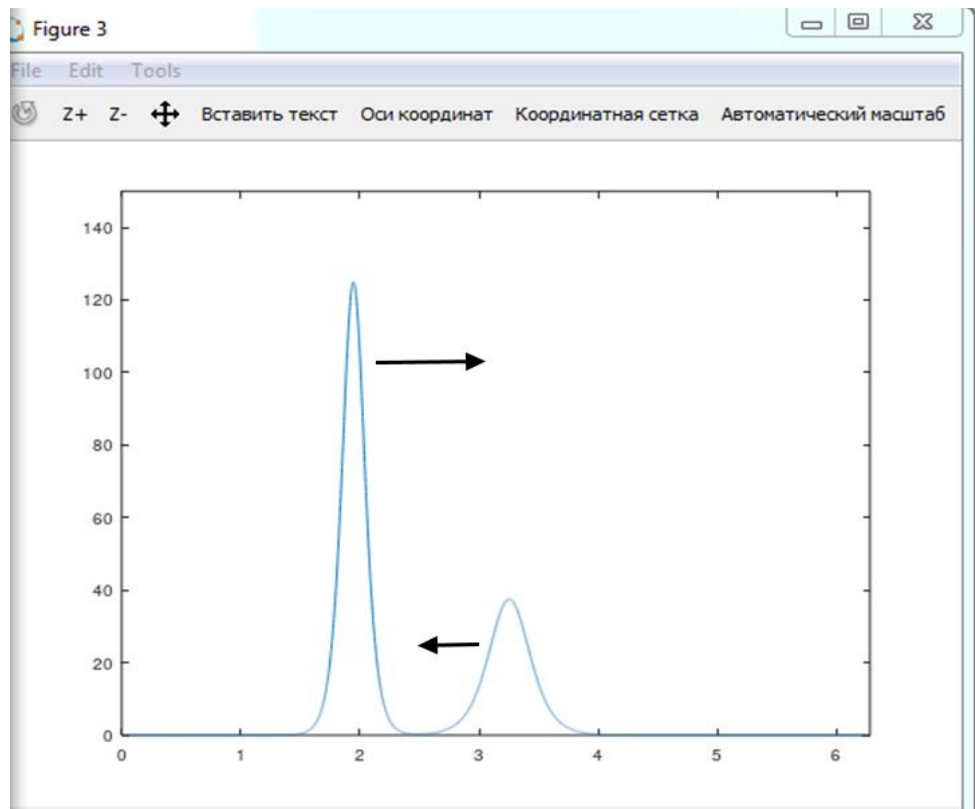


Рисунок 5 – Распространение двух солитонов различной амплитуды

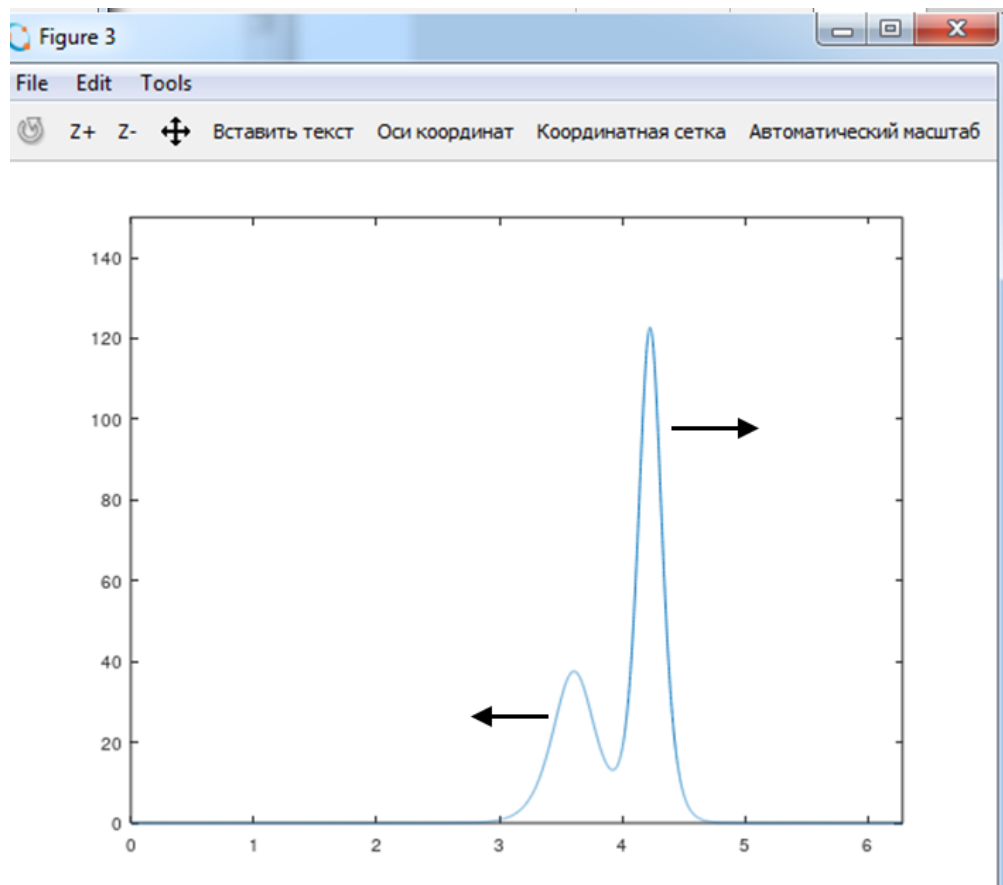


Рисунок 6 – Взаимодействие двух солитонов

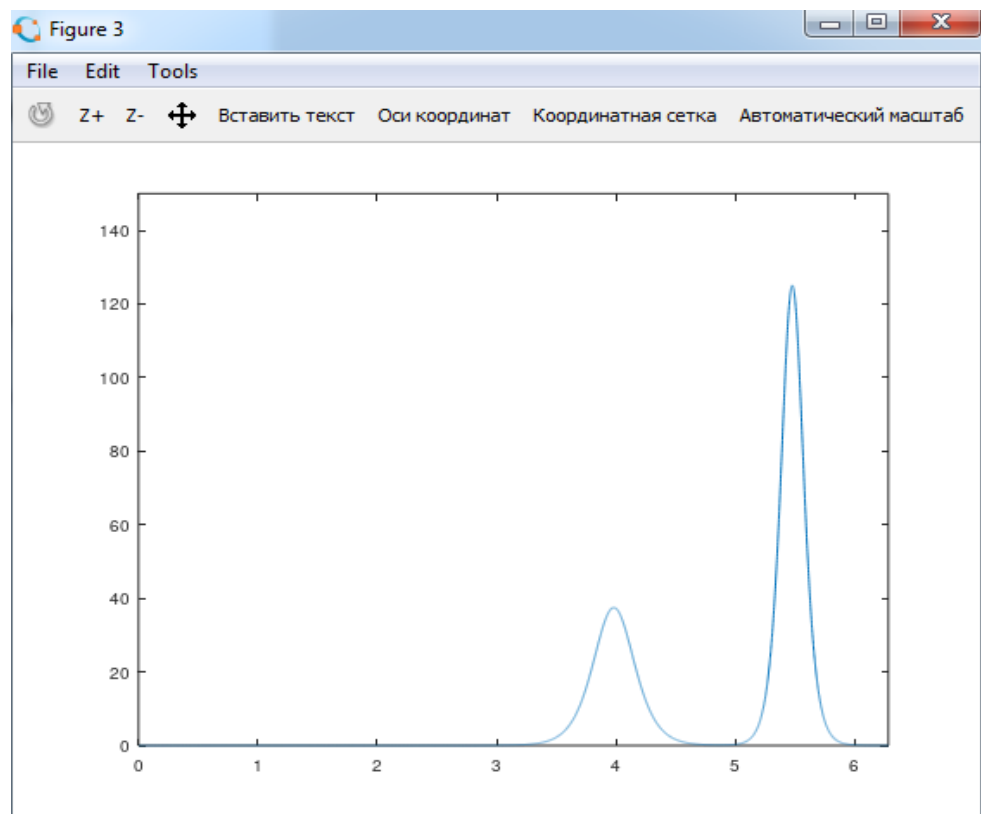


Рисунок 7 – Результат упругого взаимодействия двух солитонов различной амплитуды

Физически уравнение НУШ описывает эволюцию огибающей волнового пакета  $A(t)$  при распространении в среде с дисперсией групповых скоростей и кубической нелинейностью.

