

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра звукотехніки та реєстрації інформації

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Г.Г.Власюк
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 171 Електроніка.(Електронні та інформаційні
(код і назва спеціальності)

технології кінематографії та аудіовізуальних
систем) _____

на тему: « Високошвидкісна солітонна транспортна лінія зв'язку».

Виконала студентка VI курсу, групи ДВ-71мп
(шифр групи)

Дансо Джанет Обенева

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник професор д.т.н., професор Розорінов Г.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) _____ Факультет електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ Кафедра звукотехніки та реєстрації інформації _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) _____ 171, Електроніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Г.Г. Власюк
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Дансо Джанет Обенева _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Високошвидкісна солітонна транспортна лінія зв'язку

науковий керівник дисертації професор д.т.н., професор Розорінов Г.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018р. №4114-с

2. Строк подання студентом дисертації 10.12.2018р. _____

3. Об'єкт дослідження : солітонні волоконно – оптичні системи передачі та солітонні імпульси у волоконних світловодах.

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою): методи та моделі дослідження поширення солітонних імпульсів у волоконних світловодах та солітонних лінійних трактах.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Провести огляд основних проблем, що обмежують можливість побудови солітонних ліній зв'язку.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 22 рис., 22 табл., 2 дод., посилань 27 джерел.

7. Орієнтовний перелік публікацій «Особливості швидкісного солітонного транспортного зв'язку», «Перспективи солітонні лінії зв'язку та пов'язані з ними проблеми».

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 10.09.2017

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Написання першого розділу: «Розвиток та перспективи солітонних ліній зв'язку».	10.10.2017	
	Написання другого розділу: «Основи поширення солітонних імпульсів у волоконних світловодах».	15.12.2017	
	Написання третього розділу: «Особливості побудови солітонних ліній зв'язку».	01.05.2018	
	Написання четвертого розділу: «Зниження факторів впливу на пропускну спроможність солітонних волоконно – оптичних систем передачі».	10.10.2018	
	Написання п'ятого розділу: «Розроблення стартап-проекту».	09.11.2018	
	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	25.11.2018	
	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	30.11.2018	

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

Студент

(підпис)

Д.О. Дансо
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Г. М. Розорінов
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить основну частину на 104 сторінках, 22 рис., 22 табл., 2 дод., 27 джерел.

ВОЛОКОННО – ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ, ДЖИТЕР ГОРДОНА – ХАУСА, ДИСПЕРСІЯ, СОЛІТОННІ ІМПУЛЬСИ, ДИСПЕРСІЙНА КАРТА, ДУ – СОЛІТОН.

Метою роботи є теоретичне дослідження основ поширення солітонів в волоконно – оптичних лініях зв'язку, визначення основних проблем, що обмежують можливість побудови солітонних ліній зв'язку, та основних шляхів їх вирішення шляхом аналізу модельованих солітонних систем, що базується на оцінці допустимого значення джитера солітона, спричиненого ефектом Гордона – Хауса, та його впливу на пропускну здатність солітонних ВОСП з дисперсійним управлінням для різних конфігурацій лінійних трактів.

Методом дослідження є аналіз теоретичного матеріалу та принципу моделювання солітонних систем в програмі Matlab Simulink.

Результатом дослідження є створення програмної моделі 10 Гбіт/с солітонних систем з дисперсійним управлінням, які використовують дві дисперсійні карти з типовим значенням періоду, що на практиці становить $L_m=80$ км, відстань поширення – 8000 км, оцінка впливу джитера Гордона – Хауса для різних конфігурацій лінійних трактів, дослідження показників посткомпенсації дисперсії для зменшення впливу джитера Гордона – Хауса.

Результати роботи можна застосовувати для вирішення задачі підвищення пропускнуєї спроможності оптичних транспортних мереж, шляхом впровадження солітонних волоконно – оптичних систем передачі.

SUMMARY

This master's dissertation consists of 101 pages, 22 tables, 22 illustrations, 2 appendices and 27 bibliographic names under the list of the references.

FIBER OPTIC TRANSMISSION SYSTEM, GORDON – HAUSE'S JITTER, DISPERSION, SOLITON IMPULSE, DISPERSION MAP, DC – SOLITON.

The objective is to theoretical studies of the propagation of solitons in optical fiber communication lines, identifying the main problems that limit the possibility of constructing soliton communication lines, and fundamental ways to address them through the analysis of simulated soliton systems, based on an assessment of soliton jitter tolerance value caused by the effect of Gordon House, and its impact on the capacity of soliton had sung a hymn of dispersion management for various configurations of linear chains.

The method of research is the analysis of theoretical material and the principle of soliton systems simulation program in Matlab Simulink.

This investigation is a model program 10 Gbit / s soliton systems with dispersion management, which uses two dispersion maps with a typical value of the period, which in practice amounts to $L_m = 80$ km, the distance distribution – 8000 km, impact assessment jitter Gordon House for the different configurations linear chains, development of optimization method postkompensation variance to reduce the influence of jitter Gordon House.

The results can be applied to solve the problem of increasing the capacity of optical transport networks, through the introduction of soliton fiber – optic transmission systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	11
1. Розвиток та перспективи солітонних ліній зв'язку	13
1.1 Загальний огляд проблеми	13
1.2 Підвищення швидкості передачі	15
1.3 Збільшення довжини регенераційної ділянки	16
1.4 Експериментальні солітонні волоконно – оптичні лінії зв'язку	17
1.5 Перспективи використання волоконно – оптичних кабелів для створення солітонних ліній зв'язку	21
2 Основи поширення солітонних імпульсів у волоконних світловодах	23
2.1 Нелінійні ефекти в оптичному волокні	23
2.1.1 Нелінійне заломлення	25
2.1.2 Вимушене непружне розсіювання	26
2.1.3 Параметричні процеси	27
2.2 Природа солітона	29
2.3 Паразитні ефекти, що обмежують можливість побудови солітонних ліній зв'язку	35
2.3.1 Наявність частотної модуляції в початковому імпульсі	35
2.3.2 Втрати потужності солітона в оптичному волокні	35
2.3.3 Взаємодія солітонних імпульсів	36
2.3.3.1 Стиснення солітонних імпульсів	37
3 Особливості побудови солітонних ліній зв'язку	39
3.1 Побудова солітонних ліній зв'язку з дисперсійним управлінням	39
3.2 Методи визначення параметрів солітонного імпульсу	42

3.3 Математичні моделі солітонних ліній зв'язку	43
3.3.1 Модель солітонної волоконно – оптичної лінії зв'язку для розповсюдження фундаментального соліона	43
3.3.2 Модель солітонної волоконно – оптичної лінії зв'язку для розповсюдження ДУ солітона	44
3.4 Фактори впливу на функціонування солітонних волоконно – оптичних систем передачі	45
3.5 Оцінка функціонування солітонних волоконно – оптичних систем передачі	47
3.6 Рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса в першому сегменті оптичного тракту дисперсійної карти	49
3.6.1 Рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса в процесі поширенні фундаментального соліона	50
3.6.2 Рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса в процесі поширенні ДУ солітона	50
3.7 Рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса наступних сегментів оптичного тракту дисперсійної карти	51
3.8 Аналіз залежності джитера Гордона – Хауса від параметрів лінійного тракту	53
4 Зниження факторів впливу на пропускну спроможність солітонних волоконно –оптичних систем передачі	59
4.1 Зниження впливу явищ Гордона – Хауса на функціонування солітонних волоконно – оптичних систем передачі	59
4.2 Загальні рекомендації із застосування результатів досліджень солітонних ВОСП з дисперсійним управлінням	65
4.3 Параметри роботи волоконно – решіткового компресора	66
4.4 Параметри роботи компресора на основі багатосолітонного стиснення	69

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	72
5.1 Опис ідеї проекту	72
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	74
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	75
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	82
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	84
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК джерел посилання	90
Додаток А Лістинг програми моделювання солітонних волоконно – оптичних систем передачі	93
Додаток Б Abstract "Methods for increasing the functionality of linear soliton chains"	96

ПЕРЕЛІК УМОВНІ СКОРОЧЕНЬ

ВКР	–	Вимушене комбінаційне розсіювання
ВОЛЗ	–	Волоконно – оптична лінія зв'язку
ВОСП	–	Волоконно – оптична система передачі
ВПСФ	–	Вузькосмуговий перестроюваний смуговий фільтр
ВРМБ	–	Вимушене розсіювання Мендельштама – Брілюена
ДГШ	–	Дисперсія групових швидкостей
ДУ	–	Дисперсійне управління
ІКМ	–	Імпульсно – кодова модуляція
ЛЧМ	–	Лінійна частотна модуляція
НРШ	–	Нелінійне рівняння Шредингера
ОВ	–	Оптичне волокно
ООВ	–	Одномодове оптичне волокно
ОП	–	Оптичний підсилювач
ПСМ	–	Періодична синхронна модуляція
СДГШ	–	Середня дисперсія групових швидкостей
ФКМ	–	Фазова крос – модуляція
ФСМ	–	Фазова саомодуляція
ЧМ	–	Частотна модуляція
ЧХЗ	–	Чотирьоххвильове зміщення
ASE	–	Amplified Spontaneous Emission (шум спонтанного випромінювання)
BER	–	Bit error rate
DCF	–	Dispersion Compensating Fiber (волокно з компенсацією дисперсії)
DDF	–	Dispersion Decreasing fiber (волокно з аномальною дисперсією)
DSF	–	Dispersion Shifted Fiber (волокно зі зміщеною дисперсією)

DWDM	–	Dense Wave Division Multiplexing
EDFA	–	Erbium Doped Fibre Amplifier (волоконно – оптичний підсилювач на оптичному волокні, легваному іонами ербію)
NRZ	–	Non Return to Zero (система кодування без повернення до нуля)
NZDSF	–	Non zero dispersion shifted fiber (кабель з ненульовою зміщеною дисперсією)
PDH	–	Plesiochronous Digital Hierarchy (плезіохронна цифрова ієрархія)
PMD	–	Polarization mode dispersion (дисперсія поляризованої моди)
RZ	–	Return to Zero (система кодування з поверненням до нуля)
SDH	–	Synchronous Digital Hierarchy (синхронна цифрова ієрархія)
TDM	–	Time Division Multiplexing
WDM	–	Wavelength Division Multiplexing (спектральне ущільнення каналів)

ВСТУП

Зростання інформаційної ємності сучасних телекомунікаційних мереж є причиною створення та розвитку нових волоконно – оптичних технологій, що дозволяють передавати сигнали з більш високою швидкістю на більші відстані.

Актуальність теми

Використання методу часового мультиплексування через технологічні обмеження не є універсальним рішенням проблеми збільшення пропускної здатності магістральних волоконно – оптичних систем передачі. Подолання обмежень сьогодні вирішується завдяки методу спектрального поділу оптичних каналів і лінійного режиму роботи оптичних систем передачі. Перспективним альтернативним напрямком є розробка і впровадження методу, заснованого на використанні солітонного (нелінійного) режиму передачі даних. Цей метод перебуває в стадії теоретичних та експериментальних досліджень. Отже, наукова проблема, яка полягає в підвищенні функціональних можливостей солітонних систем передачі на основі дослідження нелінійного поширення надкоротких оптичних імпульсів у волоконних світловодах та солітонних трактах є актуальною.

Метою дослідження є виявлення особливостей роботи солітонних систем передачі, розв’язання практичних проблем з підвищення функціональних можливостей солітонних систем передачі.

Об’єктом дослідження є солітонні волоконно – оптичні системи передачі та солітонні імпульси у волоконних світловодах.

Предметом дослідження є методи та моделі дослідження поширення солітонних імпульсів у волоконних світловодах та солітонних лінійних трактах.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

1. Узагальнено критерії оцінки якості функціонування солітонних систем передачі.
2. Проаналізовано залежність впливу джитера Гордона – Хауса від параметрів лінійного тракту.

3. Обґрунтовано спосіб зменшення значення джитера, спричиненого ефектом Гордона – Хауса.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення роботи полягає в виявленні та детальному освітленні теоретичних положень з проектування солітонних ВОСП, які можуть бути використані у розрахунках для аналізу ефективності варіантів побудови лінійних трактів солітонних ВОСП.

Апробація результатів магістерської роботи

Результати досліджень опубліковані в тезах конференцій: "Зменшення показника втрат в оптичному кабелі внаслідок покращення його термостабільності", – "Інфокомунікаційні системи та технології" 19 – 20 квітня 2010 р.р. – с. 13.; "Вплив дисперсії на передачу солітонних імпульсів у волоконно – оптичних системах зв'язку", – "Перспективні напрямки сучасної електроніки" 19 – 20 квітня 2011 р.р. – с. 49.

Розв'язання питань подальшого розвитку наукових досліджень та практичного впровадження солітонних систем передачі неможливе без вивчення специфіки поширення надкоротких імпульсів у одномодових світловодах, дослідження особливостей впливу дисперсійних і нелінійних ефектів на параметри поширюваних імпульсів. Потребують практичного розгляду питання, пов'язані з проектуванням реальних солітонних ліній зв'язку та з перспективою збільшення регенераційних ділянок і пропускної спроможності солітонних систем передачі з дисперсійним управлінням.

1. РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ СОЛІТОННИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Загальний огляд проблеми

Почавши свій розвиток з появи в 1962 р. 24 – канальних систем імпульсно – кодової модуляції (ІКМ), цифрові мережі довгий час еволюціонували виключно як електричні. Швидкості передачі в них також зростали: з 1,5 – 2 Мбіт / с (первинний канал) до 6 – 8 Мбіт / с (вторинний канал), до 34 – 45 Мбіт / с (третинний канал) і до 140 Мбіт / с (четвертинний канал) [1]. Таким чином формувалася стандартна плезіохронна ієрархія (PDH), що дозволила у середині 80 – х р. організувати до 1920 стандартних телефонних каналів в одному цифровому каналі зв'язку. Подальше збільшення швидкості, пов'язане з підвищенням частоти переданого сигналу, повільно розвивалося через те, що різко зростали втрати в електричному кабелі, оскільки була потрібна установка регенераторів через кожні 2 – 3 км

Проте вже на початку 80 – х років з'явився новий засіб передачі – оптичне волокно (ОВ). Завдяки йому вдалося збільшити довжину ділянки регенерації, і нині ОВ стало домінуючим середовищем передачі. Його поява призвела до бурхливого розвитку синхронних цифрових мереж, що ґрунтуються на технологіях SONET / SDH.

Волоконно – оптичні мережі на сьогодні є безумовно найбільш швидким, надійним та одним з найперспективніших напрямків в телекомунікаційній галузі. У 1981 році була розроблена волоконно – оптична система передачі (ВОСП), що забезпечує передачу даних зі швидкістю 2 Гбіт / с на відстань понад 40 км. До 1996 року потреба збільшення пропускної спроможності систем зв'язку вирішувалася методом тимчасового мультиплексування (Time Division Multiplexing, TDM) [2]. На його основі були створені цифрові системи передачі плезіохронної ієрархії (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH) та системи синхронної цифрової ієрархії (Synchronous Digital Hierarchy, SDH). Застосування технології SDH дозволило збільшити швидкість передачі від 155 Мбіт / с до 40 Гбіт / с. Однак збільшення складності обладнання для модуляції і мультиплексування при збільшенні швидкостей передачі даних обмежило застосування цієї технології. Для подолання

цієї проблеми розроблена технологія ущільнення оптичних каналів по довжинах хвиль (спектрального ущільнення) (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Експериментально показано, що використання технології WDM забезпечує збільшення пропускної спроможності ВОСП понад 1 Тбіт / с.

Одночасно зі збільшенням швидкості передачі інформації зростає дальність передачі. Революційною подією у збільшенні дальності передачі інформації по волоконно – оптичних мережах стало застосування підсилювачів. Для компенсації втрат у волоконно – оптичній лінії зв'язку (ВОЛЗ) через кожні 80 – 100 км встановлюються оптичні підсилювачі (ОП). Періодичне посилення забезпечує збільшення довжини ретрансляційної ділянки до декількох сотень кілометрів.

У цифрових волоконно – оптичних мережах зв'язку разом з загасанням важливим фактором, що обмежує дальність і швидкість передачі інформації, є розширення світлових імпульсів, що несуть інформацію внаслідок дисперсії одномодового оптичного волокна (ООВ) [1]. Розширення світлових імпульсів внаслідок відмінності групових швидкостей спектральних компоненті (хроматична дисперсія), може бути скомпенсовано декількома способами. Якщо лінії зв'язку на основі оптичного волокна дійсно були лінійними системами, то проблему боротьби з хроматичною дисперсією можна було б вважати вирішеною. З ростом ємності ВОСП очевидна тенденція збільшення потужності сигналу. Нелінійні взаємодії між оптичним сигналом і оптоволоконним середовищем передачі почали розглядатися, як тільки були здійснені спроби збільшення потужності оптичного сигналу для компенсації втрат внесених обладнанням WDM і для досягнення великих довжин секцій. Таким чином, нелінійні спотворення світлових сигналів є чинником, що обмежує потужність імпульсів і, отже, дальність передачі інформації. Але нелінійність вносить не тільки обмеження параметрів передачі, а й дає можливість створення нового класу ВОСП, що працюють в нелінійному (солітонному) режимі поширення надкоротких оптичних імпульсів у волоконному світловоді.

1.2 Підвищення швидкості передачі

До початку широкого впровадження систем передачі на основі мультиплексування з поділом по довжинах хвиль передбачалося, що на швидкості від 10 Гбіт / с солітонні системи будуть мати перевагу перед звичайними методами оптичної передачі [3]. Однак з 1995 р. почався бурхливий розвиток систем хвильового мультиплексування, заснованих на технології компенсації дисперсії – спеціальних кабелів з ненульовою (але невеликою за розміром) дисперсією (NZDSF) і достатньо плоскою характеристикою дисперсійного параметра D в області 1530 – 1565 нм, що перенесло цей рубіж спочатку до 40 Гбіт / с, потім до 80 Гбіт / с, а зараз і до 320 – 400 Гбіт / с.

Для тривалості імпульсів джерела порядку одиниць пікосекунд швидкість передачі даних 160 Гбіт / с в одному каналі є фактично граничною (скважність імпульсів – приблизно 2). Подальше збільшення швидкості можливо лише внаслідок зменшення тривалості імпульсів, що генеруються лазерними джерелами, тобто переходу до фемтосекундного діапазону. Це збільшує скважність імпульсів (при збереженні періоду генерації імпульсу, що важливо у випадках застосування колишніх типів лазерів) і зменшує взаємодію солітонів.

Для зменшення тривалості імпульсу солітону можна використовувати ефект багатосолітонного стиснення. Наприклад, вибір солітону другого порядку дає можливість стиснути вихідний імпульс лазера тривалістю в 3 пс до рівня близько 0,4 пс (400 фс). Це дозволить (навіть без формування солітонів з ортогональною поляризацією) отримати подвоєння швидкості передачі даних (320 Гбіт / с, бітовий інтервал 3,125 пс). Оптичні мультиплексори (оптичні інтегральні схеми) здатні нормально працювати на таких швидкостях.

Звичайно, солітонні лінії зв'язку можуть використовувати і техніку мультиплексування WDM. Однак якщо врахувати, що для солітонних систем потрібен високий рівень потужності генерації солітонів і високий рівень нелінійних ефектів, то створити волокно з плоскою (в широкому діапазоні довжин хвиль)

дисперсійною характеристикою (а значить, і гарантувати великий коефіцієнт мультиплексування) досить складно.

1.3 Збільшення довжини регенераційної ділянки

Перспективи збільшення довжини регенераційної ділянки значно кращі для солітонних систем, ніж для звичайних оптичних, – навіть якщо врахувати, що в результаті останніх удосконалень вдалося довести довжину регенераційної ділянки звичайних систем до 250–500 км при використанні ОП на оптичному волокні, легovanому ербієм (Erbium Doped Fibre Amplifier, EDFA).

Для синхронних солітонних систем, які можуть працювати на наддалеких відстанях без регенераторів, тільки з підсилювачами типу EDFA, в 1991–1992 р. була запропонована технологія одночасного управління солітонами у часовій і частотній областях. Ця технологія задіює два механізми управління:

1 періодичну синхронну модуляцію (PCM) – для управління позицією солітону у часовій області;

2 вузькосмуговий перестроюваний смуговий фільтр (ВПСФ) – для управління частотним спектром.

PCM дозволяє не тільки усунути тремтіння фази солітону, ефект Гордона – Хауса, але і значно зменшити рівень шуму спонтанного випромінюванням (ASE). ВПСФ представляє собою вузькосмуговий фільтр з шириною смуги пропускання 0,3–0,4 нм, центральна довжина хвилі якої розбудовується, керуючи контуром стабілізації енергії солітону в частотній області.

Застосовуючи ВПСФ, вдалося на кільці солітонних лінії зв'язку довжиною 500 км з підсилювачами типу EDFA, які розставлені через кожні 50 км, домогтися проходження солітонів 180 млн км (в лабораторних умовах) без помилок. Цей вражаючий результат дозволяє заявити, що при використанні солітонів практично не існує межі довжини регенераційної ділянки.

1.4 Експериментальні солітонні лінії зв'язку

Солітонні лінії зв'язку здатні передавати інформацію на відстані ~ 1000 км зі швидкістю до 100 Гбіт/с, за умови, що втрати у світловоді скомпенсовані внаслідок належного підсилення солітонів [2]. Одним із можливих способів, очевидно, є схема із вимушеним комбінаційним розсіюванням (ВКР) підсилення. Передавання інформації здійснюється поблизу довжини хвилі мінімальних втрат у світловоді ($\approx 1,56$ мкм). Періодично з інтервалом L , використовуючи частотно – залежні спрямовані відгалужувачі у світловоді з двох напрямів, вводять безперервне випромінювання лазера на довжині хвилі 1,46 мкм. Важливими параметрами системи є: B – швидкість передачі інформації; T_{FWHM} – тривалість імпульсу на рівні 0,5 висоти інтенсивності ($T_{FWHM} \cong 1,76T_0$); L – відстань між пунктами підсилення і повна довжина L_T системи, що визначається числом пунктів підсилення, при перевищенні якого розповсюдження солітонів стає нестійким.

Останнім часом ця область широко досліджувалася, були створені експериментальні зразки солітонних ліній зв'язку. Найпростіша схема солітонних ліній зв'язку запропонована у 1983 р. Хасегавой (рис.1.1). У ній реалізована архітектура лінійної послідовності ланцюга, що складається з лінійних сегментів світловодів довжиною L та ВКР – підсилювачів. Посилення організовано так, що на кінцях кожного сегменту встановлені спрямовані відгалужувачі, через які в лінію зв'язку (світловод) в обох напрямках вводиться безперервне випромінювання накачування від лазера, який працює на довжині хвилі 1460 нм. У схемі може бути використано одномодове волокно – як звичайне, так і зі зсувом дисперсії з ефективною площею серцевини 25 мкм^2 , що працює на довжині хвилі 1550 нм.