В отличие от многих других уравнений математической физики, описывающих эволюцию состояния некоторой системы во времени, начальные условия для НУШ ставятся при  $z = 0: A(0, t) = A_0(t)$ , но при этом в роли эволюционной координаты выступает  $z$  – расстояние, пройденное волновым пакетом (солитоном) в среде (например, волоконно-оптической линии связи).

При этом аналитические решения задачи Коши для уравнения НУШ могут быть получены лишь в относительно узком классе частных случаев с помощью метода обратной задачи рассеяния. В общем случае произвольных начальных условий для решения уравнения НУШ используют численные методы.

Вначале рассмотрим основные предельные случаи, допускающие построение точного решения, что необходимо для понимания физики явлений, описываемых уравнением НУШ, и верификации результатов численного моделирования на примере реальной практической задачи.

Рассмотрим распространение оптических импульсов в линейном канале связи и практическую задачу на примере передачи информации по оптоволокну с помощью солитоноподобных импульсов гауссовой формы. Эволюция мощности импульса гауссовой формы для различных значений расстояния  $z$  показывает, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе, если учитывать, что в нашем случае значение пиковой мощности составляет  $\gamma \frac{|\beta_2|}{\tau_0^2} \approx 0,26$  мВт. Учитывая, что сигнал вводился в оптическое волокно без начальной частотной модуляции, которую он приобретал при распространении в волокне, то влияние ЧМ не оказывает существенного влияния на качество связи.

Используя метод обратной задачи рассеяния, можно получить аналитическое решение уравнения ещё в одном частном случае, когда нелинейный и дисперсионный масштабы длины в точности равны. В случае аномальной дисперсии групповых скоростей ( $\beta_2 < 0$ ), дисперсия и нелинейность компенсируют друг друга для оптических солитонов – импульсов с огибающей в форме гиперболического секанса.

**В четвертой главе «Принцип действия и расчет основных характеристик X-ответвителя в режиме Nonlinear optical loop mirror»** проработан принцип действия и расчет основных характеристик X-ответвителя и выяснено, что солитоны генерируются совместным действием фазовой самомодуляции и дисперсии в режиме дисперсии групповой скорости в оптическом волокне. Точный солитон (солитон, являющийся точным аналитическим решением уравнения Кортевега-де Вриза (КдВ) и выраженный через функцию гиперболического косинуса, не изменяет форму при распространении через волокно, но приобретает фазовый сдвиг, пропорциональный пройденному расстоянию. Но если импульс не является точным солитоном, эффекты дисперсии могут быть приблизительно уравновешены нелинейностью, и поэтому импульс с амплитудой и формой, близкими к соответствующим параметрам точного солитона, не будет существенно меняться при распространении.



Из приведенных численных решений задачи распространения видно, что импульсы в солитонном режиме, амплитуды которых не соответствуют солитонам, получают набег фазы, пропорциональный расстоянию. Поэтому можно предположить, что если амплитуда импульса рассматриваемого устройства достаточна для создания этих солитонных эффектов, тогда такое переключение должно быть возможным для всего импульсы. Это обстоятельство также может служить доводом для использования солитонов в нелинейно-волоконных устройствах.

Свет высокой интенсивности, создаваемый лазерными системами в волоконно-оптических линиях, может вызывать увеличение локального показателя преломления среды, а это приводит к образованию светом волновода в однородной среде.