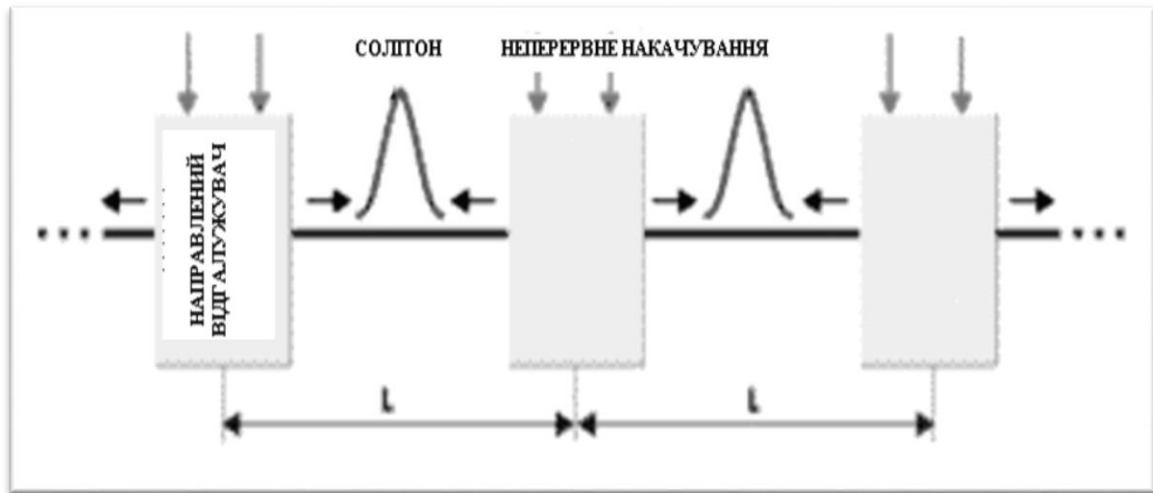


Рисунок – 1.1 Схема солітонної лінії зв'язку з ВКР – підсилювачами

Реалізовані значення L склали 40 – 50 км, а загальна довжина лінії – 600 км. Вона обмежується, в основному, випадковим шумом когерентного підсилення, що викликає флуктуацію часу приходу імпульсу на детектор (ефект Гордона – Хауса).

1.5 Перспективи використання існуючих ВОК для створення солітонних ліній зв'язку

Вище було зазначено, що солітон може бути сформований лише у середовищі з негативною дисперсією на довжині хвилі генерації солітону. Це не означає, що для солітонних ліній зв'язку обов'язково повинні використовуватися волокна з невеликою ненульовий, але негативною дисперсією (наприклад, типу Non – zero dispersion – shifted fiber, NZDSF). Солітон може поширюватися і на ділянках з позитивною дисперсією, характерних для вже існуючих ВОЛЗ, але при цьому потрібно, щоб середня дисперсія групових швидкостей (СДГШ) на всій довжині лінії або на ділянці була негативною.

Наприклад, на лінії, складеної з двох ділянок 60 і 30 км з дисперсією на цих ділянках – 1.75 і +2.0 пс / км / нм, відповідно, маємо негативну СДГШ, рівну – 0.5 пс / км / нм, що дозволяє використовувати її для організації солітонних ліній зв'язку, якщо період солітону більше сумарної довжини ділянок (90 км) [3]. Встановлюючи

після кожних двох таких ділянок підсилювач, можна істотно збільшити загальну довжину лінії зв'язку (наприклад, до 1170 км).

Доказом практичності такого підходу можуть служити польові випробування модернізованої чотирьохканальної системи WDM, що використовує існуючу ВОЛЗ (Чикаго – Сент – Луїс) на обладнанні SONET зі швидкістю передачі OC – 192 по волокну NDSF загальною протяжністю 450 км, проведені компаніями Pirelli і MCI. (рис.1.2).

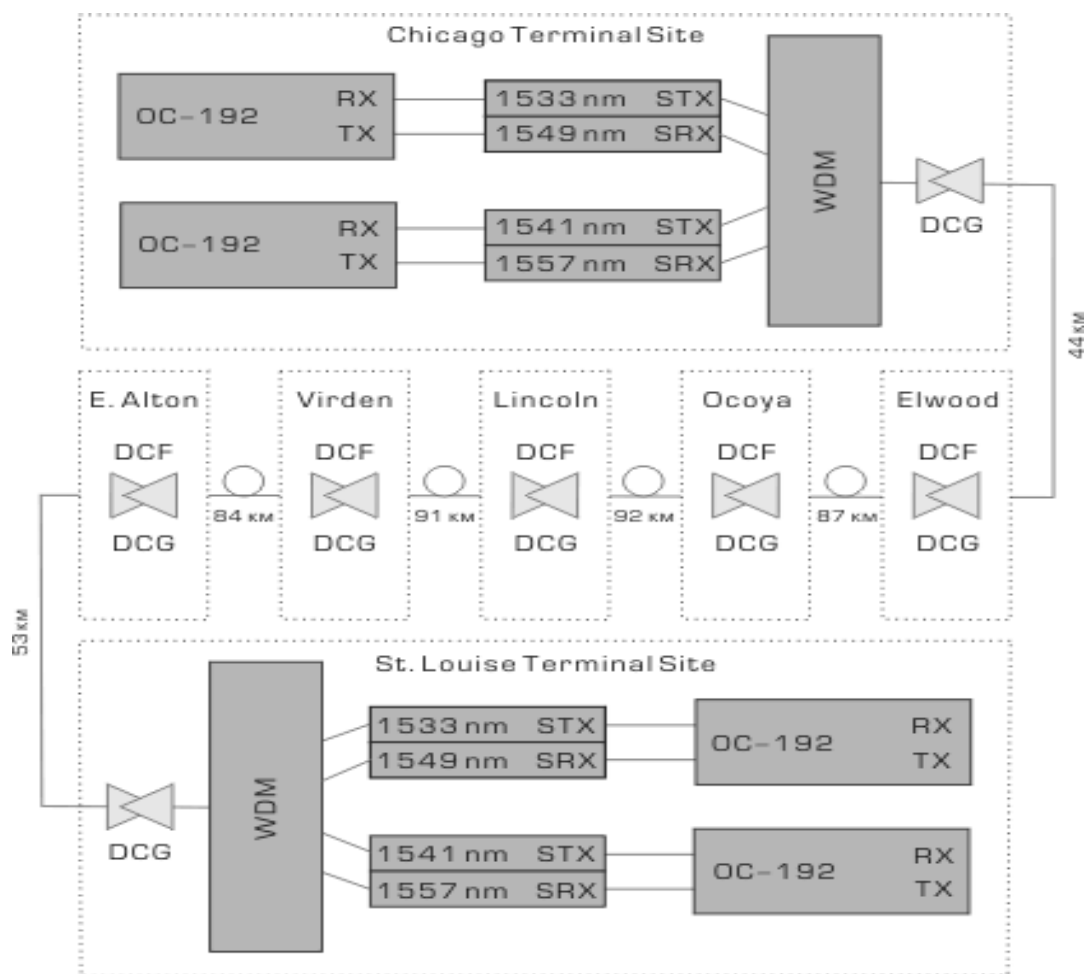


Рисунок – 1.2 Схема солітонних ВОЛЗ на основі технології SONET – WDM, що використовує існуючий ВОК зі стандартним одномодовим ОВ: SRX – приймач солітонних імпульсів, STX – передавач солітонних імпульсів, DCF – волокно, яке компенсує дисперсію, DCG – дифракційна решітка, що компенсує дисперсію

Модернізація полягала у використанні генераторів солітонних імпульсів, встановлених після існуючих комерційних передавачів OC–192, конвертерів з системами кодування Return to Zero (RZ) / Non Return to Zero (NRZ), встановлених перед комерційними приймачами OC–192 і вставок волокна, компенсуючого дисперсію (DCF) на кінцевих та 5 транзитних вузлових станціях

Модернізована система дозволила не тільки позбутися використання регенераторів на відносно довгих ділянках (84–92 км), але і продемонструвала стійкість роботи і високу якість сигналу, на звичайному волокні. На цій же лінії шляхом використання одноканального незахищеного (з одним кільцем) режиму вдалося продемонструвати стійку роботу модернізованої системи на мережі зі звичайним волокном довжиною 900 км. При цьому потрібно збільшити відношення сигнал / шум всього на 2 дБ.

Іншим прикладом використання аналогічного підходу є ще одне успішне польове випробування солітонних лінії зв'язку у Швеції (встановленої на комерційній лінії в Jonkoping), проведеному кафедрою мікроелектроніки Технологічного університету Chalmers (Гетеборг) спільно з компанією – оператором зв'язку Telia (Швеція). Ця лінія була побудована в рамках проекту MIDAS (European Union ACTS).

Швидкість передачі склала 40 Гбіт / с (ширина солітонних імпульсу – 10 пс) по одному каналу на одній довжині хвилі (що еквівалентно рівню STM – 256). При цьому загальна довжина лінії склала 400 км з ОП, розташованими через кожні 57 км. Як ОВ використовувалося вже існуюче на цій лінії ООВ зі зміщенням дисперсії типу DSF з хроматичною дисперсією 0,2 пс / км / нм і дисперсією поляризованої моди (PMD) близько 0,3 пс / км.

Випробування підтвердили високу надійність високошвидкісних солітонних систем та їх роботоздатність на відміну від звичайних оптичних систем передачі. Ці випробування дають надію, що ера солітонних систем настала, а використання існуючих систем DWDM, наприклад, з 40 – 64 каналами, кожний з солітонною швидкістю 40 Гбайт / с, дозволить реалізувати канал ємністю 1,6 – 2,56 Тбіт / с .

Ціллю дослідження цього напрямку є розвиток високошвидкісних систем передачі, збільшення інформаційної ємності й швидкості обробки сигналів. Солітонні ВОЛЗ мають цілу низку унікальних властивостей, що надають їм певної переваги порівняно зі звичайними ВОЛЗ, які працюють виключно в лінійному режимі.

Отже, подальшого дослідження потребують теоретичні положення поширення надкоротких оптичних імпульсів у нелінійному режимі одномодових світловодів, для технічної реалізації принципів проектування оптичних транспортних систем, побудованих за солітонними технологіями та оптичних пристроїв з використанням нелінійних ефектів світловодів.

Висновки

Проведено огляд історичного розвитку ВОЛЗ та солітонних ВОЛЗ, що дозволяє зробити висновок про перспективність напрямку розвитку солітонних ВОЛЗ та їх перевагу перед звичайними методами оптичної передачі. Виходячи з цього можна сформулювати задачі дослідження:

1. Розглянути нелінійні ефекти волоконних світловодів/
2. Розглянути основи поширення солітонних імпульсів у волоконних світловодах.
3. Розглянути особливості побудови солітонних ліній зв'язку з дисперсійним управлінням. Розглянути рівняння математичної моделі солітонних ліній зв'язку зі змінною дисперсією для фундаментального солітона й солітона з дисперсійним управлінням.
4. Проаналізувати критерії оцінки якості функціонування солітонних ВОСП, розглянути рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса фундаментальних солітонів і солітонів з дисперсійним управлінням. Проаналізувати залежність джитера Гордона – Хауса від параметрів лінійного тракту.
5. Дослідити метод зменшення впливу явища джитера Гордона – Хауса на солітонну ВОСП. Розглянути шляхи практичного застосування ефектів нелінійного

режиму поширення імпульсів для покращення параметрів волоконно – оптичних пристроїв систем зв'язку.

2 ОСНОВИ ПОШИРЕННЯ СОЛІТОННИХ ІМПУЛЬСІВ У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

Розглянемо нелінійні ефекти, які виникають у результаті застосування волоконних світловодів в якості нелінійного середовища [4]. Для більш повного розуміння нелінійних явищ необхідно звернутися до теорії поширення електромагнітних хвиль у нелінійному середовищі з дисперсією.

2.1 Нелінійні ефекти в оптичному волокні

Розгляд питання поширення світла в речовині передбачає, що характеристики середовища не змінюються під його впливом. Із цього слідує можливість застосування принципу суперпозицій, що дозволяє розглядати будь – яке хвильове поле як суму монохроматичних хвиль. Джерела світла, що існували до лазерних джерел, могли забезпечити електричні поля у світловій електромагнітній хвилі набагато порядків меншої напруженості, ніж внутрішньоатомні. Це означає, що вплив на властивості середовища дуже малий і не проявляється в реальних умовах. Відгук середовища на зовнішній оптичний вплив у цьому випадку пропорційний величині напруженості електричного поля хвилі, тобто лінійний, і принцип лінійної суперпозиції виконується.

Відкриття лазерів дозволило генерувати оптичні поля з напруженістю, рівною напруженості внутрішньоатомного поля [5]. Вплив такого оптичного випромінювання на середовище призводить до зміни його оптичних властивостей. А це означає, що хвиля в середовищі може впливати на процеси поширення в ньому інших хвиль. Це веде до виникнення нових, що не спостерігалися раніше, явищ. Нелійними оптичними ефектами називають ефекти, характер яких залежить від інтенсивності випромінювання. Фізичні причини, що призводять до появи нелінійних оптичних ефектів, досить різноманітні і є предметом вивчення нелінійної оптики.

При взаємодії електромагнітної хвилі зі зв'язаними електронами діелектрика відгук середовища залежить від оптичної частоти ω . Ця властивість називається хроматичною дисперсією і проявляється як частотна залежність показника заломлення $n(\omega)$. Виникнення хроматичної дисперсії пов'язано з характерними частотами, на яких середовище поглинає електромагнітне випромінювання внаслідок осциляції зв'язаних електронів. За межами резонансних частот середовища поведінка показника заломлення добре описується рівнянням Селмейера [4]:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (2.1)$$

де ω_j – резонансна частота; B_j – величина j -його резонансу.

Підсумовування в виразі (2.1) виконується по всіх резонансних частотах речовини. У випадку оптичних волокон параметри ω_j і B_j визначаються шляхом підбирання вимірних дисперсійних критерій до виразу (2.1) при $m=3$.

Дисперсія у волоконному світловоді має визначальне значення при поширенні коротких оптичних імпульсів, тому що різні спектральні компоненти спектра імпульсу поширюються з різними фазовими швидкостями $c/n(\omega)$ [6]. Дане явище спричиняє дисперсію групових швидкостей (ДГШ) і призводить до дисперсійного розширення хвильового пакету. Параметр ДГШ, β_2 , що визначає розширення імпульсу, пов'язаний з дисперсійним параметром волокна D виразом $D = -(2\pi c / \lambda^2) \beta_2$, де c – швидкість світла, λ – довжина світлової хвилі у вакуумі. Оскільки хроматична дисперсія пов'язана з розходженням групових швидкостей різних спектральних компонентів світлового сигналу, то величина розширення імпульсу ΔT пропорційна не тільки довжині волокна L , але також і ширині спектра джерела випромінювання оптичного сигналу $\Delta\lambda$. У результаті вираз $BL|D|\Delta\lambda < 1$ визначає обмеження швидкості передачі бітів через ДГШ. Для забезпечення високої швидкості передачі значення ΔT повинно бути мінімальним.

Вплив дисперсії, звичайно, знижується внаслідок вибору значення несної довжини хвилі поблизу нульової дисперсії волокна. Але використання потужних лазерних джерел сигналу або оптичних підсилювачів з потужними джерелами накачування призводить до різкого зростання впливу нелінійних ефектів.

Нелінійними оптичними ефектами називають ефекти, характер протікання яких залежить від інтенсивності випромінювання.

Фізичні причини. Що призводять до появи нелінійних оптичних ефектів, досить різноманітні і є предметом вивчення нелінійної оптики.

Найбільш проявляються такі нелінійні ефекти: нелінійне заломлення, вимушене непружне розсіювання, параметричні процеси.

2.1.1 Нелінійне заломлення

Нелінійне заломлення – це залежність показника заломлення n від інтенсивності поля E всередині волокна [7]. Тобто показник заломлення світловода дорівнює

$$n(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2, \quad (2.2)$$

де $|E|^2$ – інтенсивність поля всередині волокна, n_2 – нелінійний показник заломлення.

Показник заломлення оптичного середовища залежить не тільки від частоти (як розглядається в рамках лінійної теорії), але і від квадрата амплітуди електричного поля E . Останнє призводить до таких нелінійних ефектів, як фазова самомодуляція (ФСМ) і фазова крос – модуляція (ФКМ). ФСМ обумовлюється нелінійним набігом фази, що набувається оптичною хвилею при поширенні в нелінійному світловоді, який збільшується з ростом довжини розповсюдження z і призводить до симетричного розширення спектру коротких імпульсів. ФКМ виникає в тому випадку, коли у ОВ одночасно присутні оптичні поля різних частот. Це явище обумовлено набігом фази, наведеним електричним полем джерела, який випромінює на іншій довжині хвилі; така хвиля поширюється спільно з вихідною і викликає асиметричне розширення спектру імпульсів, що спільно поширюються.

Зміна фази внаслідок ФСМ спричиняє паразитну частотну модуляцію (ПЧМ) імпульсу, глибина якої зростає з ростом довжини поширення, що і пояснює розширення спектру імпульсу. Цей спектр залежить від форми імпульсу і його початкової частотної модуляції, яка спостерігається у багатьох джерелах випромінювання.

Якщо на ФСМ накладається дисперсія групових швидкостей (ДГШ), то для волокна з позитивною дисперсією її вплив стандартний. Виникає розширення спектру та розходження імпульсу з часом. Негативна дисперсія середовища надає нестандартний вплив – світловий імпульс (форма якого близька до гауссівського) спочатку дещо розширюється, потім стабілізується, а сам спектр імпульсу звужується.

2.1.2 Вимушене непружне розсіювання

Цей ефект спричинений вимушеним непружним розсіюванням, за якого оптичне поле передає частину своєї енергії нелінійному середовищу через непружну взаємодію електромагнітної хвилі з атомами середовища [4]. З вимушеним непружним розсіюванням пов'язані два явища:

1. Вимушене комбінаційне (або раманівське) розсіювання (ВКР);
2. Вимушене розсіювання Мандельштама – Брілюена (ВРМБ).

Механізм розсіювання полягає в тому, що фотон пучка світла (наприклад, пучка лазерного накачування оптичного підсилювача) розпадається на фотон меншої (комбінаційної, або різницевої) частоти і фонон. Якщо прийняти, що ω_c і $\omega_{\text{нак}}$ – частоти сигналу і накачування, то це відбувається за формулою $\omega_{\text{нак}} - \omega_c = \omega_p$. Випромінювання різницевої частоти ω_p називається стоксовою хвилею.

При ВКР мода здатна поширюватися в обох напрямках (але переважно поширюється в напрямку падаючого пучка), а при ВРМБ – назустріч падаючому пучку. Обидва явища носять пороговий характер, але мають і суттєві відмінності: одне спостерігається при потужностях накачування порядку 1 Вт (ВКР), інше – близько 10 мВт (ВРМБ).

Важлива особливість цих явищ: їх інтенсивність у волоконних світловодах може збільшуватися на багато порядків (довжина хвилі 1550, загасання 0,2 дБ / км), створюючи умови для оптичного підсилення.

2.1.3 Параметричні процеси

У процесах ВКР і ВРМБ волоконний світловод відіграє активну роль у тому, що в цих процесах беруть участь коливання його молекул. У багатьох інших нелінійних явищах світловод відіграє пасивну роль середовища, кілька оптичних хвиль взаємодіють через нелінійний відгук електронів зовнішніх оболонок [6].

Такі процеси називають параметричними, оскільки вони обумовлені світлоіндукованою зміною параметрів середовища, наприклад зміною показника заломлення. Залежність наведеної поляризації середовища від величини переломленого поля містить, як лінійні, так і нелінійні члени, вплив яких залежить від нелінійних сприйнятливостей. Виникають параметричні процеси різних порядків, причому порядок процесу збігається з порядком сприйнятливості, відповідальної за нього. Параметричні процеси третього порядку обумовлені взаємодією чотирьох оптичних хвиль і включають в себе явища генерації третьої гармоніки, чотирьоххвильового зміщення (ЧХЗ) і параметричного підсилення. Ці нелінійні ефекти призводять до розширення в середовищі спектру випромінювання джерела внаслідок появи комбінаційних гармонік.

Помітний внесок у це вносить чотирьоххвильове зміщення [7]. Його основні властивості виходять з розгляду нелінійної поляризації третього порядку. Параметричний зв'язок мод залежить від відносної фази між електричним полем хвилі E і наведеної нелінійної поляризації P_{NL} . Чотирьоххвильове зміщення стає значним, тільки коли відносна фаза близька до нуля. Для цього потрібне узгодження, як частот, так і хвильових векторів. Останнє називають узгодженням фаз або фазового синхронізму. У термінах квантової механіки ЧХЗ описується як взаємодія чотирьох поляризованих вздовж осі x оптичних хвиль з частотами $\omega_1, \omega_2,$

ω_3 і ω_4 , внаслідок якої може спостерігатися знищення фотонів однієї частоти і виникнення фотонів інших частот, причому зберігається енергія і імпульс.

Ефект ЧХЗ досить інтенсивно досліджувався і продовжує досліджуватися до цього часу, так як в системах WDM вплив ЧХЗ особливо руйнівний [5]. Генерація бічних смуг може призвести до значного зменшення потужності робочих каналів. Крім того, коли комбінаційні гармоніки потрапляють на частоти робочих каналів, то виникає параметрична інтерференція, яка може призвести як до збільшення, так і зменшення амплітуди робочого імпульсу, в залежності від фазових співвідношень робочого сигналу і сигналів бічних смуг. Збільшення кроку між несними і хроматична дисперсія зменшують ефективність процесів ЧХЗ внаслідок руйнування фазових співвідношень між взаємодіючими хвилями. Навпаки розташування частоти робочого каналу поблизу нуля дисперсії може призвести до істотного формування продуктів ЧХЗ.

ЧХЗ може виникати навіть у одноканальних системах між робочим сигналом і складовими шуму посиленого спонтанного випромінювання (Amplified Spontaneous Emission, ASE) оптичного підсилювача, а також між основною і бічними модами оптичного передавача. Накопичений шум ASE, додає фазовий шум несної робочого каналу, і викликає розширення хвостів спектру сигналу.

Частково вироджене ЧХЗ ($\omega_1 = \omega_2$) призводить до переносу енергії з хвилі накачування в дві хвилі з частотами, зміщеними від частоти накачування ω_1 в стоксову і антистоксову області. Якщо у світловод вводиться тільки випромінювання накачування і виконується умова узгодження фаз, то генерація стоксової і антистоксової хвиль з частотами ω_3 і ω_4 може індукуватись шумами подібно до того, як це відбувається при ВКР і ВРМБ. З іншого боку, якщо в світловод разом з накачуванням вводиться слабкий сигнал частотою ω_3 , то він посилюється, причому одночасно генерується нова хвиля частоти ω_4 , цей процес називають параметричним посиленням. Стоксова і антистоксова компоненти при цьому називаються сигнальною та холостою хвилями. В разі точної синхронізації та $gL \gg 1$, де g – коефіцієнт параметричного підсилення, в області, далекої від насичення, а також у разі виродження по накачці, коли існує тільки одна частота

накачування, формула для коефіцієнта підсилення параметричного підсилювача, отриманого за одине проходження, має вигляд:

$$G_0 = \{\exp(\gamma * P_{\text{нак}} * L_{\text{св}})\}/4, \quad (2.3)$$

де γ – середнє значення коефіцієнта нелінійності; $L_{\text{св}}$ – довжина світловода.

Груба оцінка ширини смуги підсилення дає величину порядку 100 ГГц. Ця величина є проміжною між аналогічними величинами ВКР і ВРМБ – підсилювачів. Параметричний підсилювач має ряд специфічних недоліків, які обмежують використання таких підсилювачів.

2.2 Природа солітона

Солітон – структурно стійка відокремлена хвиля, що поширюється в нелінійному середовищі та зберігає свою швидкість та форму в разі взаємодії один з одним [8]. Світлові імпульси, що поширюються в оптичному волокні та зберігають форму, належать до класу оптичних солітонів.

Солітон поширюється в оптичному волокні з мінімальними спотвореннями форми, тобто його можна розглядати як ідеальний носій інформації. Світловий імпульс, що має форму, дещо відмінну від солітонної, може еволюціонувати до неї в процесі поширення.

Для опису еволюції оптичних імпульсів у волокні вводяться характерні довжини: нелінійна довжина L_{NL} і дисперсійна довжина L_D , які визначаються з формул [8]:

$$L_{NL} = 1/\gamma P_0, \quad (2.4)$$

$$L_D = T_0^2 / |\beta_2|, \quad (2.5)$$

де β_2 – дисперсія групової швидкості; T_0 – тривалість імпульсу; γ – параметр нелінійності за ФСМ; P_0 – пікова потужність імпульсу.

Дисперсійна довжина й нелінійна довжина характеризують довжину, на якій дисперсійні й нелінійні ефекти стають важливими для еволюції імпульсу уздовж

довжини світловоду L . Залежно від співвідношення між L_D , L_{NL} і довжиною світловода L можна розрізнити різні режими еволюції імпульсів.

Якщо $L \ll L_{NL}$ й $L \ll L_D$, то, ні дисперсійні, ні нелінійні ефекти, не є суттєвими в процесі поширення імпульсів. Коли $L \ll L_{NL}$ й $L > L_D$, еволюція імпульсу визначається ефектом ДГШ, то дія нелінійних ефектів є відносно незначною. Режим, за якого дисперсія домінує, має місце, коли параметри світловоду й імпульсу задовольняють співвідношенню $\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \ll 1$. Ця умова виконується для імпульсів тривалістю 1 пс із піковою потужністю $P_0 \ll 1$ Вт при типових значеннях параметрах оптичного волокна γ й $|\beta_2|$ на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм.

Якщо, $L \ll L_D$, але $L > L_{NL}$, в цьому випадку, ефект ФСМ визначає еволюцію імпульсу у волокні. Режим, при якому нелінійність домінує, має місце, коли параметри світловода й імпульсу визначаються з виразу:

$$\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \gg 1, \quad (2.6)$$

Ця умова досягається для відносно широких імпульсів (тривалістю більше 100 пс) з піковою потужністю $P_0 > 1$ Вт. Коли, довжина світловоду L більше або порівнянна з L_D й L_{NL} , то дисперсія й нелінійність спільно діють в процесі поширення імпульсу уздовж світловоду. Спільний вплив ефектів ДГШ і ФСМ може призводити до якісно іншого поведіння імпульсу порівнянно з тим, коли ДГШ або ФСМ діють окремо один від одного.

Характер поширення оптичного імпульсу – залежить від взаємодії ФСМ і ДГШ [9]. Якщо на ФСМ накладається ДГШ, то для волокна з додатною ДГШ β_2 її вплив стандартний. ФСМ веде до збільшення швидкості розширення імпульсу. Ситуація змінюється, якщо імпульс поширюється в області аномальної від'ємної ДГШ β_2 світловоду. Імпульс спочатку дещо розширюється зі швидкістю набагато меншою, ніж при дисперсійному розширенні, і, потім приходять до стаціонарного стану. У той же час спектр імпульсу звужується, а не розширюється, як у випадку ФСМ, така поведінка пояснюється тим, що частотна модуляція (ЧМ) або по іншому

чирп (chirp), яку наводить ФСМ, додатна, тоді як ЧМ, що наводиться дисперсійним розширенням, від'ємна. Ці дві частотні модуляції майже компенсують одна одну в центральній частині імпульсу. Форма імпульсу перебудовується при поширенні у такий спосіб, щоб ця компенсація була як можна більш повною. Спільна дія ДГШ і ФСМ призводить до того, що часові й спектральні характеристики оптичного сигналу в солітонному режимі залишаються незмінними. Це виконується за умови, що в кожен момент часу швидкість зміни частоти, спричинена дисперсією, дорівнює значенню й протилежна за знаком швидкості зміни частоти, викликаной ФСМ, так що сумарна зміна частоти дорівнює нулю.

Оптичний солітон, у якого параметри вхідного імпульсу задовольняють умову $N^2=L_D/L_{NL}=1$ або $N = 1$, тобто виконується рівність $L_D=L_{NL}$, називається фундаментальним солітоном (рис.2.1).

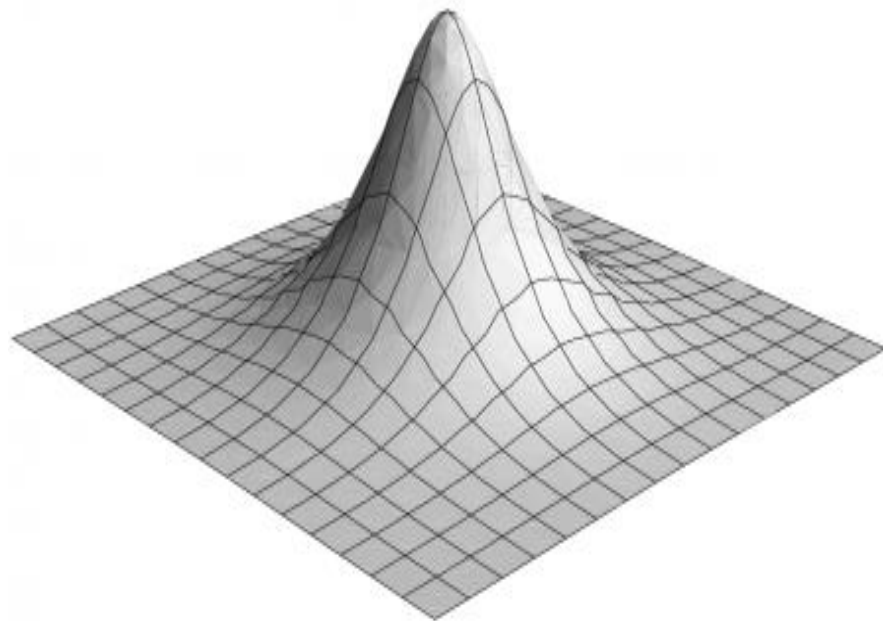


Рисунок – 2.1 Функція гіперболічного секанса – фундаментальний солітон

Імпульси, що відповідають іншим значенням цілого числа N , називаються солітонами вищих порядків, і параметр N є порядком солітона (рис.2.2).

Потужності, необхідні для генерації солітонів N – го порядку, зростають у послідовності 1: 4: 9: 16:

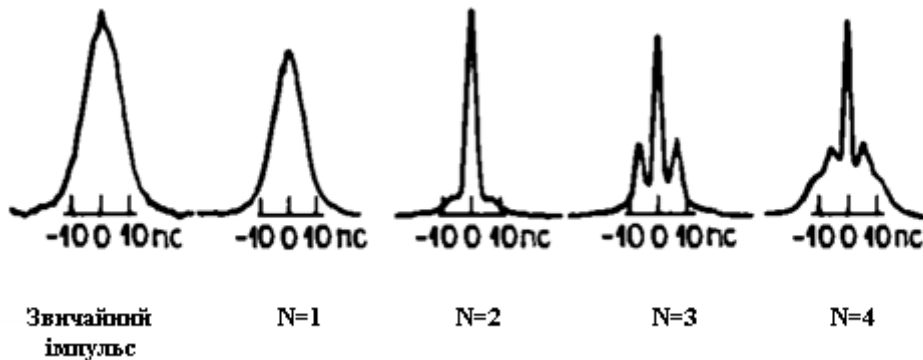


Рисунок – 2.2 Форма солітонів 1 – 4 порядків, P_0 – пікова потужність

Оптичний солітон – типовий груповий солітон [10]. Груповий солітон нагадує амплітудно – модульовані електромагнітні хвилі, його огинаюча несинусоїдальна, вона описується гіперболічним секансом (рис.2.3).

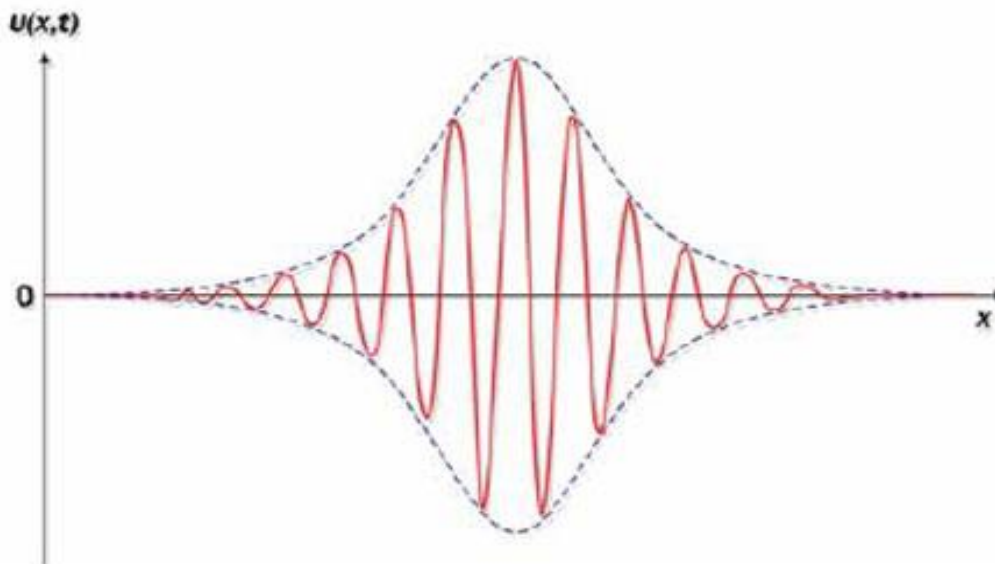


Рисунок – 2.3 Груповий солітон

Швидкість такого солітону не залежить від амплітуди. Він представляє з себе групу відокремлених хвиль, або хвильовий пакет з 14 – 20 хвиль з однією довжиною хвилі, але з різною амплітудою. Найвища хвиля знаходиться посередині групи.

Оптичні солітони описує модель нелінійного рівняння Шредингера (НРШ) [3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A. \quad (2.4)$$

Це рівняння описує поширення пікосекундного оптичного імпульсу в одномодовому волокну. Дане рівняння часто згадується НРШ. Воно містить ефекти оптичних втрат α , ДГШ β і нелінійності волокна γ .

Груповий солітон можна спостерігати в оптичних хвилеводах при потужній накачуванні лазером в режимі синхронізації мод [11]. Його виникнення можна пояснити на прикладі одного з нелінійно – оптичних ефектів – так званої самоіндукованої прозорості. Цей ефект полягає в тому, що середовище, що поглинає світло невеликої інтенсивності, тобто непрозоре, раптово стає прозорим при проходженні крізь нього потужного світлового імпульсу. Щоб зрозуміти, чому це відбувається, згадаємо, чим зумовлене поглинання світла в речовині.

Цей ефект полягає в тому, що середовище, яке поглинає світло невеликої інтенсивності, тобто непрозоре, раптово стає прозорим внаслідок проходження крізь нього потужного світлового імпульсу (рис.2.4).

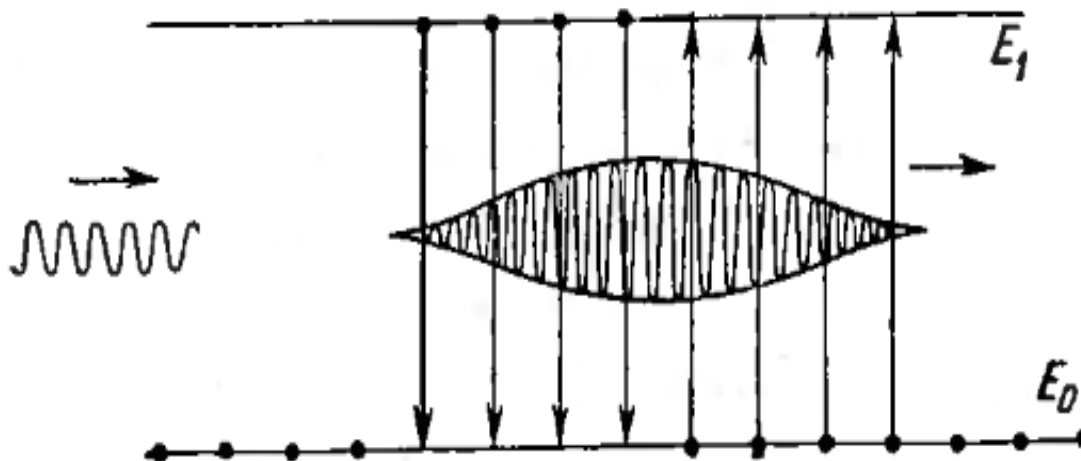


Рисунок – 2.4 Формування групового солітона

Світловий квант, взаємодіючи з атомом, віддає йому енергію і переводить на більш високий енергетичний рівень, тобто в збуджений стан. Фотон при цьому зникає – середовище поглинає світло. Після того як всі атоми середовища переходять у збуджений стан, поглинання світлової енергії припиняється – середовище стає прозорим. Але такий стан не може тривати довго: фотони, що летять слідом, змушують атоми повертатися в початковий стан, випускаючи кванти тієї ж частоти. Саме це і відбувається, коли через таке середовище направляється короткий світловий імпульс великої потужності відповідної частоти. Передній фронт імпульсу перекидає атоми на верхній рівень, частково поглинаючись і стаючи слабкіше. Максимум імпульсу поглинається вже менше, а задній фронт імпульсу стимулює зворотний перехід зі збудженого рівня на основний. Атом випромінює фотон, його енергія повертається імпульсу, який і проходить через середовище. Форма імпульсу виявляється відповідною формі групового солітона.

Для передачі інформації використовують солітонні імпульси *RZ* формату лінійного кодування (без повернення до нуля) У режимі *RZ* імпульс менш чутливий до інтерференції й розмивання в процесі ущільнення сигналу. З метою забезпечення поділу імпульсів початкова тривалість T_0 й час передачі одного біта $T_b = 1/B$ (B – бітова швидкість) повинні відповідати умові $T_0 \ll T_b$. У кожній точці оптичного волокна нормалізований поділ між солітонами визначається $2q_0 = T_b / T_0$, де q_0 – початкова відстань між солітонами [12].

Швидкість передачі бітів B пов'язана з T_0 виразом:

$$B = \frac{1}{T_b} = \frac{1}{2q_0 T_0} \approx \frac{0,88}{q_0 T_{FWHM}}. \quad (2.5)$$

де $T_{FWHM} = 2T_0 \ln(1 + \sqrt{2}) \approx 1,763T_0$ – тривалість імпульсу на напіввисоті за інтенсивністю, що використовується на практиці.

Виконують спроби застосування солітонів у телекомунікаційних системах. Однак перш ніж робити висновок про можливості створення солітонних ліній зв'язку, необхідно розглянути ефекти здатні накласти обмеження на функціональні можливості подібних систем [11].

2.3 Паразитні ефекти, що обмежують можливість побудови солітонних ліній зв'язку

2.3.1 Наявність частотної модуляції в початковому імпульсі

В ідеальній солітонній лінії зв'язку початковий імпульс у світловоді повинен бути без частотної модуляції [12]. Частотна модуляція початкового імпульсу, накладається, на частотну модуляцію зумовлену ФСМ, і порушує баланс між дисперсійними й нелінійними ефектами, необхідний для існування солітонів. Квадратична зміна фази відповідає лінійній частотній модуляції, при якій частота наростає вздовж імпульсу (додатна частотна модуляція) для додатних значень параметра частотної модуляції C . У цьому випадку поведінка імпульсу буває складною: він може звужуватися на початку шляху, потім розширюватися й остаточно встановлюватися після проходження деякої відстані, що залежить від періоду солітона. За деяких критичних значеннях параметрів солітон може навіть зруйнуватися (колапсувати), тому частотна модуляція початкового імпульсу повинна бути зведена до мінімуму. Однак солітон руйнується, якщо C перевищує деяку критичну величину. Критичне значення $C_{крит} = 1,64$ для $N=1$.

2.3.2 Втрати потужності солітона в оптичному волокні

Для збереження властивостей солітона в процесі поширення по світловоду необхідно зберігати його енергію й пікову потужність, які експоненціально зменшуються по довжині світловоду [13]. Зменшена пікова потужність послабляє нелінійні ефекти, необхідні для протидії впливу ДГШ. При цьому тривалість солітонного імпульсу збільшується.

Втрата пікової потужності солітона може бути компенсована внаслідок оптичного підсилювача (ОП). Підсилювач відновлює солітон як фізичний об'єкт, а потім солітонний імпульс самостійно (внаслідок автокорекції) стискається до первісної тривалості. Після винаходу оптичних підсилювачів втрати у волоконних світловодах припинили бути основним фактором, що обмежує передавальну

здатність волоконних систем зв'язку. Однак проблема оптимального підсилення оптичних солітонів – збільшення енергії солітонів, за повного збереження біта інформації й пружного характеру їхньої взаємодії, усе ще залишається однією із важливих проблем оптичних солітонних ліній зв'язку. Застосовуються два основних методи підсилення оптичних солітонів: швидке неадіабатичне підсилення у лінії із зосередженими підсилювачами й адіабатичне підсилення в розподіленому активному середовищі [14].

Для скорочення дисперсійної хвилі необхідно зменшити відстань між підсилювачами [12]. Довжина підсилювальної ділянки L_A й дисперсійна довжина L_D повинні задовольняти умові $L_A \ll L_D$, що дозволяє розглядати дисперсію й нелінійність як малі збудження, а загасання й підсилення як головні фактори, що визначають еволюцію імпульсу між підсилювачами. Ці фактори викликають коливання потужності, але форма імпульсу залишається майже постійною. Оскільки дисперсійна довжина пропорційна квадрату тривалості солітона, умову $L_A \ll L_D$ важко реалізувати на практиці для систем передачі зі швидкістю $B > 10$ Гбіт/с, тому що для них дисперсійна довжина ≤ 10 км.

2.3.3. Взаємодія солітонних імпульсів

У системі зв'язку солітонний імпульс є інформаційним імпульсом. Збільшення швидкості передачі інформації призводить до зменшення відстань між такими імпульсами настільки, що не можна уникнути їх взаємодії [15]. За мало відстані між ними така взаємодія може періодично приводити до колапсу солітонів, що призводить до помилок в переданій інформації. Якщо не вживати спеціальних заходів, то за використанні імпульсів шириною 2–3 пс солітонні системи здатні забезпечити передачу на швидкостях порядку 40 Гбіт / с (тобто на рівні STM – 256) з мінімальним взаємним впливом. Внаслідок спеціальних заходів, наприклад установки визначеної ненульової відносної фази або нерівній відносній амплітуди сусідніх солітонів, можна довести швидкість передачі до 80 Гбіт / с (тобто до рівня OC – 1536, SONET) за довжини регенераційної ділянки до 500 км.

2.3.3.1 Стиснення солітонних імпульсів

Одним із методів зменшення ефекту взаємодії солітонів і збільшення швидкості солітонних систем передачі є стиснення солітонних імпульсів, засноване на використанні дисперсії групових швидкостей [16].

Ідея стиснення досить проста: імпульс стискається (тобто зменшується відстань між його фронтом і зрізом) при затримці приходу фронту або прискоренні приходу зрізу імпульсу. Для цього, наприклад, імпульс повинен бути лінійно частотно модульований. Лінійна частотна модуляція (ЛЧМ) позитивна, якщо частота лінійно наростає від фронту до зрізу імпульсу, і негативна, якщо вона лінійно наростає від зрізу до фронту. Для стискання імпульсу з позитивною ЛЧМ потрібна негативна ДГШ, а для імпульсу з негативною ЛЧМ – позитивна ДГШ.

Компресори імпульсів, основані на нелінійних ефектах, діляться на дві категорії:

1 волоконно – решітчаті компресори застосовуються для волокна з позитивною ДГШ;

2 компресори, засновані на ефекті багатосолітонного стиснення, використовуються для волокна з негативною ДГШ

У волоконно – решітчатих компресорах імпульс спочатку поширюється у світловоді з позитивною ДГШ, набуваючи ЛЧМ внаслідок комбінації нелінійних та дисперсійних ефектів, а потім піддається стисненню за допомогою пари дифракційних решіток, що створюють негативну ДГШ. Ці методи застосовуються в діапазоні малих довжин хвиль (так звані перше і друге спектральні вікна – відповідно, 850 і 1310 нм) і не використовуються для стиснення солітонів, що працюють в третьому спектральному вікні (1550 нм).

Компресор, заснований на ефекті багатосолітонного стиснення, застосовує світловод з негативною ДГШ [17]. Його можна використовувати в третьому спектральному вікні. Внаслідок ефекту фазової самомодуляції такий світловод сам діє як компресор. Додаткова компресія може бути реалізована для солітонів вищих

порядків. Вона обумовлена тим, що в початковій фазі розповсюдження солітон вищого порядку стискається. «Відсікти» цю фазу, тобто залишити солітон стислим, дозволяє вибір відповідної довжини відрізка початкової фази світловода. При цьому коефіцієнт стиснення такого солітонного компресора залежить від обраного порядку солітону N .

Використання солітонів вищих порядків, у свою чергу, визначається можливістю досягнення тієї чи іншої необхідної пікової потужності солітону, а це досить складно, якщо врахувати, що вона росте пропорційно квадрату N [18].

У граничній області (друге спектральне вікно) можливе застосування обох методів, що дозволяє отримати великі (до 5 тис.) коефіцієнти стиснення і імпульси тривалістю в кілька фемтосекунд ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$).

2.4 Висновки

1. Розглянуто нелінійні ефекти оптичного волокна і розглянута теорія поширення електромагнітних хвиль у нелінійному середовищі з дисперсією. Розглянуто фізичні принципи поширення солітонних імпульсів по одномодових оптичних волокнах.

2. Проведено огляд матеріалу, присвяченого ефектам, що обмежують створення солітонних ліній зв'язку: частотна модуляція початкового імпульсу, втрата пікової потужності солітону, взаємодія солітонних імпульсів; відзначені різні підходи мінімізації впливу даних ефектів.

3. Дослідження теоретичних закономірностей поширення надкоротких оптичних імпульсів у нелінійному режимі волоконних світловодів дозволяють технічно реалізувати принципи проектування оптичних транспортних систем, побудованих за солітонною технологією.

3 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СОЛІТОННИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

Солітонні ВОСП займають важливе місце серед перспективних систем передачі [10]. Розповсюдження солітонних імпульсів по оптичному волокну відбувається тільки за умов балансу аномальної дисперсії групової швидкості та нелінійної фазової само модуляції, що призводить до їхніх унікальних властивостей, зокрема – стійкості форми імпульсів при поширенні в ОВ на досить великі відстані. Але ідеальні солітони можуть існувати в ОВ тільки за умов сталої дисперсії та відсутності втрат енергії. У реальних ОВ такі умови не реалізуються, внаслідок чого стійкість солітонів порушується. Ідея використання дисперсійного управління (ДУ) значно поліпшила якість солітонних ВОСП, розширила межі енергій, необхідних для одержання стійких солітонних імпульсів. Застосування ДУ дозволяє не тільки підвищити швидкість та якість передавання інформації у ВОСП з часовим розділенням каналів (TDM – time division multiplexing), в яких і раніше, солітони давали рекордні показники, але і проектувати солітонні ВОСП, зі спектральним розподілом каналів (WDM – wave division multiplexing, DWDM – dense division multiplexing).