Таким образом, образовавшийся пространственный солитон может служить волноводом для более слабого пучка. Сталкивающиеся солитоны образуют сложную перекрещивающуюся (линейную) волноводную структуру. В этом случае свет низкой интенсивности, распространяющийся вдоль такого волновода, вследствие отражения и рассеяния должен ослабляться. Однако, при рассмотрении явления с точки зрения общих физических принципов обнаруживается, что параметры такого волновода могут оказаться близки безизлучательному случаю. Следовательно, с физической точки зрения этот важный случай можно рассматривать как особый безотражательный волновод с профилем показателя преломления, описываемым гиперболической функцией « $\text{sech}$ », или как случай отражения падающей линейной волны на потенциале, описываемом этой функцией. Эта концепция нашла различные приложения, такие как создание X-ответвителей или более сложных устройств с NxN входами и выходами. Они имеют определенные преимущества – например, отсутствие потерь. Кроме того, можно вычислять точные передаточные характеристики таких устройств.

Оптические X-ответвители – это устройства, которые обычно имеют два волноводных канала со слабой связью между ними, так что они могут обмениваться сигналами на некотором расстоянии. Доля обмененной энергии зависит от коэффициента связи, длины, частоты и других параметров, которые могут служить в качестве внешнего управления. В более общих терминах X-переход или ответвитель – это четырехпортовое устройство с двумя входами и двумя выходами, расположенными так, что выходные сигналы зависят от параметров входных сигналов, например, длина волны, и некоторые внутренние параметры управления, например, коэффициенты связи). Из-за специфической конструкции современные соединители имеют довольно большие размеры. Поэтому интерес представляют такие ответвители, которые основаны на теории взаимодействия нелинейных пучков в однородных нелинейных средах.

С конструктивной точки зрения четырёхпортовый сплавной волоконный ответвитель представляет собой линейный пассивный оптический элемент, выполняющий унитарное преобразование амплитуд сигнала. В петлевом зеркале один вход делится на два встречных поля, которые возвращаются и встречаются в соединителе. Длина оптического пути точно такая же для обоих

распространяющихся полей, так как они следуют по одному и тому же пути, но в противоположных направлениях, что является особенностью такого устройства.

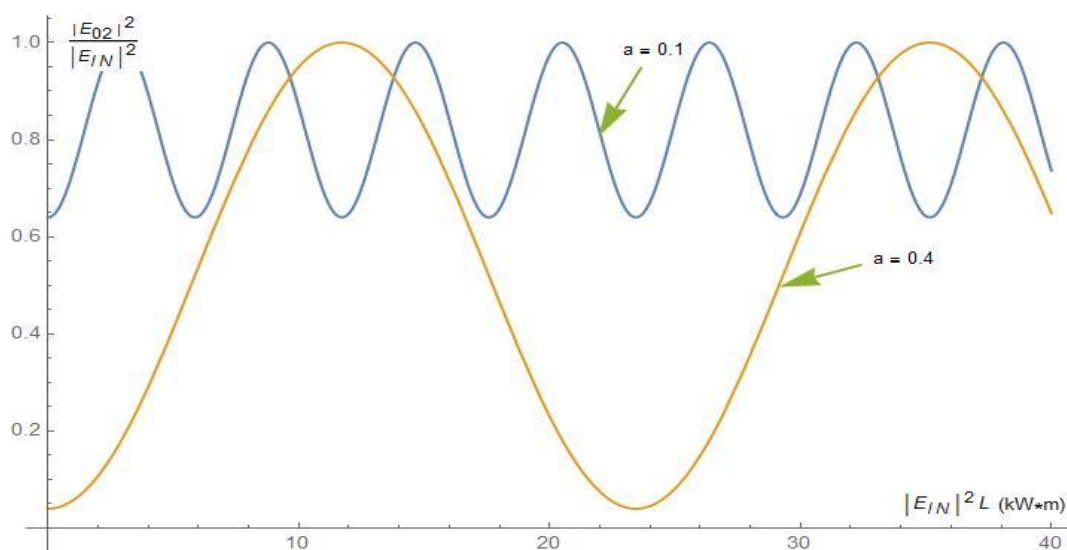


Рисунок 8 – Передаточная функция  $|E_{02}|^2 / |E_{IN}|^2$  через входную мощность в киловатт-метрах

Рассматриваемое устройство реагирует на различия в фазах между двумя перекрывающимися полями и, таким образом, чувствителен, но нет необходимости в интерферометрическом оптических путях.