3.1 Побудова солітонних ліній зв'язку з дисперсійним управлінням

Використання оптичних підсилювачів у лінійних трактах солітонних ВОСП може приводити до формування дисперсійної хвилі, що стає суттєвою перешкодою в роботі лінії зв'язку [11]. Для скорочення, дисперсійної хвилі необхідно, щоб довжина підсилювальної ділянки L_A і дисперсійна довжина L_D задовольняли умові $L_A \ll L_D$. Ця умова обмежує тривалість солітона значенням 10 пс у волокні зі зміщеною дисперсією при $\beta_2 = -1 \text{ пс}^2/\text{км}$ й $L_A = 30 \text{ км}$. Застосовуються два підходи до побудови схем солітонних ВОСП. У першому підході застосовується схема хвильового мультиплексування каналів, кожний з яких функціонує в режимі усередненої солітонної динаміки, у другому підході використовуються надкороткі солітонні імпульси з часовим мультиплексуванням. Для досягнення довжин

підсилювальних ділянок, останній підхід вимагає передавання за межами середньосолітонного режиму.

З метою подолання обмежень, спричинених режимом усередненої солітонної динаміки, було запропоновано використовувати дисперсійне управління на основі спеціально розроблених оптичних волокон з особливим дисперсійним профілем. Такі волокна називаються волокнами з дисперсією, що змінюється за довжиною (dispersion – decreasing fiber, DDF) [19]. Використання волокна зі зменшуваним значенням параметра ДГШ по його довжині дозволяє подолати обмеження $L_A \ll L_D$. Волокна DDF сконструйовані таким чином, що знижуваний по їхній довжині параметр ДГШ повністю компенсує зменшену через оптичні втрати у волокні фазову само модуляцію. При цьому фундаментальний солітон поширюється без зміни тривалості, навіть за наявності значних втрат у волокні. У принципі, якщо енергія солітона відновлюється наприкінці кожного сегмента волокна DDF, перед наступним сегментом DDF в ідеальному випадку солітон меншої тривалості, ніж тривалість, встановлена межею періодичної схеми підсилення, стійко розповсюджується по довжині волоконної лінії з підсилювальною ділянкою 50–100 км.

Використання дисперсійних карт, у яких волоконні секції з додатною й від'ємною дисперсією чергуються, солітонний режим може підтримуватися в лініях з дисперсійним управлінням з нульовим середнім значенням дисперсії, або за невеликого додатного або від'ємного значення дисперсії. У такій системі тривалість імпульсу і його форма еволюціонують періодично. Імпульс, у якого первісна форма й тривалість відновлюються після кожного періоду карти, називається солітоном з дисперсійним управлінням (ДУ солітоном). У лініях з ДУ нелінійний самовплив солітона не компенсує дисперсію волокна на кожній окремій ділянці. Солітон поводить себе аналогічно лінійному світловому імпульсу, розширення якого на ділянці з додатною дисперсією компенсується стиском на ділянці з від'ємною дисперсією, що призводить до стійкості форми солітона.

Кожен період карти L_m (рис.3.1) складається із двох волоконних секцій із протилежними значеннями дисперсії β_{2a} й β_{2n} (аномальною й нормальною) довжиною

l_a й l_n . Період карти L_m визначається як $L_m=l_a+l_n$. Кожна підсилювальна ділянка L_A може містити один або кілька періодів карти. Довжина підсилювальної ділянки й період дисперсійної карти пов'язані співвідношенням $L_A = mL_{map}$, де m – ціле число

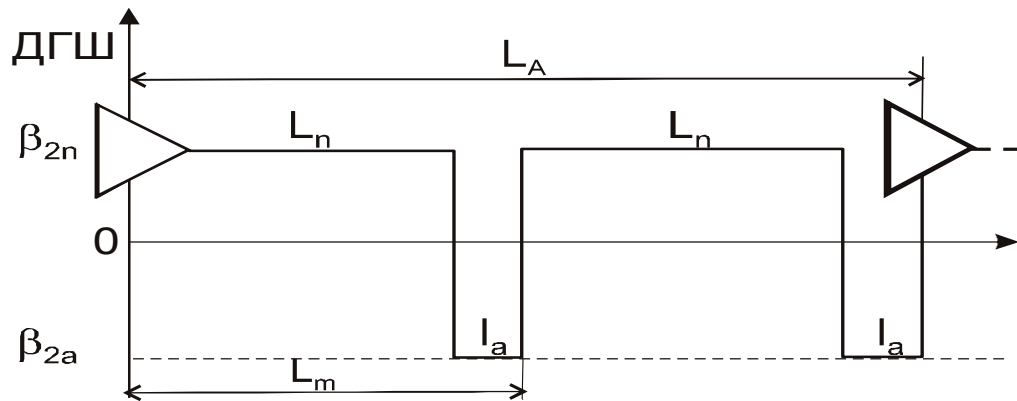


Рисунок – 3.1 Створення дисперсійної карти з різних волокон

На високих бітових швидкостях потрібно щільне дисперсійне управління ($m \gg 1$). Коли підсилювальна ділянка містить більше одного періоду карти, систему називають системою із щільним дисперсійним управлінням.

Період зміни світлового імпульсу може збігатися з періодом модуляції дисперсії ВОЛЗ або в ціле число раз перевершувати його. На характер еволюції світлових імпульсів істотно впливає величина стрибка дисперсії в лінії. Якщо стрибок дисперсії малий, то форма світлового імпульсу залишається близькою, до форми класичного солітона і його еволюція описується НРШ. Якщо стрибок дисперсії достатньо великий, то світловий імпульс набуває форму гауссівського пучка із частотною модуляцією. Таким чином, динаміка ДУ солітона істотно відрізняється від солітона усередненої солітонної динаміки при поширенні у волокні зі сталою або слабко змінною дисперсією, а також – від фундаментального солітона.

Властивості ДУ солітонів залежать від декількох параметрів карти. Якщо період карти є малою частиною нелінійної довжини, то нелінійні ефекти – відносно малі, і імпульс лінійно еволюціонує протягом одного періоду карти. При більш протяжному поширенні, солітони можуть формуватися, якщо ефекти ФСМ збалансовані середньою дисперсією. Можна зробити висновок, що солітони можуть

існувати навіть за умови, що не тільки пікова потужність, але і тривалість і форма таких солітонів періодично коливається.

3.2 Методи визначення параметрів солітонного імпульсу

Для визначення параметрів вхідного імпульсу, які забезпечують періодичне поширення загальноприйнятим методом є варіаційний підхід [12].

У випадку одномодового оптичного волокна розповсюдження електромагнітної хвилі описується рівнянням НРШ наступного вигляду:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \gamma |A|^2 A = -\frac{i\alpha}{2} A, \quad (3.1)$$

де $A(z,t)$ – повільно змінювана амплітуда хвильового пакету; α – втрати у світловоді; β_2 – величина дисперсії групових швидкостей; γ – нелінійний коефіцієнт (параметр нелінійності при ФСМ).

У волокні з втратами тривалість імпульсу починає збільшуватися під впливом ДГШ. У лінійному режимі, накопичену по довжині волокна дисперсію можна компенсувати на приймальному кінці. У нелінійному режимі даний метод використовувати не можна. При установці підсилювачів, що забезпечують компенсацію загасання, наявність ДГШ також може призвести до збільшення випадкових варіацій затримки солітонів у системі. Дана проблема вирішується застосуванням дисперсійного управління. Але параметри β_2 , γ і α в цьому випадку є періодичними функціями z , тому що волоконні секції, які утворюють дисперсійну карту, мають різні значення цих параметрів. У цьому випадку процес рішення НРШ ускладнюється.

Варіаційний підхід пропонує простий наближений аналітичний метод розв'язання рівняння НРШ. Даний метод може використовуватися для вивчення різноманітних проблем у системах з дисперсійним управлінням.

Для вивчення процесу поширення надкоротких імпульсів необхідно використовувати більш узагальнену теорію [19]. Як загальна теорія поширення імпульсів в оптичних волокнах може використовуватися метод моментів.

Метод моментів був розроблений ще в 1971 році для усередненого описування хвильових пучків у нелінійних середовищах.

Основна ідея методу моментів полягає в тому, що оптичний імпульс розглядається як частинка, для якої енергія E , положення T і частота Ω , визначаються як:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |B|^2 dt, \quad (3.2)$$

$$T = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t |B|^2 dt, \quad (3.3)$$

$$\Omega = \frac{i}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} (B^* \frac{\partial B}{\partial t} - B \frac{dB^*}{dt}) dt, \quad (3.4)$$

Цей метод забезпечує просту аналітичну теорію для вивчення еволюції параметрів імпульсу, надає можливість досліджувати процес розповсюдження імпульсу.

3.3 Математичні моделі солітонних ліній зв'язку

3.3.1 Модель солітонної ВОЛЗ для розповсюдження фундаментального солітона

Еволюція параметрів імпульсу фундаментального солітона описується такими рівняннями [11]:

Еволюція енергії енергія імпульсу залишається постійною при розповсюдженні імпульсу по волокну, так сам, як і при розповсюдженні імпульсу в ідеальному волокні без втрат:

$$\frac{dE}{dz} = 0. \quad (3.5)$$

Еволюція частоти – на положення імпульсу впливає будь – яке частотне зрушення, викликане ДГШ або дисперсією третього порядку:

$$\frac{dT}{dz} = \beta_2 \Omega + \frac{\beta_3 \Omega^2}{2} + \frac{\beta_3}{6\tau^2} (1 + (\pi^2 / 4) C^2) + \frac{\bar{\gamma} E}{2\omega_0 \tau}. \quad (3.6)$$

Еволюція чирпа:

$$\frac{d\Omega}{dz} = \frac{\bar{\gamma} E C}{3\omega_0 \tau^3} - \frac{4\bar{\gamma} T_R E}{15\tau^3}. \quad (3.7)$$

Еволюція тривалості імпульсу:

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{\beta_2 C}{\tau} + \beta_3 \Omega \frac{C}{\tau}. \quad (3.8)$$

3.3.2 Модель солітонної ВОЛЗ для розповсюдження ДУ солітона

Еволюція параметрів імпульсу солітона з ДУ описується рівняннями:

Рівняння еволюції енергії імпульсу:

$$\frac{dE}{dz} = 0. \quad (3.9)$$

Еволюція положення гауссівського імпульсу:

$$\frac{dT}{dz} = \beta_2 \Omega + \frac{\beta_3}{2} \left[\Omega^2 + \frac{(1+C^2)}{2\tau^2} \right] + \frac{3\bar{\gamma} E}{\sqrt{8\pi\omega_0\tau}}. \quad (3.10)$$

Вираз еволюції частоти, у випадку гауссівського імпульсу:

$$\frac{d\Omega}{dz} = \frac{\bar{\gamma} E C}{\sqrt{2\pi\omega_0\tau^3}} - \frac{\bar{\gamma} T_R E}{\sqrt{2\pi\tau^3}}. \quad (3.11)$$

Еволюція параметра чирпа, у випадку гауссового імпульсу:

$$\frac{dC}{dz} = 2\beta_2\Omega^2 + \beta_2\left(\frac{(1+C^2)}{\tau^2}\right) + \beta_3\Omega^3 + \beta_3\left(\frac{(1+C^2)}{\tau^2}\right) + \frac{4\bar{\gamma}E\Omega}{\sqrt{2\pi\omega_0\tau}} + \frac{\bar{\gamma}E}{\sqrt{2\pi\tau}}. \quad (3.12)$$

Рівняння еволюції тривалості гауссівського імпульсу:

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{\beta_2 C}{\tau} + \frac{\beta_3 \Omega C}{\tau}. \quad (3.13)$$

Розглянуті вище, рівняння еволюції параметрів імпульсу залежать від форми імпульсу, і тому не можуть застосовуватися, поки є не відомою форма імпульсу.

У випадку фундаментальних солітонів форма імпульсу може апроксимуватися імпульсом форми гіперболічного секанса, що зберігає своє значення навіть за зміни його тривалості. Іншим прикладом є ДУ солітон, форма якого в енергозберігаючій області має вигляд, близький до гауссівський кривої. У цьому випадку гауссівський імпульс зберігає свою форму під час розповсюдження в оптичних волокнах, якщо нелінійна довжина є набагато більшою дисперсійної довжини.

3.4 Фактори впливу на функціонування солітонних ВОСП

Функціональні можливості солітонних ВОСП із дисперсійним управлінням обмежені, головним чином, шумом посиленого спонтанного випромінювання, внесеним оптичними підсилювачами, які компенсують волоконні втрати [13]. Спектральна щільність посиленого спонтанного випромінювання близька до постійної й схожа на білий або тепловий шуми. Вплив спонтанної емісії полягає в додаванні флуктуації до потужності посиленого сигналу, які перетворюються в поточні флуктуації в процесі фотодетектування. Важливою характеристикою підсилювача, є параметр F_n , який називають шум- фактором, або, коефіцієнтом шуму підсилювача, і визначається, як $F_n = 2n_{sp}(G- 1)IG \approx 2n_{sp}$, де, G – коефіцієнт підсилення підсилювача, а $n_{sp} = N_2/(N_2- N_1)$ – коефіцієнт спонтанної емісії,

пов'язаний з атомною заповненістю N_1 й N_2 рівнів, основного й збудженого станів. За наявності каскадного з'єднання декількох оптичних підсилювачів, розташованих уздовж ВОЛЗ, шум ASE, що генерується в ОП, повторює цикл ослаблення й посилення аналогічно тому, як це відбувається з інформаційним сигналом. З огляду на те, що вхідний шум ASE підсилюється кожним ОП, і те, що він додається до шуму, який генерується ОП, можна припустити, що загальна потужність шуму ASE збільшується майже пропорційно числу ОП, а потужність сигналу зменшується на цю саму величину. Шум ASE накопичується, навіть якщо в кожному ОП використовуються вузькосмугові фільтри, тому що шум існує у всьому діапазоні частот, який включає й частоту сигналу. Профіль спектра шуму ASE також змінюється при переході від підсилювача до підсилювача. Якщо шум ASE від першого ОП є вхідним для другого ОП, профіль посилення другого підсилювача змінюється внаслідок потужності шуму ASE, завдяки ефекту насичення підсилення. Такий ефект повторюється на кожному ОП аж до останнього. Насичення ОП, що виникає при цьому, знижує посилення підсилювачів, розташованих далі по ВОЛЗ. Отже, у міру поширення рівень сигналу знижується, у той час як рівень ASE збільшується. Накопичення шуму ASE впливає на відношення сигнал– шум і коефіцієнт помилок системи, тим самим, знижуючи функціональні можливості системи.

Якість функціонування телекомунікаційної системи характеризується параметром коефіцієнта помилок (bit error rate, BER), що визначається відношенням числа помилково інтерпретованих символів до загального числа переданих символів. Робота цифрових ВОСП вважається нормальною тільки в тому випадку, якщо коефіцієнт бітових помилок BER не перевищує певний допустимий рівень [20]. Сучасні оптичні лінії зв'язку будуються так, щоб задовольнити будь– який мережний стандарт. Тому при їхньому розрахунку й будівництві передбачається досить жорстке обмеження рівня помилок (від $BER = 10^{-11}$ до $BER = 10^{-15}$).

3.5 Оцінка функціонування солітонних ВОСП

Для оцінки функціонування системи необхідно обчислити BER системи на прийомному кінці, з урахуванням шумів. Будучи синхронізованим з оптичним сигналом, що надходить, фотоприймач періодично в оптимальні моменти часу проводить обробку прийнятого сигналу – реєструє інтенсивність оптичного сигналу й по певному граничному значенню вирішує, який сигнал прийнято: нуль чи одиниця. У реальних системах зв'язку значення фотоструму, що відповідають і нулю й одиниці, флюктуують у часі через наявність шумів. Такі флюктуації струму можуть привести до помилкової інтерпретації інформаційного символу. Імовірність помилкового прийому визначається як:

$$BER = p(1) P(1/0) + p(0) P(0/1), \quad (3.14)$$

де $p(1)$ і $p(0)$ – апіорні ймовірності появи одиниці й нуля; $P(1/0)$ і $P(0/1)$ – ймовірності помилкового прийому.

Графік Q - фактора (фактор якості передачі) представлено на рис. 3.2.

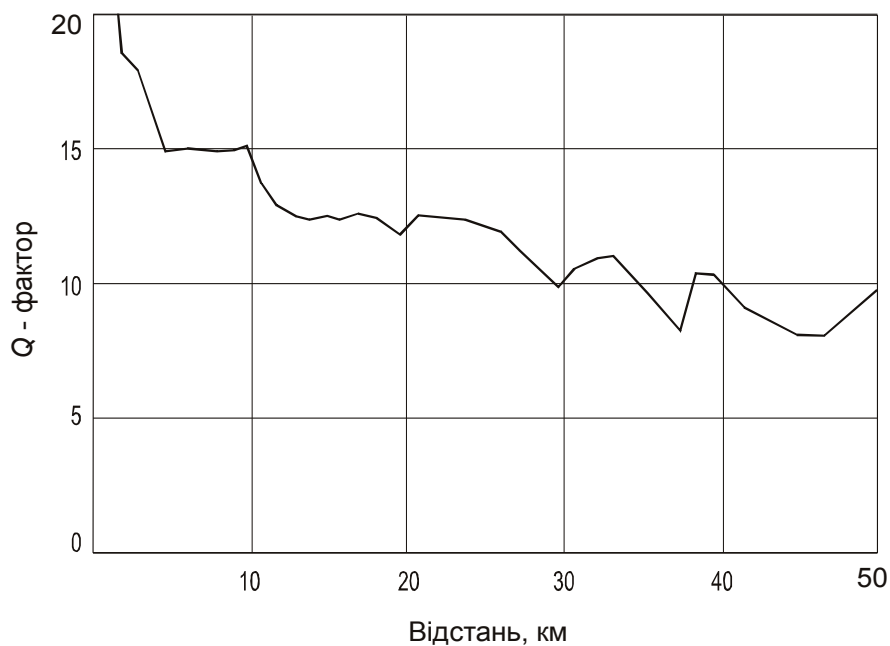


Рисунок – 3.2 Q - фактор 40 Гбіт/с солітонної системи

При оцінці впливу шуму ASE, що вносить флуктуації енергії імпульсу необхідно використовувати рівняння для Q - фактора, виражене через енергію імпульсу [19]:

$$Q = \frac{E^{(1)} - E^{(0)}}{\sigma_e^{(1)} + \sigma_e^{(0)}}, \quad (3.15)$$

де $E^{(1)}$, $(\sigma_e^2)^{(1)}$, $E^{(0)}$, $(\sigma_e^2)^{(0)}$ – енергія й дисперсія енергії одиничних та нульових бітів; $\sigma_e^2 = \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2$.

Отже, щоб оцінити Q - фактор необхідно обчислити дисперсії енергій одиничних і нульових бітів на прийомному кінці.

Q – фактор обернено пропорційний числу $M^{1/2}$, де M – кількість підсилювачів. Тобто, наявність великої кількості підсилювачів у ВОЛЗ знижує Q – фактор й, отже, збільшує BER .

Як доповнення до впливу шумів, на BER впливають також і випадкові варіації затримки солітонів, тому що вносять відхилення від ідеального положення солітона в центрі бітового інтервалу. Часова затримка солітонів у волокні призводить до випадкових відхилень відносно середнього значення. Навіть за збереження форми солітонів наявність варіації їхньої затримки, тобто часу надходження оптичних інформаційних бітів у приймач, викликає взаємодію солітонів і призводить до появи помилок.

Фізична причина випадкових варіацій затримки солітонів полягає в наступному. Шум ASE підсилювачів вносить випадкові флуктуації амплітуди, частоти й часового положення імпульсу. Часова залежність зміни фази призводить до флуктуації частоти імпульсу. Частотні коливання (варіації носійної частоти) впливають на ДГШ і, отже, на швидкість поширення імпульсу по оптичному волокну. Оскільки флуктуації частоти випадкові, то тривалість поширення імпульсу також випадкова. Випадкові зміни швидкості призводять до випадкових зсувів часової позиції імпульсу, що призводить до затримок солітонів. Виникнення частотної модуляції шуму посиленого спонтанного випромінювання вперше, вивчалися Гордоном і Хаусом, одержали назву ефекту Гордона – Хауса або часового

джитера (timing jitter) Гордона – Хауса. Таким чином, максимально можлива відстань передавання й гранична тривалість солітонів, що розповсюджуються у волокні з постійною й змінною дисперсією, обмежується ефектом Гордона – Хауса.

3.6 Рівняння для оцінки джитера Гордона– Хауса в першому сегменті оптичного тракту дисперсійної карти

Шум посиленого спонтанного випромінювання впливає на всі три параметри (енергія E , положення T і частота Ω) й змінює їх у випадковим чином [21]. Оскільки за відсутності ефекту вимушеного комбінаційного саморозсіювання, флуктуації енергії імпульсу не впливають на позицію й частоту імпульсу, то рівнянням енергії можна в цьому випадку знехтувати. Однак, відповідно флуктуації енергії імпульсу безпосередньо впливають на BER системи. Тому в рівняння для частоти й позиції імпульсу необхідно включити викликаний підсилювачем шум,

Для розрахунку часової затримки солітонів необхідно визначити дисперсію й функцію взаємної кореляції випадкових величин у кожному підсилювачі.

За зростання підсилення волоконного підсилювача, шум ASE зменшується з ростом вихідної потужності, або тоді, коли настає стан насичення для ОП, що використовуються як підсилювачі потужності, а також попередніх підсилювачів, якщо в них використовуються вузькосмугові фільтри, цей тип шуму можна ігнорувати.

За цими формулами визначається дисперсія й функція взаємної кореляції частоти й часового положення імпульсу в кожному i -тому підсилювачі та шум внесений у них i -тим підсилювачем [22]:

$$\langle \Omega^2 \rangle_i = \langle \Omega^2 \rangle_{i-1} + \langle \delta \Omega^2 \rangle_i, \dots \quad (3.16)$$

$$\langle \Omega T \rangle_i = \langle \Omega T \rangle_{i-1} + b_2 \langle \Omega^2 \rangle_{i-1} + \langle \delta \Omega \delta T \rangle_i, \quad (3.17)$$

$$\langle T^2 \rangle_i = \langle T^2 \rangle_{i-1} + b_2^2 \langle \Omega^2 \rangle_{i-1} + 2b_2 \langle \Omega T \rangle_{i-1} + \langle \delta T^2 \rangle_i. \quad (3.18)$$

Де $b_2 = \int_0^{L_A} \beta_2(z) dz$, δT_i й $\delta \Omega_i$ – відповідно є випадковими флуктуаціями часового положення.

Записані формули справедливі для імпульсів будь – якої форми. Раніше нами були розглянуті два різновиди імпульсів, тобто фундаментальний солітон і гауссівський чирп– імпульс.

3.6.1 Рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса в процесі поширення фундаментального солітона

В фундаментальних солітонних ВОСП на основі волокон з дисперсією, що змінюється по довжині лінії, процес управління дисперсією відбувається одночасно із процесом управління втратами у волокні, тому поширення солітона описується рівнянням НРШ за винятком того, що β_2 тепер є функцією z : $|\beta_2 Z| = |\beta_2(0)| \exp(-az)$. В даному рівнянні пікова потужність солітона й отже нелінійний коефіцієнт γ також експоненціально зменшуються, внаслідок загасання в оптичному волокні. Тому порядок солітона $N = 1$ зберігається, незважаючи на втрати потужності.

Середній час зсуву (timing jitter) солітона, викликаного ефектом Гордона – Хауса після M підсилювачів, визначається формулою:

$$\sigma_{TX}^2 = \frac{b_2^2}{6} M(M-1)(2M-1) \left(\frac{2S}{3E_0\tau_0^2} \right) + M \left(\frac{\pi^2 S\tau_0^2}{6 E_0} \right). \quad (3.19)$$

Число підсилювачів M визначається, як $M = L_t/L_A$.

3.6.2 Рівняння для оцінки джитера Гордона– Хауса в процесі поширенні ДУ солітона

Традиційна система з дисперсійним управлінням складається з періодичної послідовності волокон з аномальним і нормальним значенням параметра ДГШ [21]. Оптичний підсилювач, що компенсує волоконні втрати, може бути встановлений

після одного або декількох періодів дисперсійної карти. Кожен підсилювач відновлює енергію імпульсу до первісного значення, але, у той самий час, вносить шум спонтанного випромінювання. Не дивлячись на те, що ДУ солітон не зберігає свою тривалість у процесі поширення, він еволюціонує періодично, при цьому тривалості імпульсу й чирп відновлюються до вихідних значень після кожного періоду дисперсійної карти L_m . Оскільки довжина підсилувальної ділянки L_A кратна довжині дисперсійної карти L_m , то енергія, тривалість і чирп імпульсу відновлюються після кожного підсилювача. Тому солітон еволюціонує періодично від підсилювача до підсилювача.

Середній час зсуву солітонів після M підсилювачів визначається виразом [23]:

$$\sigma_{TX}^2 = \frac{b_2^2}{6} M(M-1)(2M-1) \left(\frac{S}{E_0} \frac{(1+C_0^2)}{\tau_0^2} \right) + b_2 M(M-1) \left(\frac{SC_0}{E_0} \right) + \left(\frac{S\tau_0^2}{E_0} \right). \quad (3.20)$$

Отримана формула дозволяє зробити висновок, що параметр джитера Гордона – Хауса має квадратичну залежність від відстані поширення солітона, подібно випадку фундаментальних солітонів. Але викликані підсилювачем флуктуації відрізняються від випадку фундаментального солітона через розходження у формі імпульсів. Крім цього, оскільки ДУ солітони початково чирповані, то величина часової затримки залежить також і від початкового чирпа.

3.7 Рівняння для оцінки джитера Гордона – Хауса наступних сегментів оптичного тракту дисперсійної карти

Внесений підсилювачем шум залежить від величини коефіцієнта підсилення підсилювача [24]. Шум накопичується експоненціально залежно від посилення підсилювачів. Отже, чим більший коефіцієнт підсилення, тим більший шум, внесений у систему. Нагромадження шуму ASE можна зменшити шляхом зниження відстані між підсилювачами, і внаслідок цього – коефіцієнта підсилення. При цьому зберігається умова рівності загального посилення загальним втратам у тракці

передачі. При зменшеному коефіцієнті підсилення, величина накопиченого шуму знижується, і це дозволяє знизити вплив ефекту Гордона – Хауса. Отримаємо аналітичний вираз для розрахунку часової затримки солітонів у випадку наявності декількох підсилювачів у періоді дисперсійної карти.

Для того щоб узагальнити отримані вище вирази на випадок застосування декількох підсилювачів у періоді карти, припустимо, що в одному періоді встановлено n_a підсилювачів, кожний з яких має коефіцієнт підсилення G_j і волоконна лінія зв'язку має M періодів дисперсійної карти. Використовуємо підрядковий індекс i для позначення підсилювача в межах періоду карти й підрядковий індекс j , щоб позначити періоди карти.

Таким чином, можна визначити джитер Гордона– Хауса після M періодів карти, у кожному з яких використовується n_a підсилювачів, у вигляді виразу:

$$\sigma_{GX}^2 = K1b_2^2M(M-1)(2M-1)/6 + K2b_2M(M-1) + K3M, \quad (3.21)$$

Формула **Error! Reference source not found.** показує, що цей підхід дозволяє одержати аналітичний вираз для джитера Гордона – Хауса також і у випадку декількох підсилювачів у кожному періоді карти. Дану формулу можна також застосувати також і до випадку ДУ солітонів. Але коефіцієнти $K1$, $K2$ і $K3$, у цьому випадку визначаються як:

$$K1 = \sum_{i=1}^{n_a} \langle \delta\Omega^2 \rangle, \quad (3.22)$$

$$K2 = \sum_{i=1}^{n_a-1} \langle \delta\Omega^2 \rangle \left(\sum_{k=i+1}^{n_a} d_k \right) + \sum_{i=1}^{n_a-1} \langle \delta\Omega \delta T \rangle, \quad (3.23)$$

$$K3 = \sum_{i=1}^{n_a} \langle \delta T^2 \rangle + 2 \sum_{i=1}^{n_a-1} \langle \delta\Omega \delta T \rangle \left(\sum_{k=i+1}^{n_a} d_k \right) + \sum_{i=1}^{n_a-1} \langle \delta\Omega^2 \rangle \left(\sum_{k=i+1}^{n_a} d_k \right)^2. \quad (3.24)$$

Дисперсія й функція взаємної кореляції випадкових величин $\delta\Omega$ і δT у вищерозглянутих виразах визначаються рівностями (3.16), (3.18).

3.8 Аналіз залежності джитера Гордона – Хауса від параметрів лінійного тракту

Для аналізу впливу джитера Гордона – Хауса розглянемо 10 Гбіт/с солітонні системи з дисперсійним управлінням, які використовують дві дисперсійні карти з типовим значенням періоду, що на практиці становить $L_m=80$ км. Відстань поширення – 8000 км. Результати отримані за допомогою пакета MATLAB R2010a, текст програми у додатку А.

Перша карта (рис.3.3), складається з 76-км секції з аномальною ДГШ, волокном зі зміщеною дисперсією DSF ($D = 4$ пс/(нм км), $\alpha = 0,2$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²), і 3,6 – км секції волокна, що компенсує дисперсію DCF ($D = -80$ пс/(нм км), $\alpha = 0,4$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²), при цьому результуюча середня дисперсія є аномальною і складає $D = 0,2$ пс/(нм км).

Для імпульсу, що використовується, з тривалістю $\tau_0 = 18,02$ пс (повна ширина на половині максимуму $T_{FWHM}=30$ пс) інтенсивність карти, визначається як:

$$S_{map} = |\beta_a L_a - \beta_n L_n| / T_{FWHM}^2, \quad (3.25)$$

де β_a й β_n – дисперсійні параметри аномальної й нормальної волоконної секції ($\beta_2 = -\lambda D / 2\pi c$).

Інтенсивність карти, задана рівністю Error! Reference source not found., визначає ступінь зміни величини дисперсії групових швидкостей між двома волоконними секціями періоду карти.

Для розглянутої вище карти, інтенсивність має відносно низьке значення $S_{map} = 0,62$.

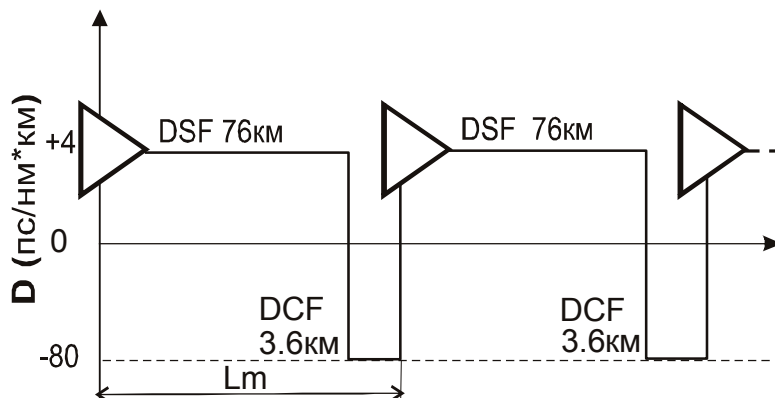


Рисунок – 3.3 Перший варіант дисперсійної карти

Підсилювач розташовано наприкінці кожного періоду дисперсійного управління, довжиною $L_m=79,6$ км. Спектральна щільність шуму розраховувалася від коефіцієнта спонтанної емісії $n_{sp}=1,3$ (шум – фактор приблизно дорівнює 4.1 дБ для зосередженого підсилювача) і $h\nu = 0,8\text{eV}$. Значення вхідного чирпа й пікової потужності солітонів, що поширюються в лінії: $C_0=0,25$ й $P_0=3,04$ мВт. На рис.3.4 приведені зміни джитера на виході кожного підсилювача в залежності від відстані поширення.

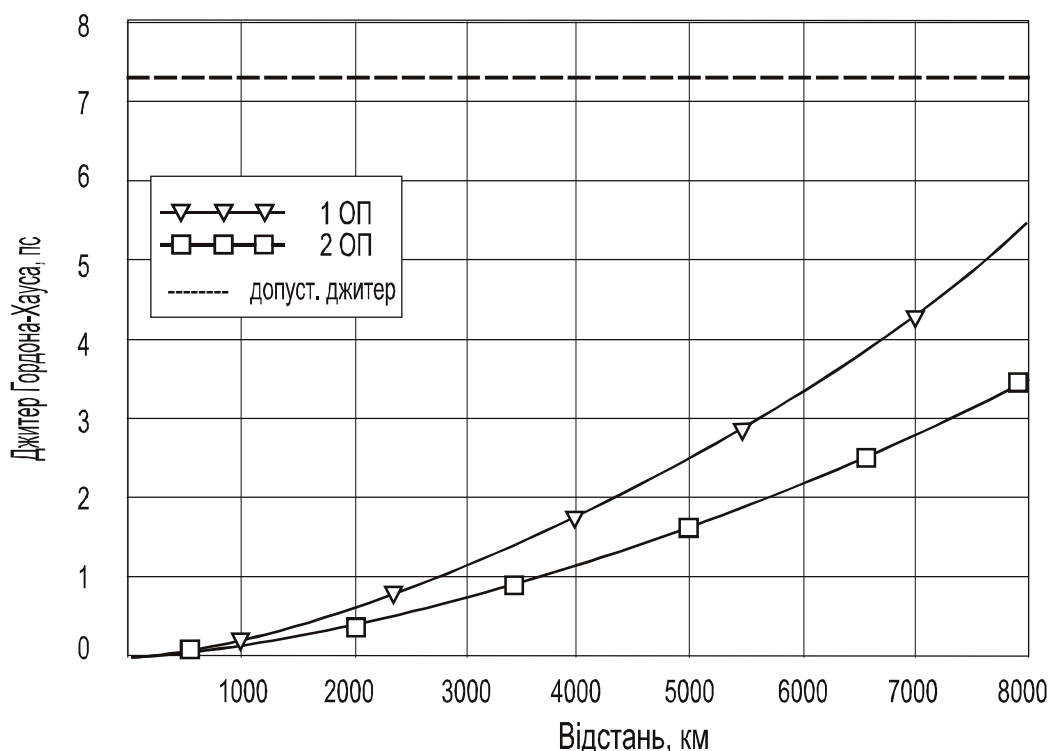


Рисунок – Залежність джитера Гордона – Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з ДУ від відстані поширення для першої дисперсійної карти

При розгляді впливу на джитер дисперсійної карти з двома підсилювачами, необхідно оптимізувати місце розташування другого підсилювача, так щоб мінімізувати зміни тривалості імпульсу. Для розглянутої карти це досягається при установці підсилювача на відстані 35 км у секції DSF волокна карти. В даному випадку, початкова потужність, $P_0 = 0,2051$ мВт, і початковий чирп, $C_0 = 0,517$. Крива з квадратами на Рис.3.4 показує, що джитер Гордона – Хауса значно

знижується, коли використовуються два підсилювачі в межах кожного періоду дисперсійного керування. Це пояснюється тим, що коефіцієнт підсилення підсилювачів у цьому випадку нижчий і в результаті маємо більш низьке значення спектральної щільності шуму. На Рис.3.4 джитер зменшується приблизно у два рази, коли використовуються два підсилювачі.

Звернемося до розгляду другої карти (рис.3.5), що складається із 66 – км секції стандартного одномодового волокна SF ($D = 16$ пс/(нм км), $\alpha = 0,2$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²) і 13 – км секції волокна, що компенсує дисперсію, DCF ($D = -80$ пс/(нм км), $\alpha = 0,4$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²); результуюча середня дисперсія приблизно $D = 0,2$ пс/(км нм). Інтенсивність карти з $T_{FWHM} = 30$ пс має наступне значення $S_{map} = 2,33$, що вказує на значні зміни в тривалості імпульсу в кожному періоді карти. Підсилювач розташований наприкінці кожної стадії дисперсійного керування довжиною $L_m = 79$ км.

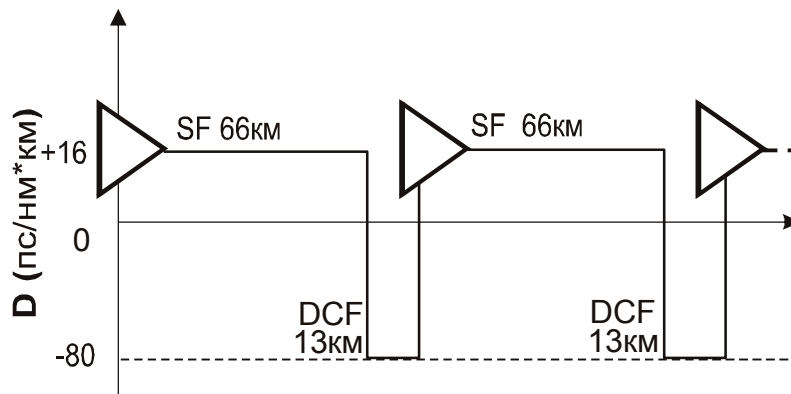


Рисунок – 3.5 Другий варіант дисперсійної карти

Лінія з трикутниками на Рис.3.6 показує залежність джитера на виході кожного підсилювача від відстані передачі для солітонів тієї самої тривалості, що і в першому випадку. Для солітонів, які поширюються в системі, вхідний чирп $C_o = 0,765$ і вхідна пікова потужність $P_o = 7,6$ мВт. Лінія з прямокутниками на рис.3.7 ілюструє вплив на джитер Гордона – Хауса встановлення другого підсилювача на відстані 24 км (місце розташування оптимізовано щоб мінімізувати зміни тривалості імпульсу). З огляду на місце розташування другого підсилювача, і використовуючи

рівняння еволюції енергії й чирпа початкова потужність $P_0 = 0,944$ мВт та вхідний чирп $C_0 = 2,05$.

Порівняння рис.3.4 й рис.3.6 дозволяє зробити висновки. Джитер Гордона – Хауса має менше значення для дисперсійної карти, що використовує стандартне волокно й один підсилювач. Це зменшення джитера пояснюється використанням більш високої пікової потужності і тим, що величина джитера Гордона – Хауса обернено пропорційно енергії.

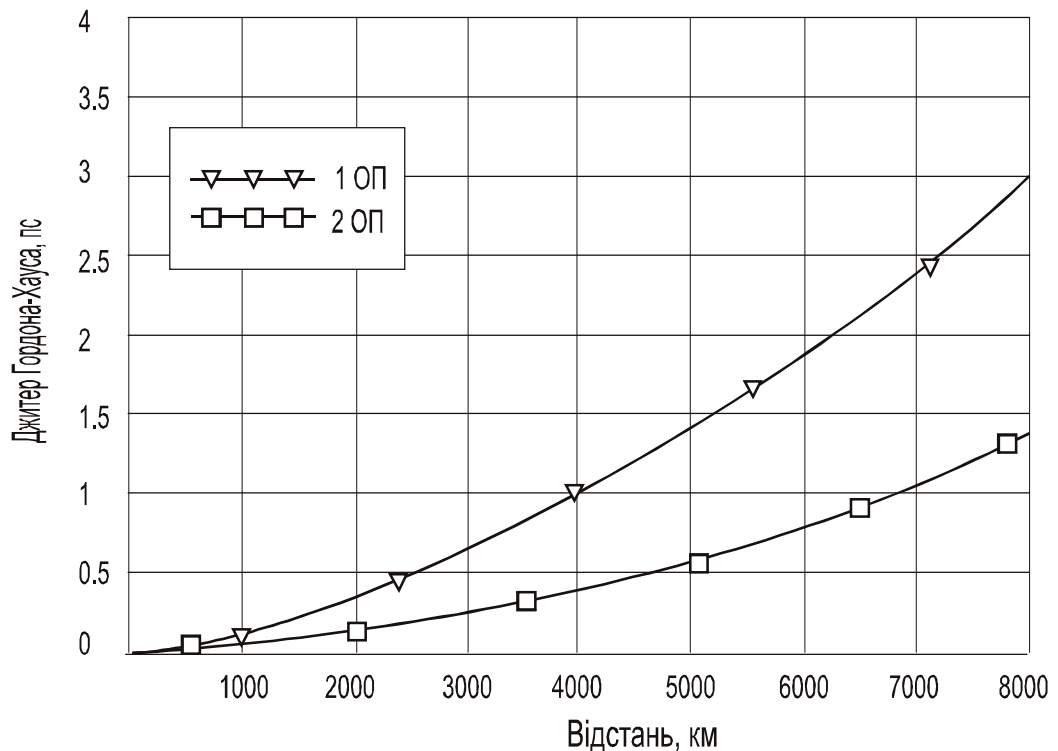


Рисунок – 3.6 Залежність джитера Гордона – Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з дисперсійним управлінням від відстані поширення для другої дисперсійної карти

При установці другого підсилювача в дисперсійну карту, вплив його на джитер залежить від відстані поширення. На початкової стадії поширення для другої карти джитер Гордона – Хауса не змінюється навіть при установці другого підсилювача. Для більш протяжних відстаней поширення другий підсилювач значно зменшує джитер, приблизно – в два рази, як показано на рис.3.6. Причиною цього є залежність накопиченого значення ДГШ до місця розташування підсилювача. Для

підсилювача, розташованого наприкінці періоду карти, $|d_k|$ має відносно невелике значення. Але його значення може значно збільшитися для другого підсилювача, розташованого в межах періоду карти. Таким чином, використання декількох підсилювачів у кожному періоді карти може бути корисним для солітонних систем, розроблених на основі стандартних волокон, але при цьому місце розташування підсилювачів повинні бути оптимізовані.

Далі, розглянемо, солітонну систему з ДУ, у якій як сигнал, використовується фундаментальний солітон, тривалістю 18,02 пс, що поширюється у волокні DDF, дисперсія якого D , зменшується від 4 до 0.161 пс/(нм км), на відстані 80 км і параметри якого мають значення: $\alpha = 0,2$ дБ/км й $A_{eff} = 55$ мкм. Значення необхідної початкової імпульсної потужності 0,1 Вт, при цьому підсилювачі розташовано через кожні 80 км. Тривалість фундаментального солітона при поширенні залишається постійною, це означає, що місце розташування другого підсилювача є довільним. Припустимо, що другий підсилювач встановлено у середині періоду карти, на відстані 40 км.

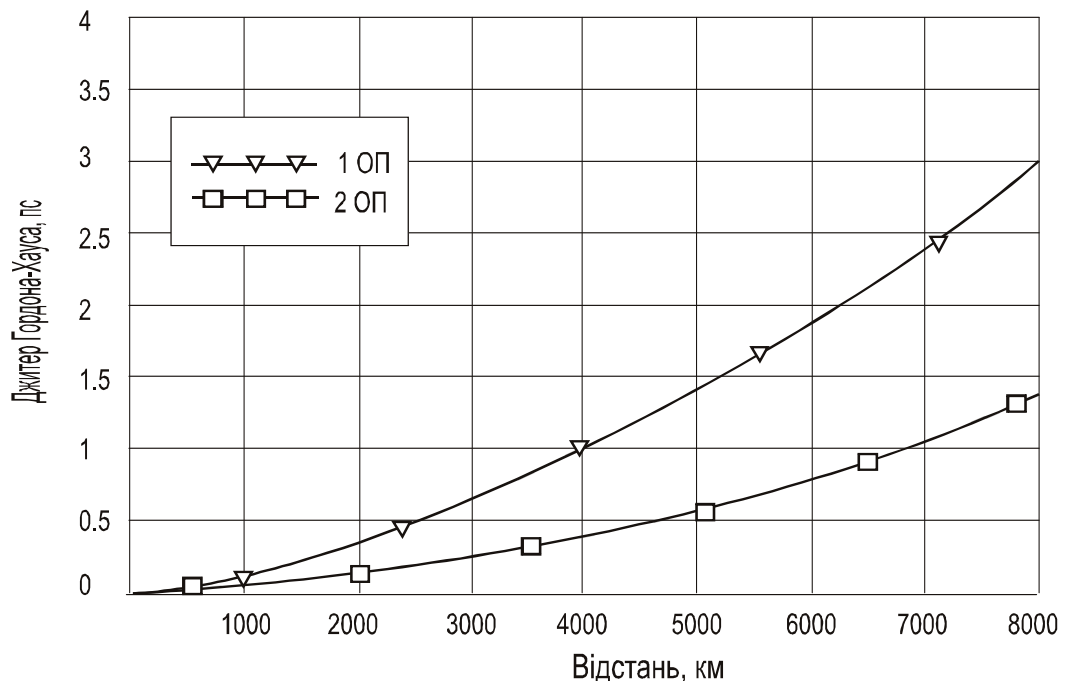


Рисунок – 3.7 Залежність джитера Гордона – Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з дисперсійним управлінням, на основі волокна DDF, від відстані поширення

Залежність джитера Гордона – Хауса від відстані поширення для випадків одного й двох підсилювачів приведено на рис.3.7 Порівняння з попередньою солітонною системою вказує на зниження джитера Гордона – Хауса, через необхідну більшу вхідну потужність. Використання двох підсилювачів також може значно зменшити джитер Гордона – Хауса.

3.9 Висновки

1. В розділі розглянуто критерії оцінки якості функціонування солітонних волоконно – оптичних систем передавання. Це дозволяє зробити висновок, що наявність великої кількості підсилювачів у ВОЛЗ знижує Q – фактор й, отже, збільшує величину BER.

2. Оцінено джитер Гордона – Хауса фундаментальних і ДУ солітонів для випадків одного й двох підсилювачів у періоді дисперсійної карти.

3. Досліджено вплив джитера Гордона – Хауса на функціональні можливості солітонних ВОСП з дисперсійним управлінням. Виявилося, що при поширенні солітонів зі швидкістю передавання 10 Гбіт/с на відстані 8000 км величина джитера не перевищує допустиме значення. За наявності двох підсилювачів у періоді дисперсійної карти джитер зменшується приблизно у два рази. Однак, з економічної точки зору, існує практична межа числа підсилювачів у ВОСП.

РОЗДІЛ 4 ЗНИЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ПРОПУСКНУ СПРОМОЖНІСТЬ СОЛІТОННИХ ВОСП

4.1 Зниження впливу явищ Гордона – Хауса на функціонування солітонних ВОСП

Даний метод ґрунтується на тому, що ASE існує у всьому діапазоні частот підсилювача, а спектр солітона – займає тільки малу його частину [16]. Пропускна смуга вузькосмугового фільтра вибирається так чином, щоб забезпечити пропуск потоку солітонних бітів і затримку основної частини ASE. При установці оптичних фільтрів після кожного підсилювача, підвищується відношення сигнал – шум системи, тому що одночасно знижується нагромадження шуму спонтанного випромінювання й послабляється вплив ефекту Гордона– Хауса. Теоретична ідея використання оптичних фільтрів була реалізована експериментально групою Моленуера, ефект тремтіння світлових сигналів було знижено на 50 %. Ступінь зниження впливу збуджень Гордона – Хауса вдалося поліпшити при використанні модифікованого методу фільтрації, у якому центральна частота послідовно встановлених оптичних фільтрів повільно "ковзає" по лінії зв'язку. Такі фільтри з "ковзанням" частоти фільтрації запобігають нагромадженню ASE в межах пропускної смуги фільтра й одночасно скорочують часову затримку солітонів. В той час як спостерігається зміна смуги пропускання фільтра, відбувається зсув спектра солітонів, що мінімізує внесені фільтром втрати, при цьому спектр ASE не змінюється. Підсумковий результат полягає в тому, що шум ASE, накопичений від декількох підсилювачів, відфільтровується при зсуві солітона на величину більшу, ніж його ширина спектра.