Наилучший коэффициент переключения соответствует величине  $\alpha$ , близкой к 0,5, но энергия переключения возрастает соответственно. На рисунке 8 показана передаточная функция для порта 2 как функция входной мощности для двух значений  $\alpha$ . Мощность рассчитывается по формуле с  $n_2 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$  и  $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ . Отметим, что входная мощность в киловаттах/метр, так как требуемая мощность линейно зависит от длины петли. Если пренебречь взаимодействием между встречными полями, то в этом случае длительность импульса будет мала по сравнению с длиной петли.

Приведенные расчеты рассмотрены для случая, когда задается одно значение интенсивности поля на входе, чтобы рассчитать выходное поле через порт 2. Если входные импульсы не прямоугольные, характеристика передачи будет ухудшаться из-за изменяющейся интенсивности импульса. Поэтому, решением этой проблемы является использование распространения солитона в петле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисперсия относится к явлению, когда групповая скорость оптического поля, распространяющегося в среде, изменяется в зависимости от его частоты. Это изменение связано с частотной зависимостью показателя преломления материала, и оно является одним из ограничивающих факторов для современных высокоскоростных волоконно-оптических коммуникаций дальнего действия, в которых световой импульс (имеющий конечную спектральную полосу пропускания) подвергается хроматическому воздействию рассеивания по мере его

распространения. Более высокочастотное и более низкочастотное содержание импульса перемещается с разной скоростью, и импульс расширяется по мере его распространения. Оптический солитон – это оптический импульс, который способен противодействовать эффекту дисперсии с помощью зависящего от интенсивности нелинейного эффекта, называемого самофазовой модуляцией (или оптическим эффектом Керра). В случае временных солитонов нелинейный эффект уравнивает хроматическую дисперсию, а для пространственных солитонов нелинейный эффект уравнивает дифракцию. В обоих случаях, начиная с нелинейной поляризации и волнового уравнения, получается нелинейное уравнение Шредингера. Его решения описывают различные типы солитонов. Общее решение принимает форму импульса, амплитуда которого имеет фиксированную зависимость от его ширины. В случае аномальной дисперсии и пространственной дифракции (где линейный дисперсионный член отрицателен) решения представляют собой так называемые «яркие солитоны». В случае нормальной дисперсии (где дисперсионный член положителен) растворы представляют собой «темные солитоны», обладающие некоторыми уникальными свойствами. Во всех случаях начальная амплитуда, ширина и форма солитона не обязательно должны быть точно такими же, как теоретические результаты, но они должны быть близки. Солитон самонастраивается, и он будет постепенно корректировать свою форму, чтобы соответствовать фундаментальному солитону. Временные солитоны желательны в современных волоконно-оптических системах связи, поскольку они противодействуют эффектам хроматической дисперсии, так что оптические импульсы не изменяют форму при распространении по длине волокна. Полученные уравнения солитонов показывают, что истинные солитоны могут существовать только на всей оси времени, так как это импульс. Однако аппроксимация может быть сделана, если последовательность импульсов солитонов хорошо разделена. Это условие формирует зависимость между скоростью передачи битов и длительностью солитонного импульса, а следовательно, и требуемой мощностью и энергией солитонного импульса. Когда два солитонных импульса находятся близко друг к другу, они взаимодействуют различными способами, такими как притяжение, столкновение или отталкивание. Это приводит к появлению дрожания во время прихода каждого импульса и является пагубным эффектом. Чтобы предотвратить возникновение таких эффектов, скорость передачи битов, дальность передачи, линейная дисперсия и начальное разделение солитонных импульсов должны образовывать фиксированную зависимость. Наконец, солитоны, распространяющиеся в реальном волокне, страдают от потерь мощности. Поскольку мощность солитона внутренне связана с его шириной импульса, то при экспоненциальном уменьшении мощности ширина увеличивается экспоненциально. Это уширение нежелательно, но его эффект обычно не так серьезен, как уширение из-за дисперсии групповой скорости. В современных дальнемагистральных системах EDFAs или другие оптические усилители периодически размещаются вдоль сегментов волокон, чтобы компенсировать потери волокна. С 1980-х годов были проведены многочисленные эксперименты по использованию солитонов в волоконно-оптической связи. Более ранние эксперименты использовали