Метод фільтрації дозволяє підвищити функціональні можливості солітонних систем. Однак, технологія використання оптичних фільтрів має недолік, який полягає в тому, що для компенсації втрат енергії солітона, викликаних оптичними фільтрами, необхідно збільшувати коефіцієнт підсилення підсилювача, але чим більший коефіцієнт підсилення, тим більший шум.

В зв'язку з цим, стає доцільною розробка більш простого й ефективного способу зниження джитера Гордона – Хауса.

Розглянемо можливість застосування методу компенсації дисперсії для зниження впливу джитера Гордона – Хауса в солітонних телекомунікаційних системах. З метою компенсації дисперсії, в запропонованому методі додаткове волокно вводиться на прийомному кінці системи, тобто використовується посткомпенсація. При цьому зменшується значення накопиченої дисперсії і внаслідок цього знижується ефект Гордона – Хауса.

Для дослідження впливу посткомпенсації на джитер Гордона – Хауса, розглянемо солітонну систему зі швидкістю передачі 10– Гбіт/с і дисперсійною картою. Результати отримані за допомогою пакета MATLAB R2010a.

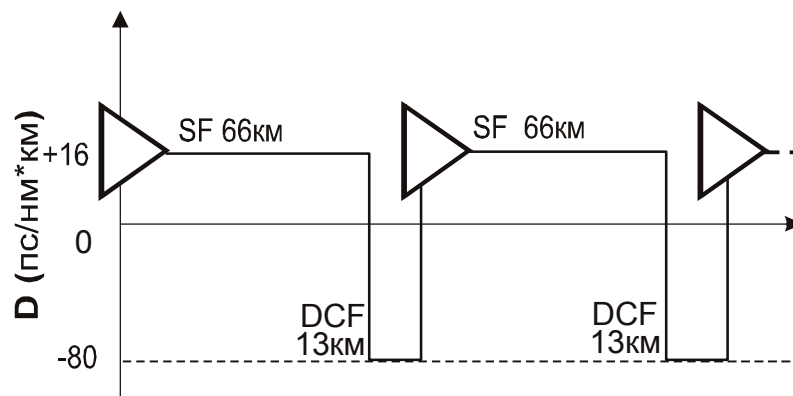


Рисунок – 4.1 Дисперсійна карта

Дисперсійна карта (рис.4.1) складається із 66 – км секції стандартного одномодового волокна SF ($D = 16$ пс/(нм км), $\alpha = 0,2$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²) і 13– км секції волокна, що компенсує дисперсію, DCF ($D = -80$ пс/(нм км), $\alpha = 0,4$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²); результуюча середня дисперсія приблизно $D = 0,2$ пс/(км нм). Інтенсивність карти з $T_{FWHM} = 30$ пс має значення $S_{map} = 2,33$, що вказує на значні зміни в тривалості імпульсу в кожному періоді карти. Підсилювач розташовано наприкінці кожної стадії дисперсійного керування довжиною $L_m = 79$ км.

Зміни джитера для декількох значень μ для випадку одного підсилювача в періоді карти приведено на Рис. 4.2.

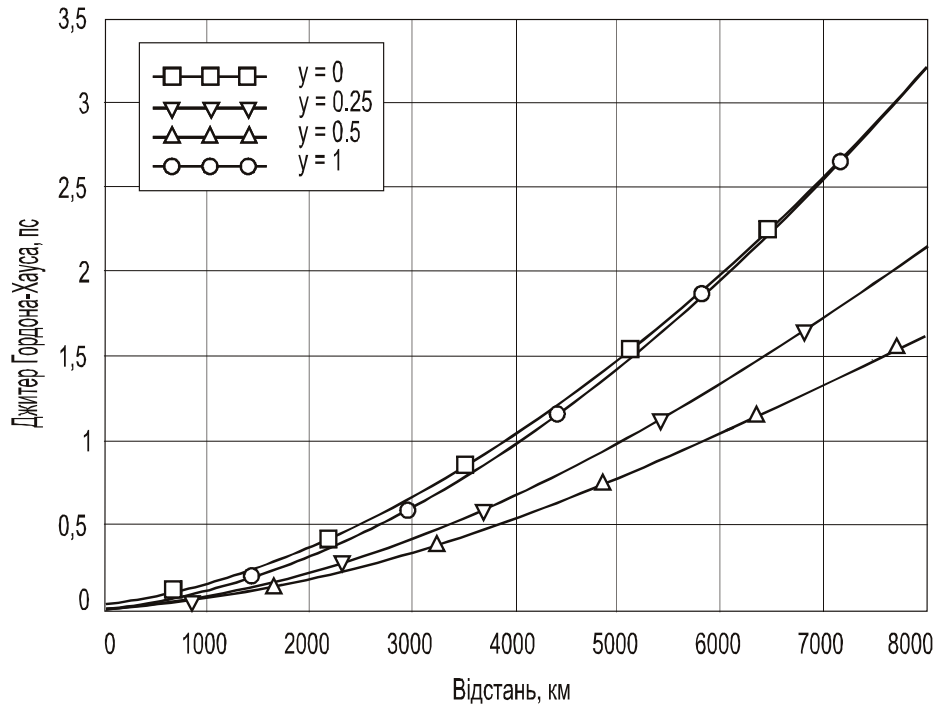


Рис. 4.2 Вплив компенсації дисперсії на джитер Гордона– Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з дисперсійним управлінням на основі DDF волокна

За відсутності посткомпенсації ($y=0$), джитер стає досить великим і збільшується з відстанню поширення. При використанні навіть невеликого значення посткомпенсації ($y=0,25$) джитер значно скорочується. Представлені на рисунку результати дозволяють зробити кілька важливих висновків:

1 джитер може бути зменшений, але не може бути усунутий повністю за допомогою пост компенсації;

2 джитер може бути мінімізований за оптимальної довжині постволокна, що компенсує ($y=0,5$);

3 повна посткомпенсація ($y=1$) робить ситуацію порівнянної з випадком без компенсації.

Тепер необхідно визначити, чи дозволяє посткомпенсація дисперсії зменшити джитер Гордона– Хауса при використанні декількох підсилювачів у періоді дисперсійної карти. На Рисунок – 4. приведено розрахунки джитера за умов, ідентичних Рис. 4. , за винятком того, що є другий підсилювач, розташований на

відстані 40 км. Посткомпенсація зменшує джитер для всіх значень $0 < y < 1$. Джитер знову мінімальний, коли $y = 0,5$. Дані результати дозволяють зробити висновок, що посткомпенсація зменшує випадкові часові затримки фундаментальних солітонів, навіть при використанні декількох підсилювачів у періоді карти.

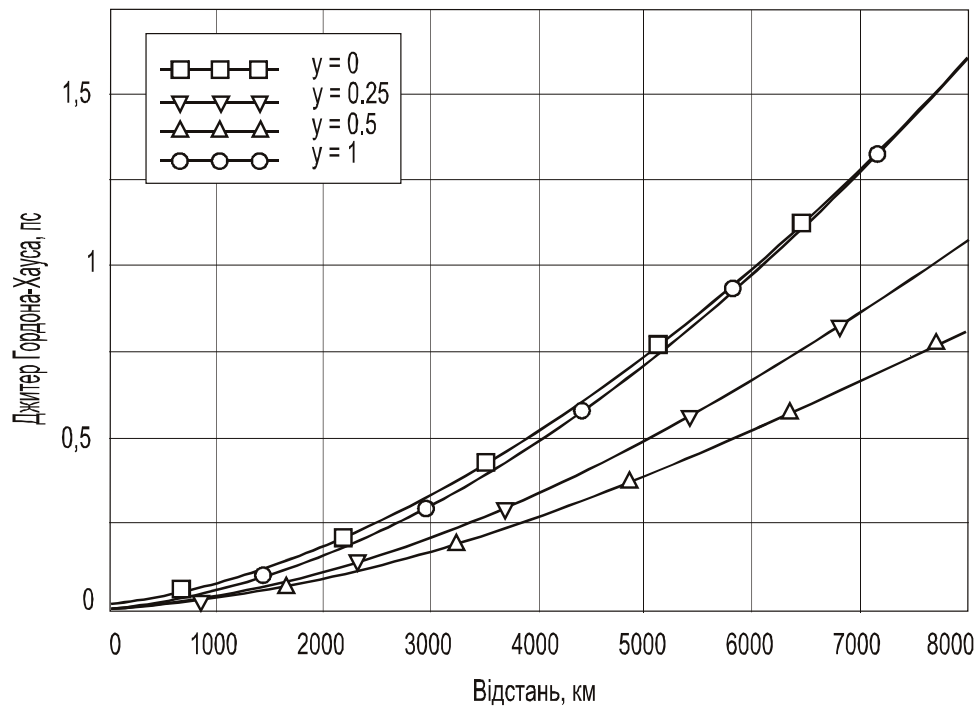


Рисунок – 4.3 Вплив компенсації дисперсії на джитер Гордона – Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з дисперсійним управлінням на основі DDF волокна у випадку застосування двох підсилювачів у дисперсійній карті

Наступним кроком буде розглянуто, застосування посткомпенсації для солітонної системи з дисперсійним управлінням, що використовує як сигнали – ДУ солітони, зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с. Карта, (рис.4.4), складається з 76 – км секції з аномальною ДГШ, виконаної волокном зі зміщеною дисперсією DSF ($D = 4$ пс/(нм км), $\alpha = 0,2$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²), і 3,6– км секції волокна, що компенсує дисперсію DCF ($D = -80$ пс/(нм км), $\alpha = 0,4$ дБ/км, $A_{eff} = 55$ мкм²), при цьому результуюча середня дисперсія є аномальною і складає $D = 0,2$ пс/(нм км). Інтенсивність має відносно низьке значення $S_{map} = 0,62$.

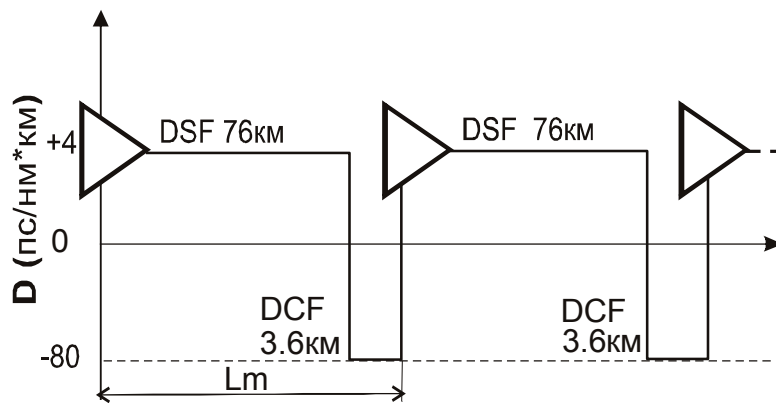


Рисунок – 4.4 Дисперсійна карта

Підсилювач розташовано наприкінці кожного періоду дисперсійного керування, довжиною $L_m = 79,6$ км. Спектральна щільність шуму розраховувалася від коефіцієнта спонтанної емісії $n_{sp} = 1,3$ (шум- фактор приблизно дорівнює 4.1 дБ для зосередженого підсилювача) і $h\nu = 0,8\text{eV}$. Значення вхідного чирпа й пікової потужності солітонів, що поширюються в лінії, наступні $C_0 = 0,25$ й $P_0 = 3,04$ мВт.

На рис.4.5 й рис.4.6 представлено результати розрахунку джитера Гордона – Хауса для чотирьох значень y для випадку одного й двох підсилювачів у періоді дисперсійної карти. Другий підсилювач розташовано на відстані 35 км. При відсутності посткомпенсації ($y=0$) джитер збільшується з відстанню поширення. Застосування посткомпенсації дозволяє знизити величину джитера Гордона – Хауса. Мінімально можливе значення джитера досягається за оптимальної довжини посткомпенсуючого волокна, при $y=0,5$.

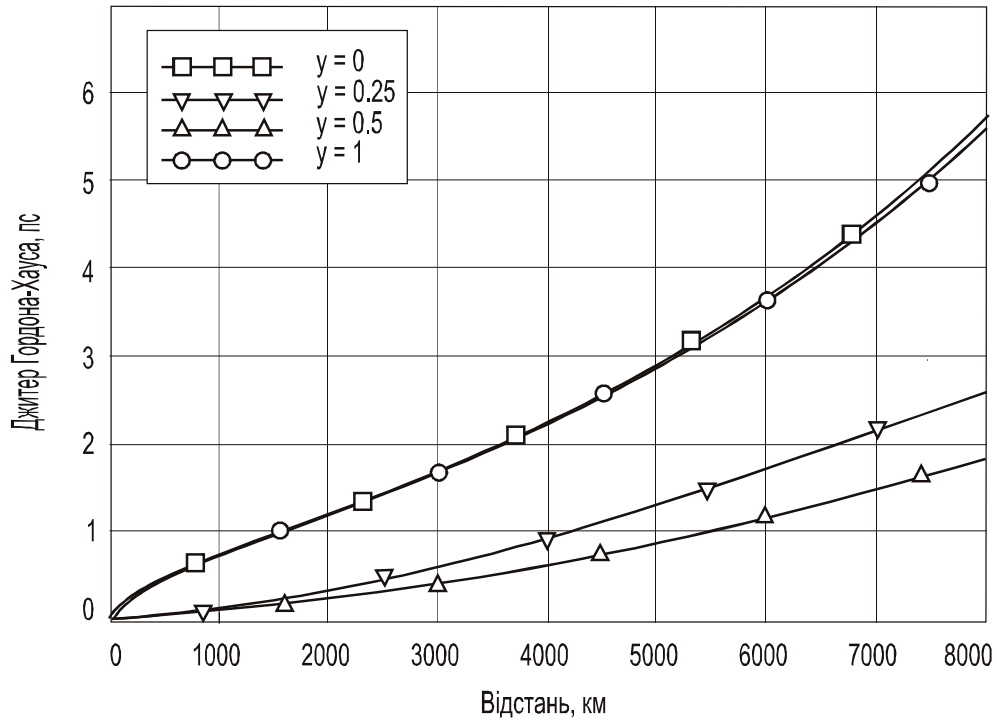


Рисунок – 4.5. Вплив компенсації дисперсії на джитер Гордона– Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з дисперсійним управлінням

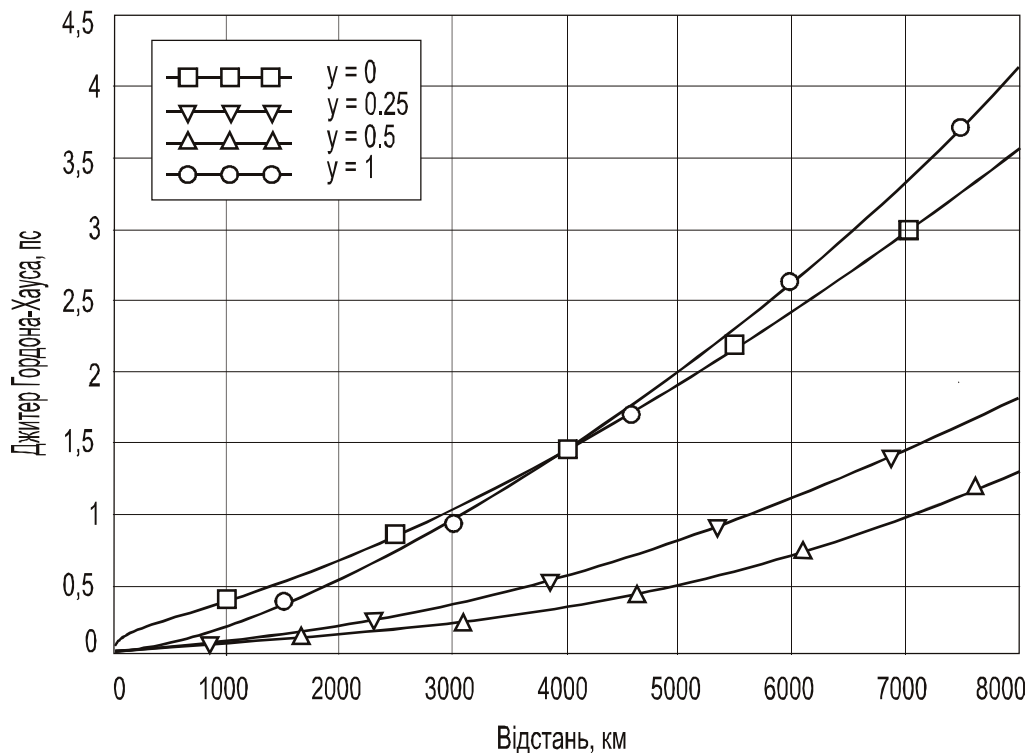


Рисунок – 4.6 Вплив компенсації дисперсії на джитер Гордона – Хауса 10 Гбіт/с солітонної системи з дисперсійним управлінням у випадку двох підсилювачів у дисперсійній карті

Графіки на рис.4.6 показують більш складну залежність джитера Гордона – Хауса від ступеня компенсації дисперсії. Дані результати засвідчують, що незважаючи на те, що посткомпенсація дисперсії дозволяє знизити вплив джитера Гордона – Хауса, вплив посткомпенсації вимагає більш детального аналізу при використанні більш ніж одного підсилювача в дисперсійній карті.

4.2 Загальні рекомендації із застосування результатів досліджень солітонних ВОСП з дисперсійним управлінням

За результатами проведених досліджень можна надати рекомендації:

1. Найбільш перспективними для використання є дві схеми організації лінійних трактів солітонних ВОСП. В першій як направляюче середовище використовується волокно DDF, у другому варіанті – дисперсійна карта виконується з волокон DSF й DCF. Застосування даних дисперсійних карт дозволяє не скорочувати довжину підсилювальної ділянки при збільшенні швидкості передавання, що є економічно ефективним. В солітонних ВОСП зі швидкістю передавання вище 40 Гбіт/с треба при проектуванні лінійних трактів використовувати дисперсійні карти із щільним дисперсійним управлінням.

2. Оцінку Q -фактора солітонної ВОСП необхідно проводити з урахуванням коливань енергії імпульсу, внесених шумом ASE.

3. Для визначення оптимального варіанта побудови лінійного тракту солітонної ВОСП при заданому швидкісному режимі передавання рекомендується виконувати кількісну оцінку середнього часу зсуву (джитера) солітонного імпульсу в оптичному приймачі. Довжина регенераційної ділянки обмежується допустимим значенням джитера.

4. Для зменшення впливу явищ Гордона–Хауса доцільно рекомендувати для систем з дисперсійними картами з волокон DSF й DCF, за наявності другого підсилювача в межах карти, проводити додаткові дослідження залежності джитера Гордона–Хауса від ступеня посткомпенсації.

5. Для солітонних ВОСП зі швидкістю передавання, що не перевищує 40 Гбіт/с, аналіз проводиться без врахування ефектів, і береться до уваги тільки джитер Гордона–Хауса.

4.3 Параметри роботи волоконно – решіткового компресора

Звичайні кварцові світловоди мають додатну дисперсію тільки на довжинах хвиль $\lambda \leq 1,3$ мкм, тому волоконно – решіткові компресори використовуються в межах дії додатної дисперсії [25]. На рис.4.7 показано схему волоконно – решіткового компресора в двохпрохідній конфігурації.

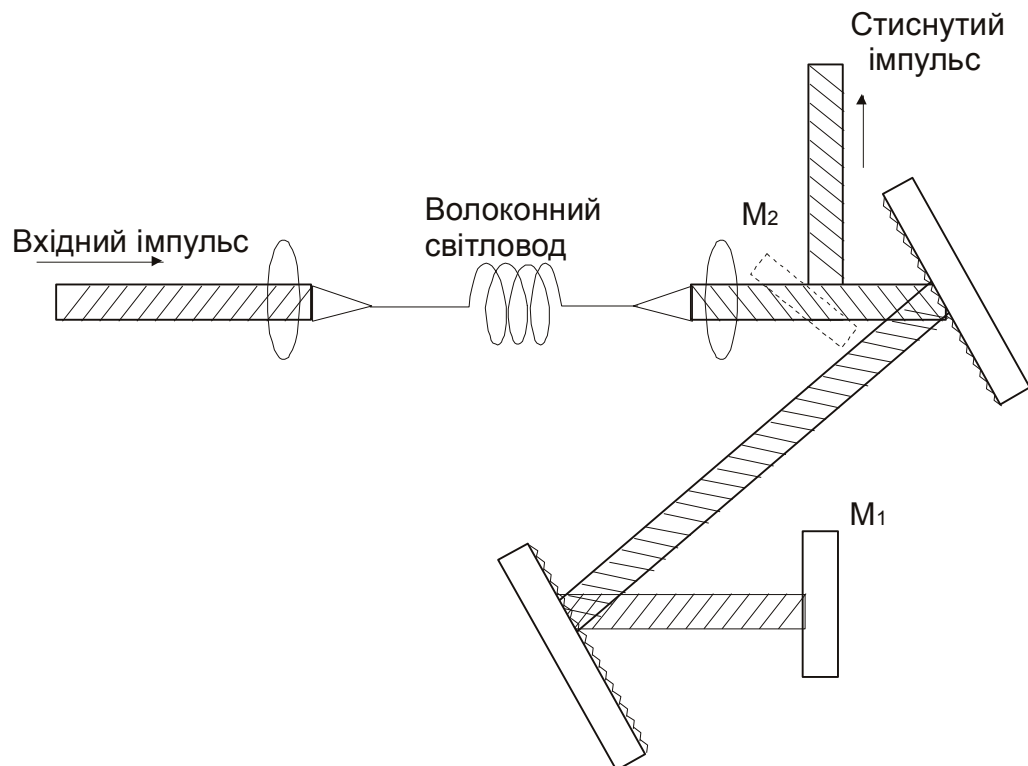


Рисунок – 4.7 Схема волоконно – решіткового компресора двохпрохідної конфігурації

Вхідний імпульс вводиться в одномодовий зі збереженням поляризації волоконний світловід, через мікрооб'єктив і далі імпульс спектрально розширюється і набуває додатної частотної модуляції по всій своїй довжині. Вихідний імпульс

попадає на пару решіток, де він стискається завдяки її від'ємній дисперсії. Проходячи пару решіток у протилежному напрямку, імпульс відновлює свою первісну форму. Дзеркало M_1 злегка нахилене для того, щоб відділити відбитий промінь від падаючого. Дзеркало M_2 виводить стиснутий імпульс з компресора без внесення будь – яких додаткових втрат.

Хоча ідея даної схеми досить проста, для досягнення найефективнішої роботи волоконно – решіткового компресора необхідно визначити – чи існує довжина світловоду, що відповідає даним значенням параметрів імпульсу, чи є найбільш підходяща відстань між решітками для одержання високоякісних імпульсів з максимальним ступенем стиснення [26].

Найбільш підходящим компресором є той, у якого відстань між решітками відповідає величині, так що пікова потужність стисненого імпульсу є найбільшою. На практиці волоконно – решітковий компресор оптимізується саме у такий спосіб. Надалі ми нехтували втратами у світловоді, оскільки необхідні довжини світловодів зазвичай менші в порівнянні з довжиною поглинання $\alpha L \ll 1$.

Спочатку розглянемо випадок чистої ФСМ без дисперсійних ефектів. При відсутності дисперсії форма імпульсу залишається незмінною, у той час як його спектр робиться ширшим при розповсюдженні. З погляду компресії імпульсів більш важливою є частотна модуляція внаслідок ФСМ. Було визначено, що для гауссівського імпульсу у випадку дії ФСМ без дисперсії частотна модуляція лінійна тільки в центральній частині імпульсу. Коли такий імпульс проходить через пару решіток, внаслідок від'ємної дисперсії відбувається стиснення тільки його центральної частини. Оскільки значна частка енергії залишається в «крилах», стиснений імпульс – не найвищої якості.

Виявляється, що дисперсія світловоду може істотно поліпшити якість імпульсу. Дисперсія робить ширшим імпульс так, що він стає майже прямокутним. У той самий час, в імпульсі утворюється практично лінійна частотна модуляція уздовж усієї довжини. В результаті пара решіток може стиснути всю енергію імпульсу у вузький пік [27].

На рис.4.8 показано форму імпульсу на виході світловоду, його частотну модуляцію і стиснений імпульс (нижній рядок графіків)

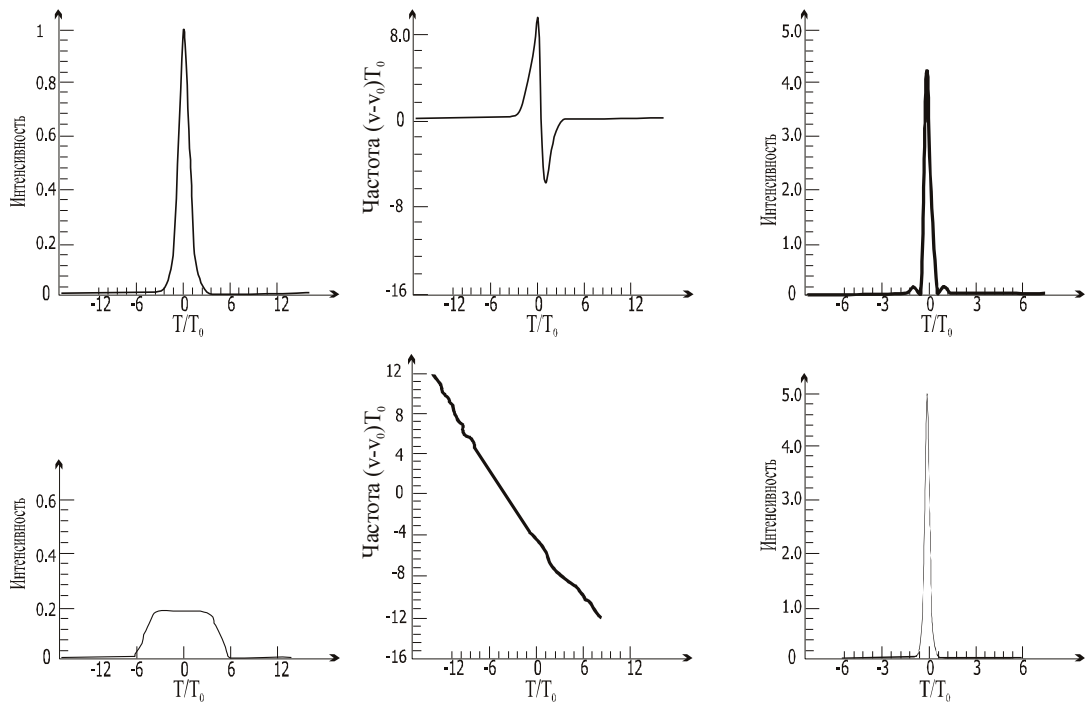


Рис. 4.8 Форма імпульсу на виході світловоду, його частотна модуляція і стиснутий імпульс за наявності (нижній рядок) та за відсутності (верхній рядок)

ДГШ

Для порівняння у верхньому рядку приведено відповідні рисунки за відсутності дисперсії для довжини світловоду, обраної так, що імпульс стискується в однакове число разів в обох випадках ($N^2 z/z_0 = 4,5$). При порівнянні двох рядків на рис.4.8, видно позитивний вплив дисперсії на якість стиснутого імпульсу, що визначається лінійністю його частотної модуляції. Дана перевага, проте, досягається тільки внаслідок зменшення ступеня стиснення за даного значення початкової пікової потужності.

4.4 Параметри роботи компресора на основі багатосолітонного стиснення

Коли імпульси з довжиною хвилі більшою, від 1,3 мкм розповсюджуються у світловодах, виготовлених із кварцового скла, на їхню динаміку звичайно впливають ФСМ і від'ємна дисперсія. Такий світловід може сам діяти як компресор; при цьому зникає необхідність у парі решіток. Механізм компресії пов'язаний з фундаментальною властивістю солітонів вищих порядків, а саме, ці солітони мають періодичну картину еволюції, при цьому на початку кожного періоду відбувається стиснення. Відповідним вибором довжини світловоду можна стиснути початкові імпульси; коефіцієнт стиснення при цьому залежить від порядку солітону N . Такий компресор називається компресором, що базується на ефекті багатосолітонного стиснення або просто солітонним компресором.

Якщо для простоти знехтувати втратами у світловоді, то динаміка солітону N порядку описується рівнянням [12]:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} = \text{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - N^2 |U|^2 U. \quad (4.1)$$

де $\xi = Z/L_D$, $\tau = T/T_0$ – нормовані значення довжини та часу.

Нехтування втратами виправдане тим, що робочі довжини світловодів звичайно становлять малу частку довжини поглинання

В загальному випадку вхідний імпульс зазнає стиснення на початковому етапі розповсюдження при всіх значеннях $N > 1$. Оптимальна довжина світловоду z_{opt} відповідає точці, у якій тривалість центрального піка мінімальна.

Щоб знайти коефіцієнт стиснення F_c і оптимальну довжину світловоду z_{opt} як функції N , застосовувалися чисельні методи. На рис.4.9 показано розрахункові (суцільні лінії) залежності F_c^{-1} і z_{opt}/z_0 від N ($N = 1, \dots, 15$). Зображено параметр якості Q_c , визначений як частка енергії початкового імпульсу. Світлі кружечки на графіках означають розрахунки для цілих значень N ; хрестики та темні кружечки – дані експериментів, виконаних для 320 і 100 – метрових світловодів.

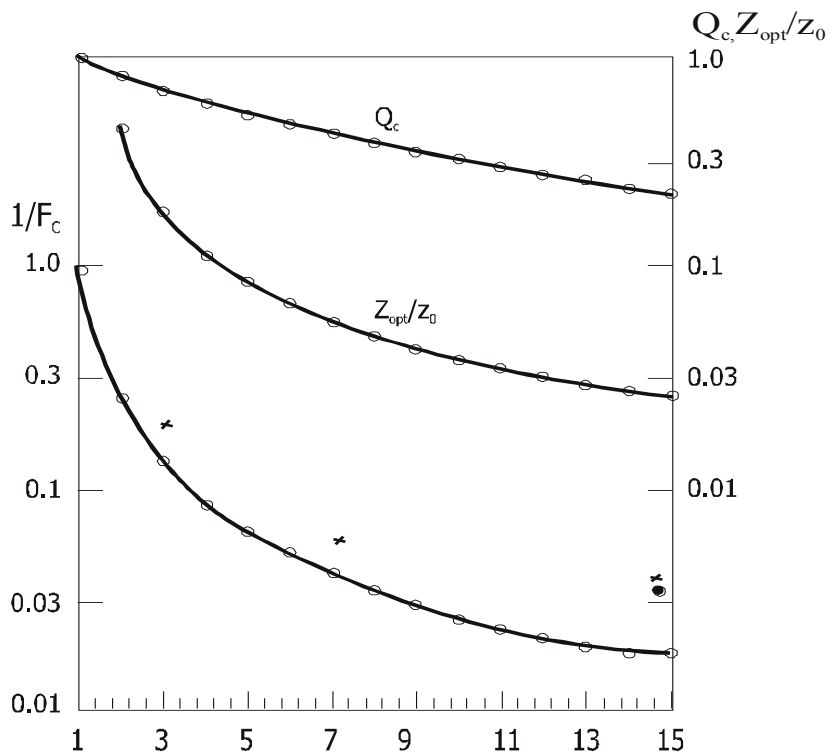


Рис.4.9 Залежність коефіцієнта стиснення $1/F_c$, оптимальної довжини світловоду z_{opt} та параметра якості Q_c від порядку солітона N

На противагу, волоконно – решітковому компресору, Q_c , тут значно менше, ніж ідеальне значення 1, і монотонно зменшується зі збільшенням N . Даний недолік властивий солітонним компресорам. Частина енергії, що залишилася, виявляється в «крилах» імпульсу у формі широкого п'єдесталу навколо стиснутого піка. Появу такого п'єдесталу можна пояснити в такий спосіб. У початковій стадії багатосолітонного стиснення домінує ФСМ. Оскільки частотна модуляція, спричинена ФСМ, лінійна тільки в центральній частині імпульсу, лише центральна область його стиснення виникає внаслідок від'ємної дисперсії. Енергія в «крилах» імпульсу залишається нестиснутою і набуває вигляду широкого п'єдесталу.

Коефіцієнт стиснення F_c і оптимальна довжина світловоду для солітонного компресора добре апроксимуються емпіричним співвідношеннями:

$$F_c \cong 4,1N \quad (4.2)$$

$$\frac{z_{opt}}{z} \cong \frac{0,32}{N} + \frac{1,1}{N^2}. \quad (4.3)$$

Дані залежності справедливі з точністю до декількох відсотків при $N > 10$ і можуть слугувати простими алгоритмами для покращення параметрів солітонного компресора. Безпосереднє порівняння з волоконно – решітковими компресорами показує, що при тих самих значеннях N і z_0 солітонний компресор дає коефіцієнт стиснення в 6,5 разів більшим; при цьому довжина світловоду коротша в 5 разів. Однак, якість стиснутого імпульсу нижча, тому що в ньому міститься лише частка початкової енергії. Енергія, що залишилася, утримується в широкому п'єдесталі імпульсу.

4.5 Висновки

1. В розділі розглянуто методи зниження впливу джитера Гордона – Хауса на функціональні можливості солітонних ВОСП із дисперсійним управлінням, з метою збільшення довжини регенераційної ділянки.

2. Встановлено закономірності, які дозволяють покращити параметри оптичних компресорів. Для волоконно – решіткового компресора встановлено існування довжини світловоду, що відповідає параметрам імпульсу, а також відстані між решітками, для отримання високоякісних імпульсів з максимальним коефіцієнтом стиснення. В солітонному компресорі встановлено залежність коефіцієнта стиснення і довжини світловоду від порядку солітону.

3. Для практичного створення компресорів наведено прості емпіричні співвідношення, котрими визначаються довжина світловоду й оптимальна відстань між решітками. При виконанні цих вимог досягається максимальний ступінь стиснення при заданих значеннях параметрів світловоду і параметрів імпульсу.

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

В межах даного розділу проаналізовано наступні аспекти стартап-проекту:

- зміст ідеї (що пропонується);
- можливий напрямок застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару;
- відмінність від існуючих аналогів та заміників.

5.1 Опис ідеї проекту

У табл. 5.1 наведено зміст ідеї стартап-проекту, , в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів [54] напрямки, де може бути реалізовано проект та вигоди для користувача.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямо кзастосування	Вигоди для користувача
Розгортання солітонів для широкосмугового зв'язку з інформаційною ємністю та повторювачем меншої передачі	Телекомунікаційні системи та системи оптичного зв'язку	Довгострокове спілкування
		Важливе застосування солітонів – це передача інформації через оптичні волокна.
		Можливість передавати час через волоконну лінію випадковим чином з верхньою межею продукту довжини бітової швидкості
		Надання користувачам засобу передачі величезної інформації в оптичних мережах.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (відмінність від існуючих аналогів та заміників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик;

- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають: а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів			W	N	S
		Мій проект	Товар-аналог 1	Товар-аналог 2			
1.	Економічні	8000 у.о.	10000 у.о.	7500 у.о.		+	
2.	Призначення	Використання в довгострокове спілкування	Використання в громадських місцях	Використання в багатьох телекомунікаційних компаніях			+
3.	Надійності	Довговічність використання	Довговічність використання	Довговічність використання			+
4.	Технологічні	Високошвидкісна інформація на великі відстані в оптичних мережах для користувачів	Висока інформаційна ємність і ретранслятор менше передачі	Фундаментальний солітон зберігає свою форму та ширину, навіть у волокні з втратами, для використання дисперсійуправління			+
5.	Ергономічні	Система зручна в користуванні та налаштуванні	Система зручна в користуванні та налаштуванні	Система зручна в користуванні та налаштуванні		+	
6.	Екологічні	Не перевищує періодичних методів підсилення	Не перевищує періодичних методів підсилення	Не перевищує періодичних методів підсилення		+	
7.	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Визначено перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару, можна зробити висновок, що отримані порівняння можуть бути підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- технологія, за якою буде виготовлено товар згідно ідеї проекту;
- аналіз наявності такої технологій;
- доступність технологій автору проекту.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технологій
1.	Математичне моделі солітонних ліній зв'язку	Програмне середовище пакета MATLAB R2010a	Наявна	Доступно, є досвід застосування
2.	Створення рівняння параметрів імпульсу	джитера Гордона – Хауса.	Наявна	Доступно, немає досвіду застосування
3.	Розробка дисперсійної карти з різних волокон	часового джитера (timing jitter) Гордона – Хауса.	Наявна	Доступно, є досвід застосування
Обратна технологія для аналізу та дослідження ідеї проекту: Програмне середовище MATLAB та ефекту Гордона – Хауса				

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведено аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	1
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	30000
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі або ринку, %	200

За результатами попереднього оцінювання ринок є привабливим для входження.

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи наведено в табл. 5.5.

Проведено аналіз ринкового середовища: складені таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.6-5.7). Фактори в таблицях подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Високошвидкісна інформація на великі відстані в оптичних мережах для користувачів	Системи мобільного зв'язку, радіозв'язку, телебачення	Поведінку клієнта Формують потреби; особливостей купівлі та експлуатації товару немає	Програма повинна забезпечувати високошвидкісну передачу інформації великій кількості користувачів.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можливі реакції компанії
1.	Нестача кваліфікованих кадрів	Для поширення ефекту потрібні досвідчені руки з практичними знаннями	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2.	Нестача ресурсів	Щоб створити продукт, вам потрібна технічна підтримка та певні умови для тестування ефекту.	Укладання договорів з державними структурами для фінансування та надання можливостей для тестування продукту
3.	Фінансова нестабільність	Потреба в коштах для забезпечення необхідного обладнання.	Пошук інвесторів

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція Компанії
1.	Попит	Існування постійного попиту на збільшення ставок передачі величезної інформації означає, що більшість клієнтів зацікавлені у впровадженні інновацій. Зростання засобів спілкування	Рекламна діяльність, просування товару у Інтернеті, участь у формах та конференціях.
2.	Науково-технічний прогрес	Стрімкий ріст технологій та збільшення наукової бази дозволяють ефективно вирішити поставлені задачі	Ознайомлення з останніми патентами у відповідній галузі; відвідування наукових конференцій

Надалі проведено аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Після аналізу конкуренції проведений більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за М. Портером) (табл. 5.9).

Сильні позиції компанії за кожним з факторів М. Портера означають її можливості забезпечити необхідні темпи обороту капіталу та її здатність впливати на інших агентів ринку, диктуючи їм власні умови співпраці. Характеристики факторів моделі відрізняються для різних галузей та змінюються із часом.

На основі аналізу конкуренції, наведеного в табл. 5.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 5.6-5.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз наведено в табл. 5.10.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства(можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: монополія	На ринку існують аналогічні організації, в межах України та на міжнародному ринку, які бажають розширюватися.	Підвищувати якість товару (досягати кращих показників) за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби: державний	Конкурентні компанії розташовані за кордоном, але не надають повного спектру послуг.	Створити веб-сайт компанії, що відповідає міжнародним стандартам
3. За галузевою ознакою: внутрішнього галузева	Економічна боротьба між товаровиробниками, які діють однієї галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості та ціні	Слідкувати за розвитком продукту конкурента
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати рівень якості товару
5. За характером конкурентних переваг: цінова	Передбачає продаж продукції за нижчими цінами ніж конкурент	Продавати товар за помірною ціною
6. За інтенсивністю: марочна	В сучасній економіці боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває бренд	Реклама товару, створення символіки продукту

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Складові аналізу	Висновки
Прямі конкуренти в галузі	"Tessolve semiconductor"	Інтенсивність конкурентної боротьби висока
Потенційні конкуренти	Nortel, IBM	вже має дослідження на продукті
Постачальники	Немає	Постачальники не диктують умови роботи на ринку
Клієнти	Вимоги до якості (висока бітова швидкість в насиченому режимі)	Товар має задовольняти вимоги клієнтів
Товари-замінники	Надання високошвидкісної середовища передачі інформації на дуже великі відстані	Обмежень для роботи на ринку через товари-замінники немає

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор Конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, щороблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ступінь задоволення потреб користувача	Продукт має забезпечувати передавання даних зі швидкістю близькою або більшою за 10 Гбіт/с
2.	Сумісність з існуючими системами	Продукт не має створювати завад для інших систем радіозв'язку
3.	Якість розробки з точки зору показників надійності	Продукт має забезпечувати достовірність переданих даних
4.	Наявність кваліфікованих кадрів в команді	Науковці з досвідом та високим рівнем підготовки, які зацікавлені в дослідженні та розвитку методу модуляції на основі комплексних спіралей
5.	Економічний	Ціна товару має бути помірною

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з "Wi-FiKyiv"						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь задоволення потреб користувача	17			+				
2.	Сумісність з існуючими системами	18		+					
3.	Якість розробки з точки зору Показників надійності	17				+			
4.	Наявність кваліфікованих кадрів в команді	15					+		
5.	Економічний	19	+						

На фінальному етапі ринкового аналізу можливостей впровадження проекту виконано SWOT-аналіз (матриця аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, сильних і слабких сторін (табл. 5.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складено на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	<ol style="list-style-type: none"> 1. Економічна (ціна товару є помірною). 2. Відсутність конкуренції на національному ринку. 3. Ступінь задоволення потреб користувача. 4. Якість розробки з точки зору показників надійності.
Слабкі сторони	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нестача наукових та технічних ресурсів. 2. Популярність бренду. 3. Нестійка позиція на ринку. 4. Вузькопрофільна діяльність.
Можливості	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зниження витрат на виробництво продукції. 2. Покращення якості продукту. 3. Формування попиту на товар за рахунок реклами. 4. Освоєння національного ринку. 5. Залучення нових клієнтів. 6. Розширення складу команди. 7. Нові технології
Загрози	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неприятлива економічна ситуація в країні. 2. Додатковий державний контроль якості продукту. 3. Товари-аналоги.

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки Реалізації
1.	Пошук наукових та технічних ресурсів, Пошук інвесторів, поглиблене дослідження, тестування, створення реклами.	75%	2 роки

2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук коштів, пошук наукових ресурсів, пошук обладнання, створення програмного забезпечення, тестування.	60%	3 роки
----	--	-----	--------

Із зазначених альтернатив обрано альтернативу № 1, так як для неї отримання ресурсів є більш ймовірним, а строки реалізації – більш стислими.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів, що наведено в табл. 5.14.

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п / п	Опис профілю цільової групи і потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні установи	Готові	Середній	Низька	Середня
2.	Приватні підприємства	Готові	Високий	Низька	Середня
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №2.					

Для роботи в обраних сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку (табл. 5.15). Вибір стратегії конкурентної поведінки наведено в табл. 5.16.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
-------	---------------------------	--	---------------------------

1.	Задоволенні потреб обраного цільового сегменту	Формування попиту у користувачів за рахунок унікальних характеристик та високої якості товару	Стратегія спеціалізації
----	--	---	-------------------------

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект "першопрохідцем" на національному ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія Конкурентної поведінки
1.	Так	Так	Ні	Стратегія лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (табл. 5.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16) розроблено стратегію позиціонування, наведену в табл. 5.17. Стратегія позиціонування полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Товар має забезпечувати швидкість передавання даних 10 Гбіт/с та більше	Спеціалізації	Високий ступінь задоволення потреб користувача, гнучкість, помірність	Оптимальне співвідношення ціна/якість, наукоємність, співпраця.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.18 наведені результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі аботакі, що потрібні створити)
1.	Висока швидкість передавання даних	Швидкісна передача інформації на великі відстані	Значно вища швидкість передавання даних
2.	Якість	Стабільність роботи системи	Використання високоякісного обладнання

Розроблено трирівневу маркетингову модель товару: уточнена ідея продукту (та/або послуги), його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Розгортання солітонів для високошвидкісної передачі інформації на великі відстані		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/ Е/Ор
	1. Забезпечення високих швидкостей передавання інформація. 2. Помірна ціна.	М	

	3. Забезпечення автентичності переданої інформації	М	
	4. Забезпечення високошвидкісної передачі інформації (10 Мбіт / с та більше) у випадку великої кількості користувачів	М	
		М	
Якість: стабільна робота			
Марка: "IWIMI Soliton solutions"			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія.		
	Після продажу: встановлення, налаштування, обслуговування, підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності.			

Наступним кроком визначено цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.20). Аналіз проведено експертним методом.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівеньцін на товари-замінники	Рівеньцін на товари-аналоги	Рівень доходів цільовоїгруписпоживачів	Верхня та нижня межівстановленняцінина товар/послугу
1.	6000 у.о.	9000 у.о.	50000 у.о. і вище	8000 – 15000 у.о.

Наступним кроком визначено оптимальну системи збуту, в межах якої приймається рішення (табл. 5.21):

- збут власними силами або із залученням сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Заказ послуги на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення налаштування, інформування, поділ, зберігання	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо пропонує продукцію покупцям

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Маркетингова комунікація охоплює будь-яку діяльність підприємства, спрямовану на інформування, переконання, нагадування споживачам та ринку в цілому про свої товари і свою діяльність.

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення

<p>Використання послуги для передавання даних на високій швидкості.</p> <p>Використання у комерційних цілях</p>	<p>Прямі - канали комунікації, в яких інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи</p>	<p>Висока швидкість передачі інформації</p>	<p>Поширення інформації про новий метод модуляції.</p> <p>Поширення знань про підприємство</p>	<p>Особлива увага приділяється високій швидкості передавання даних.</p> <p>Відмінність між послугою і послугами-замінниками.</p>
---	--	---	--	--

Висновки до розділу

1. За результатами попередньої оцінки, ринок привабливий для в'їзду. Існує попит на розгортання високошвидкісних середовищ для передачі інформації на різних мережах зв'язку на великих відстанях. Є можливість комерціалізації проекту на ринку.
2. Продукт є унікальним в своїй галузі. Конкуренція на національному ринку мінімальна кількість та нижча якість послуг. Для подальшого дослідження, розробки та тестування товару потрібно залучити висококваліфікованих науковців та інженерів.
3. Для ринкової реалізації проекту доцільно обрати альтернативу – пошук наукових та технічних ресурсів, залучення інвесторів, створення реклами, взаємодія зі споживачами.

ВИСНОВКИ

На основі вивчення сучасного стану теорії й практики солітонних ВОСП, систематизованого розгляду фізичних принципів поширення надкоротких оптичних імпульсів з урахуванням впливу таких явищ як ДГШ, ФСМ, ФКМ обґрунтовано перспективний напрямок розвитку солітонних ВОСП.