комбинационное усиление для преодоления эффектов потери волокна, и с появлением EDFAs они стали основой в световолновых системах компенсации потерь. В последнее время наблюдается возрождение методов комбинационного усиления для солитонных (и неолитонных) систем, что связано с достижениями в области полупроводниковых лазерных технологий.

Цель данной работы была достигнута. Реализовано исследование процессов распространения сигнала в солитонных системах связи, создание и тестирование алгоритмов и реализующих их программ для изучения эволюции оптических солитоноподобных импульсов в оптоволоконных линиях связи при их распространении по линиям связи.

В работе был произведен анализ публикаций по теме диссертации, произведена постановка задачи на перспективу, описаны способы применения солитона как способ увеличения скорости передачи оптического сигнала по волокну. Также, были исследованы параметры, влияющие на солитонный сигнал. Определена природа происхождения солитона. Рассмотрено математическое решение уравнение Шредингера, описывающее физический сигнал солитона в системе передачи. Были исследованы виды солитонов, их общность и различия.

Приведены с подробным выводом аналитические выражения, описывающие процессы распространения гауссовских импульсов по одномодовым ОВ в линейном приближении. Их правильность подтверждена многочисленными теоретическими исследованиями и моделированием.

Проанализированы различные параметры линейного тракта квазисолитонных высокоскоростных волоконных оптических сетей связи. Проведено их моделирование в широком диапазоне изменения расстояний, параметров источников сигнала с полученной частотной модуляцией в результате распространения по оптоволокну и различными мощностями.

Подтверждено, что качество связи в таких оптоволоконных практически не зависит от формы оптических импульсов при передаче информационного сигнала, то есть это могут быть секансные (солитонные решения уравнения Кортевега-де Вриза) и гауссовские импульсы одинаковой длительности, что также согласуется с результатами работы.

Точные аналитические решения необходимы для проверки правильности численного моделирования. При этом для этих выражений выполняется проверка сохранения интегралов движения, то есть закон сохранения энергии.

Были произведены численные решения задачи распространения, что позволило определить, что импульсы в солитонном режиме, амплитуды которых не соответствуют солитонам, получают набег фазы, пропорциональный расстоянию. Поэтому можно предположить, что если амплитуда импульса рассматриваемого устройства достаточна для создания этих солитонных эффектов, тогда такое переключение должно быть возможным для всего импульсы. Это обстоятельство также может служить доводом для использования солитонов в нелинейно-волоконных устройствах.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи, опубликованные в изданиях УрТИСИ СибГУТИ

1 Рудометова Е.С. Солитонные сети / Е.С. Рудометова, В.Т. Куанышев // Формирование профессиональных компетенций выпускников инфокоммуникационного вуза в соответствии с требованиями отраслевых стандартов и ФГОС 3++. – II этап – Екатеринбург, 2019.

2 Рудометова Е.С. Практические вопросы расчета многопортовых ответвителей в солитонных линиях связи. / Е.С. Рудометова, В.Т. Куанышев // Цифровая экономика: взгляд студенчества. – I этап – Екатеринбург, 2019.

3 Рудометова Е.С. Исследование процесса распространения сигнала в солитонных системах передачи. / Е.С. Рудометова, Р.Г. Новокшенова // Цифровая экономика: взгляд студенчества. – I этап – Екатеринбург, 2019.

4. Рудометова Е.С. Расчет передаточной функции X-ответвителя в режиме нелинейной токовой петли / Е.С. Рудометова, В.Т. Куанышев // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии и когнитивная электросвязь» (заочная форма проведения, сроки приема статей продлены до 08 июня 2020 г.), Екатеринбург, УрТИСИ СибГУТИ. – 5с.