В результаті досліджень становлено:

1. В волоконно – оптичних системах зв'язку, що працюють на довжині хвилі 1,55 мкм, для зменшення дії ДГШ, можна йти двома шляхами.

По – перше, використовувати світловоди зі зміщеною дисперсією, у яких довжина хвилі мінімальної дисперсії збігається з довжиною хвилі мінімальних втрат.

По – друге, використовувати напівпровідникові лазери, що працюють на одній подовжній моді.

2. У випадку фундаментального солітона дисперсія і ФСМ взаємно компенсуються так, що ні форма солітона, ні його спектр не змінюються при його розповсюдженні.

В реальних оптичних системах зв'язку часто утворюються не фундаментальні солітони, а солітони вищих порядків.

3. Проаналізовано критерії оцінки якості функціонування солітонних ВОСП.

4. Розглянуто явище джитера Гордона – Хауса фундаментальних і ДУ солітонів для першого й наступного сегментів оптичного тракту в періоді дисперсійної карти.

Величина джитера Гордона – Хауса обернено пропорційна енергії імпульсу і за великої відстані поширення має квадратичну залежність від відстані.

5. Оцінено вплив джитера Гордона – Хауса на функціональні можливості

солітонних волоконно – оптичних систем передачі з дисперсійним управлінням. Виявилося, що при поширенні солітонів зі швидкістю передавання 10 Гбіт/с на відстані 8000 км величина джитера не перевищує допустиме значення.

За наявності двох підсилювачів у періоді дисперсійної карти джитер зменшується приблизно у два рази.

6. Досліджено метод зменшення впливу явищ Гордона – Хауса. Завдяки цьому можливо збільшити довжину регенераційної ділянки солітонної ВОСП без зменшення довжини підсилювальної ділянки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Слепов Н. И. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM) – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
2. Дмитриев А. Н. Волоконно–оптическая техника: история, достижения, перспективы – М.:Издательство "Connect", 2000.–376 с.
3. Ахмадиев Н. Н. , А. Анкевич, Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки.– : Физматлит, 2003. – 304 с.
4. Н. Власов, В. А. Петрищ, В. И. Таланов, Усредненное описание волновых пучков в линейных и нелинейных средах (Метод моментов) Известия ВУЗов. Радиофизика. –1 971. – Т.15, №9. – С.1353 – 1363.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ.– М.: Мир, 1996.–323 с.
6. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Наука, 1989.–234 с.
7. Бломберген Н. Нелинейная оптика. – М.: Мир, 1996. – 230 с.
8. Фриман Р. Волоконно–оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003.– 440 с.
9. Лэм Дж. Л. Введение в теорию солитонов. – М.: Мир, 1983.–294 с.
10. Х. Сегур, М. Абловиц Солитоны и метод обратной задачи.,– М.: Мир, 1987.–480 с.
11. А. Ахманов, В.А. Выслоух Солитоны оптические , Большая российская энциклопедия. – М., 1994.–Т.4.–560 с.
12. В. Н. Серкин, Т. Л. Беляева. Высокоэнергетичные оптические шредингеровские солитоны– М. – 2001. – Т.74. – С.649–654.
13. В.Е. Захаров, С В . Манаков, СП . Новиков,Л. П. Питаевский Теория солитонов. Метод обратной задачи– М.: Наука, 1980.–321 с.
14. Власов О.М. Вплив дисперсії групової швидкості на еволюцію імпульсів у світловоді ; Зв'язок. – 2004.– № 3.– С. 63–67.
15. Мело Мелчор Г., Агуеро Гранадос М., Корро Г.Х.;. К проблеме идеального усиления оптических солитонов . Квантовая электроника. – 2002. – 32,

№11. – С. 1020–1028.

16. Agrawal G. P. Fiber – Optic Communication Systems, 3rd ed – New York: Wiley, 2002.–550 p.

17. Nijhof J.H.B, Doran N.J., Forysiak W., Stable soliton – like propagation in dispersion managed systems with net anomalous, zero and normal dispersion / Knox F.M. Electron. Lett. – 1997. – 33,№20. – P. 1726–1727.

18. Додц Р. и др. Солитоны и нелинейные волновые уравнения.– М.: Мир, 1988.–324 с.150

19. В. Н. Серкин, Беляева Т.Л Оптимальное управление параметрами оптических солитонов . Квантовая электроника.– 2001. – 31,№11. – С. 1007–1015.

20. Agrawal G.P. Application of Nonlinear Fiber Optics. San Diego: Academic, 2001.

21. Gordon J. P, Haus H. A.Random walk of coherently amplified solitons inoptical fiber transmission . Opt. Lett. – Vol.11. – 1986. – P. 665–667.

22. Marcuse D. An alternative derivation of the Gordon–Haus Effect / J. Lightwave Technol. – 1992. – Vol. 10. – P. 273–278.

23. McKinstrie C. J.Effects of filtering on Gordon–Haus timing jitter in dispersion–managed systems . J. Opt. Soc. Am. B.– Vol. 19.–P. 1275– 1285.

24. Маймистов А. И. К теории компрессии оптических импульсов в нелинейном волоконном световоде. Квантовая электроника. –1994. – Том.21, №4. – С. 358–362

25. О. М Власов, В. Б. Каток, В. М.Шпак;. Використання нелінійних ефектів волоконних світловодів для часової компресії оптичних імпульсів . Зв'язок. – 2006. – №2. – С. 42–47.

26. Нванов А. Б. Волоконная онтика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.–671 с.

27. Mollenauer L.F., Neubelt M. J., Haner M., Litchman E., Evangelides S. G., Nyman B. M. Demonstration of error–free soliton transmission at 2.5 Gbit/s

Додаток А

Лістинг програми моделювання солітонних ВОСП

```

l=0:8000;%завдання відстані
tjgxl1(1);%звертання до файлу–функції розрахунку джитера Гордона–Хауса
%для першої дисперсійної карти при одному підсилювачі
tjgxl2(1);%звертання до файлу–функції розрахунку джитера Гордона–Хауса
%для першої дисперсійної карти при двох підсилювачах
v2=7.2;%завдання припустимого значення джитера для 10 Гбіт/с системи
tjgx21(1);%звертання до файлу–функції розрахунку джитера Гордона–Хауса
%для другої дисперсійної карти при одному підсилювачі
tjgx22(1);%звертання до файлу–функції розрахунку джитера Гордона–Хауса
%для другої дисперсійної карти при двох підсилювачах
tjgxddf1(1);%звертання до файлу–функції розрахунку джитера Гордона–Хауса
%для дисперсійної карти на основі DDF при одному підсилювачі
tjgxddf2(1);%звертання до файлу–функції розрахунку джитера Гордона–Хауса
%для дисперсійної карти на основі DDF при двох підсилювачах
figure(1);plot(l,tjgxl1,'b-.',l,tjgxl2,'r—',l,y2,'g-');%побудова залежності
%джитера Гордона–Хауса від відстані поширення для першої
%дисперсійної карти
figure(2);plot(l,tjgx21,'b-.',l,tjgx22,'r—');%побудова залежності
%джитера Гордона–Хауса від відстані поширення для другий
%дисперсійної карти
figure(3);plot(l,tjgxddf1,'b-.',l,tjgxddf2,'r-');%побудова залежності
%джитера Гордона–Хауса від відстані поширення
%для дисперсійної карти на основі DDF
l=0:600;%завдання відстані для порівняння результатів розрахунку з результатами
%чисельного рішення НУШ
tjghan(1);%звертання до файлу–функції аналітичного розрахунку джитера Гордона–
Хауса
l1=100:100:500;
tjgxssfm(l1)%звертання до файлу–функції значень SSFM
p=polyflt(l1,tjgxssfm,6)

```

```

f=polyval(p,ll);
table=[ll ans f ans-f]
l=0:600;
ll=100:100:500;
tjgxssfm(ll);
f=polyval(p,ll);
figure(4);plot(ll,tjgxssfm,'rs',ll,f,'-g',l,tjgxan,'b-'), axis([0 600 0 0.35]),grid%побудова
%залежностей отриманих аналітично й за допомогою SSFM
tjgxanpoin(l)%програма оцінки точності результатів
tjgxssfm(ll)
e=sum((tjgxanpoin-tjgxssfm).^2)
E=sqrt(e)/length(tjgxanpoin)
ymin=min(tjgxanpoin)
pog=E/ymin*10

```

Додаток Б

Abstract

"Methods for increasing the functionality of linear soliton chains"

The development of modern telecommunication networks consistently moving towards increasing their information capacity, defined by the product of the velocity on the transmission distance information.

Constantly increasing demand for increased data rate leads to the emergence and formation of new fiber optic technologies to transmit signals over long distances at high speed. Using the method of time multiplexing due to technological limitations is not a universal solution to increase the capacity of backbone fiber–optic transmission systems (FOTS). Finding ways to overcome these limitations comes from two directions. The first is using the technology of spectral separation of optical channels, the second – with a practical embodiment of the idea of further increasing the transmission speed in the optical channel through the use of soliton pulses. Currently FOTS the wavelength division optical channels are widespread in many countries, including Russia.

An alternative method based on the use of soliton transmission mode, is in the process of theoretical and experimental research conducted to develop a soliton playback.

Optical soliton – is impulse, which is a bell–shaped solitary wave formed in the optical fiber in the presence of certain nonlinear dependence of the refractive index of the intensity of the coherent radiation source. In this case, the refractive index should increase with increasing intensity. Then the high – frequency components of the pulse as it shifted to its tail, and low–frequency components – to his head than is suppressed by the action of chromatic and polarization dispersion. Such a pulse can maintain the shape and width throughout the length of the fiber line.

Origin of the name of the optical pulse: SOLITARI – solitary wave, SOLITON – particle. The first concept of soliton formulated the famous English physicist, mathematician, fluid mechanics, John Scott Russell (1808 – 1882), which is the first time in 1834, drew attention to a particular concern in the channels by which to transport the coal barges.

Model of optical soliton was proposed in 1971 by Russian scientists V. Zakharov and AB Shabat. The propagation of light in a nonlinear medium described by the nonlinear Schrödinger equation.

In 1980, optical solitons observed L. Mollenauer, R. Stolen, and Gordon J. Since then, numerous research and technological development, which allowed to talk about the feasibility of using solitons for optical communication.

Much experimentation has been done using solitons in fiber optics applications. Solitons' inherent stability make long-distance transmission possible without the use of repeaters, and could potentially double transmission capacity as well.

In 1973, Akira Hasegawa of AT&T Bell Labs was the first to suggest that solitons could exist in optical fibers, due to a balance between self-phase modulation and anomalous dispersion. Also in 1973 Robin Bullough made the first mathematical report of the existence of optical solitons. He also proposed the idea of a soliton-based transmission system to increase performance of optical telecommunications.

Solitons in a fiber optic system are described by the Manakov equations.

In 1987, Emplit et al. (1987) – from the Universities of Brussels and Limoges – made the first experimental observation of the propagation of a dark soliton, in an optical fiber.

In 1988, Linn Mollenauer and his team transmitted soliton pulses over 4,000 kilometers using a phenomenon called the Raman effect, named after Sir C. V. Raman who first described it in the 1920s, to provide optical gain in the fiber.

In 1991, a Bell Labs research team transmitted solitons error-free at 2.5 gigabits per second over more than 14,000 kilometers, using erbium optical fiber amplifiers (spliced-in segments of optical fiber containing the rare earth element erbium). Pump lasers, coupled to the optical amplifiers, activate the erbium, which energizes the light pulses.

In 1998, Thierry Georges and his team at France Telecom R&D Center, combining optical solitons of different wavelengths (wavelength division multiplexing), demonstrated a composite data transmission of 1 terabit per second (1,000,000,000,000 units of information per second), not to be confused with Terabit-Ethernet.

The above impressive experiments have not translated to actual commercial soliton system deployments however, in either terrestrial or submarine systems, chiefly due to the Gordon – Hase's (GH) jitter. The GH jitter requires sophisticated, expensive

compensatory solutions that ultimately makes DWDM soliton transmission in the field unattractive, compared to the conventional non–return–to–zero/return–to–zero paradigm. Further, the likely future adoption of the more spectrally efficient phase–shift–keyed/QAM formats makes soliton transmission even less viable, due to the Gordon–Mollenauer effect. Consequently, the long–haul fiberoptic transmission soliton has remained a laboratory curiosity.

In 2000, Cundiff predicted the existence of a vector soliton in a birefringence fiber cavity passively mode locking through SESAM. The polarization state of such a vector soliton could either be rotating or locked depending on the cavity parameters.

In 2008, D. Y. Tang et al. observed a novel form of higher–order vector soliton from the perspective of experiments and numerical simulations. Different types of vector solitons and the polarization state of vector solitons have been investigated by his group.

Solitons can propagate in the glass fiber for long distances (thousands of kilometers) with virtually no distortion of the pulse and kept in a collision with each other. To support the soliton energy should receive external support from the pumping source. Only in this case the soliton is preserved. Necessary to clarify the conditions of existence in the optical fiber of solitary waves – solitons.

In a sufficiently long optical fibers can exhibit nonlinear optical effects:

- stimulated Raman (Raman) scattering (SRS);
- stimulated Mandelstam – Bryullien (VMBR);
- self–phase modulation (self–focusing) or four–photon four–wave mixing.

Stimulated scattering of light caused by the nonlinear interaction of strong electromagnetic radiation field with the electromagnetic field of the atoms of the physical environment (in this case – in fiberglass). Light scattered by the elementary excitations of the medium induced scattering medium. Upon excitation (induced) medium by a powerful light source is modulated its parameters, which leads to amplitude modulation of the scattered light, and thus to the appearance in it of new spectral components. They are called the Stokes components. The interaction of the light wave with an inverted medium in the literature has been called a photon – phonon interaction. In this case, a phonon is

called a quantum of energy that occurs in the process of photon scattering. The most important types of scattering are the SRS and SBS.

SRS is associated with excitation of vibrational levels of the new medium particles (electrons) and to a lesser extent – the rotational energy levels of these particles.

SBS leads to the appearance in the environment of hypersonic waves, whose intensity depends on the pump pulse repetition rate for pulses shorter than 10 ns can almost disappear. Unlike SRS, the radiation scattered by the mechanism of Mandelstam – Brillouin distributed only in the opposite direction to the pitcher.

SRS is observed at pump powers more than 1 watt. SBS already observed at a power greater than 1 mW.

The phenomenon of self–phase modulation (SPM) or the self–focusing, or the phase cross–modulation (FCM) is due to the dependence of the refractive index of the fiber core, ie output signal phase, the intensity of the optical signal.

When the signal power over 10 mW in a standard single–mode fiber SMF occurs, contributing to compression of pulses, ie signal acts on itself, reducing the difference in phase velocities of spectral components. Education FCM may result in the transmission of several optical channels, to their mutual influences.

Four – wave mixing is that in the presence of associated two waves (2 channels) with the frequencies f_1 and f_2 ($f_1 > f_2$), there are two more waves of frequency $2 f_1 - f_2$, and $2 f_2 - f_1$, propagating in the same direction and aggravated by the source. Of course, that a larger number of wave spectrum to further expand. Four–wave mixing is manifested even when the signal power over 10 mW and has a direct relation to the PPW.

It should be noted that the nonlinear effects in glass fibers are not only a negative role, ie restrict the range of speed, but also allow SBS to provide a mode and input optical channels and mode WRC – implement enhancement of optical signals. A special role can the phenomenon of SPM for the formation and transmission of optical solitons.

The uniqueness of the soliton lies in the fact that the group–velocity dispersion, which is determined by the length of the optical pulse is completely balanced by nonlinear refractive index ($D n (E^2)$).

Sufficiently accurate description of the conditions of existence of optical solitons obtained by solving the Schrodinger equation.

Solitons in the propagation process change shape, breaking into groups of pulses and then re-assembling. This complicated dynamics is determined by many factors: self-phase modulation, group velocity dispersion, power and pulse duration. As a transmission medium used by agents with low power losses. Due to the small losses of solitons can propagate long distances without the use of special devices compensate losses.

At the output soliton laser generates a continuous sequence of solitons with a given duty cycle (typically $Q = TS/t_3 \approx 10$). Sequence of solitons pass through an isolator and modulator (eg, EOM), in which a pulse sequence is modulated. The output of the line signals recorded FPA (FPU). Application of the periodic compensation for loss of power can increase the transmission distance.

To maintain the capacity of solitons are used Raman amplifiers pumped by wavelength, differing from the wavelength of information signal. The scheme uses an optical filter (F), do not let the pump radiation in the FPU.

There is another option for constructing soliton transmitting system with Er amplifiers. At the same time gain is not on the entire length of the transmission site, but only in amplifiers (fiber length to 100 m). The advantage is that it applies less pump sources with substantially less power.

It should be noted that the possible joint use of erbium and Raman amplifiers in soliton transmitting system.

It should be noted feature of the soliton laser. This device, which leads to the generation of very short pulses (a few ps and femtosecond fs), achieved through the compression of pulses with a duration of nanoseconds.

In 1998, the magazine Euro Photonics was reported successful tests of serial four-duplex system WDM (T31-BDS Pirelli) in conjunction with the equipment SONET OC-192 on speed 10Gbit / s on one channel in the soliton regime. As part of the equipment used: generator unit soliton pulses, a linear code converter RZ / NRZ; fiber for dispersion compensation DCF; regenerators were installed on the length of 450km by 92km.

Transmission system is a new generation of Lambda Xtreme Transport company Lucent Technologies provides the transmission of digital data at speeds up to 2.56 terabits per second mode DWDM (1964 wave channel for 40Gbit / s each) at distances up to 4000km without electrical signal regeneration. To achieve these capabilities are applied: blocks of soliton transmission, Raman amplifiers, forward error correction FEC.

Bandwidth fiber–optic technology with the soliton depends largely, as well as the effect of perturbations introduced by the noise of amplified spontaneous emission (Amplified Spontaneous Emission – ASE) of optical amplifiers, mounted in a linear path. Increased throughput fiber–optic soliton is possible only with allowance for this factor.

It is known that the loss of peak power, soliton, resulting in a linear fiber optic tract compensated by optical amplifiers and in the process of amplification of an optical soliton part of the energy is lost as the dispersive wave and the appearance of the scattered wave in a cascade connection of optical amplifiers in a linear path can lead to destructive interaction of soliton pulse . To reduce the influence of dispersive waves, it is necessary that the dispersion length LD is much greater than the length of the amplification plot Lg . Since the dispersion length is proportional to the duration of the soliton, the condition limiting the maximum distance between the amplifiers, it is difficult to implement in practice for high–speed transfer modes.

Numerical modeling of the 10 picosecond soliton pulse shows that only when the length of the amplifier section $LA = 25$ km and the dispersion length $LD = 120$ km can be achieved stable propagation of solitons in a fiber optic loss and gain.

Limiting the duration of the soliton and the length of the regeneration area is limited to the so–called "jitter" – jitter of the soliton pulse frequency modulation noise caused by ASE, ie, the effect of Gordon House. These reasons do not allow the current practice to increase the capacity of fiber–optic soliton, in connection with the need to improve technical and Environmental Specifications soliton fiber–optic line.

Analysis of the data in the field to minimize the impact of factors that limit the creation of soliton fiber–optic line shows that the most promising avenue for the creation of soliton systems, super–range communication can be achieved by using optical fibers with variable dispersiey. Organizations use two methods of communication lines with

variable variance: application of solitons propagating in an optical fiber with variable length variance DDF (dispersion–decreasing fiber) or solitons propagating in an optical fiber, in which alternate sections with positive and negative dispersion.

Application of optical fibers with special dispersion profile allows you to overcome the restriction imposed is necessary that LA «LD. If the soliton energy is restored at the end of each segment of optical fiber DDF, a soliton can propagate in fiber–optic line with an amplifying section 50 – 100 km. In the propagation of a soliton in a dispersion pattern, consisting of optical fibers with the opposite sign of dispersion parameters, its duration and evolution of the shape–periodic. Pulse, whose initial shape and duration of recovering after each period distribution scheme is called a soliton with dispersion management – (DM – soliton) and its dynamics differs substantially from the dynamics of the fundamental soliton, which propagates in an optical fiber with constant or weakly variable variance.

Taking into account given by the equation form of the fundamental soliton equations are obtained evolution of the main parameters of an ultrashort soliton pulse: energy – E , T – status, frequency – Ω , setting the frequency modulation – C and duration – τ , allowing the process to determine its distribution.

Based on the assumption that the amplifiers in fiber–optic evenly spaced conducted simulations taking into account the effect of amplifier noise, the transmitter and receiver showed that at a transfer rate of 40 Gbit / sec and the length of the amplifier site 50 km maximum length of the regeneration area is 5000 km.

The study is to identify the features of soliton transmission systems, the practical problems of increasing functionality soliton transmission systems.

Research goals was consider the nonlinear effects of fiber light guides. Most clearly manifest nonlinear effects: the nonlinear refractive index, forced inelastic scattering, parametric processes that are crucial in the distribution of ultrashort optical pulses, and always required the treatment of group velocity dispersion (DHS).C

Consider ways of soliton communication lines with dispersion management. Consider the equation mathematical model soliton communication lines with variable dispersion for the fundamental soliton and soliton dispersion of control.

Review the criteria for evaluating the quality of the soliton, statistical estimates of jitter Gordon – Hause’s fundamental soliton and soliton dispersion management of the cases of one and two amplifiers in the period of dispersion map. Assess the impact of jitter Gordon – Hause’s of functionality had sung a hymn with the soliton dispersion management and provide recommendations to develop alternative ways to reduce the impact of jitter Gordon – Hause’s.

Consider ways of practical application of nonlinear effects of pulse propagation mode for creating and optimizing the parameters of fiber – optic devices for communication systems. One of the most important applications of nonlinear effects in fiber light guides are optical pulse compression. Optimize the parameters of soliton compressor.

Based study of contemporary theory and practice soliton had sung a hymn, a systematic review physical principles of ultrashort optical pulses, taking into account the impact of such phenomena as DSHH, FSM, FCM reasonably promising direction of the soliton had sung a hymn.

As a result of theoretical studies first installed:

In fiber – optical communication systems that operate at a wavelength of 1.55 microns, to reduce DSHH action can go two ways. In – First, use with rear Light dispersion in which the wavelength of minimum dispersion wavelength coincides with minimum losses and, secondly – to use semiconductor lasers operating in a longitudinal fashion, so that the width of the spectrum sources in a state of continuous generation was less than 100 MHz.

In the case of a fundamental soliton dispersion and FSM offsetting, so that no form of soliton or its spectrum does not change when its distribution. In actual optical communication systems are often formed no fundamental solitons and higher–order solitons

The evolution of parameters of ultrashort soliton pulse in fiber, which defines the main effects that influence the evolution of momentum and analytical expression for the Q – factor soliton system with regard to noise amplifier, transmitter and receiver

A statistical evaluation of jitter Gordon – Hase's and fundamental DM soliton for the first and subsequent optical path segments in the period of dispersion map. Size Jitter Gordon – Hase's inversely proportional to the energy and momentum for a distance distribution has a quadratic dependence on distance.

The influence of jitter Gordon – Hase's of functionality soliton fiber – optical transmission systems with dispersion management. It turned out that the propagation of soliton transmission at speeds of 10 Gbit / s at a distance of 8000 km jitter value does not exceed the permissible value If two amplifiers in a dispersion map period jitter is reduced roughly in half.

A reduction of the optimization problem and solved impact phenomena Gordon – Hase's. This may increase the length of soliton regeneration plots had sung a hymn without reducing the length Amplification plot.