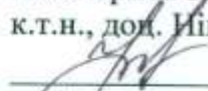


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.37

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т.М.


«14» грудня 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Розробка та дослідження методу гібридної системи зв'язку на основі
дискретного фотонного оптоволоконного мікрохвильового
фільтра

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр. ТРМ-19-1

14.12 
(дата, підпис)

Барабаш І.О..

Керівник роботи


(дата, підпис)

Хоменко Ж.М.

Житомир
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему Розробка та дослідження методу гібридної системи зв'язку на основі
дискретного фотонного оптоволоконного мікрохвильового
фільтра

Виконав: студент 2 курсу, групи ТРм-19-1
спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Барабаш І.О.

Керівник к.т.н. Хоменко Ж.М.

Рецензент к.т.н Мартинчук П.П

Житомир
2020

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук

«15» серпня 2020 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Барабаш Ілля Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження методу гібридної системи зв'язку на основі дискретного фотонного оптоволоконного мікрохвильового фільтра

затверджено наказом по університету від «16» жовтня 2020 р. № 366/с

2. Мета дослідження підвищення ефективності гібридних систем зв'язку

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.
наявність радіосигналу, що модулює НВЧ діапазону

4. Основні задачі дослідження Розробка методу придушення періодичних спектральних смугпропускання фотонного некогерентного багато вивідного КІХ-фільтра в гібридних системах зв'язку, заснованого на ефекті Верн'єри, що забезпечує підвищення спектральної ефективності гібридної системи зв'язку. Розробка структури реконфігурованого комбінованого фотонного НВЧ фільтра для підвищення добротності системи. Моделювання некогерентного фотонного НВЧ фільтра. Моделювання когерентного фотонного НВЧ фільтра. Моделювання когерентного оптичного Лайот фільтра

5. Термін подання роботи до захисту липень 2020

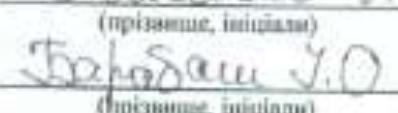
6. Дата видачі завдання «15» серпня 2020 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

(підпис)


(прізвище, ініціали)

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг складає 51 сторінок, з яких основний зміст викладено на 46 сторінках друкованого тексту, магістерська робота має в собі 26 рисунків. Перелік джерел посилання нараховує 49 найменування.

Перелік ключових слів. Фотонний НВЧ фільтр, КІХ-фільтр, Лайот-фільтр, ефективність.

Об'єктом досліджень є гібридні системи зв'язку передачі інформації, що характеризуються наявністю радіосигналу, що модулює НВЧ діапазону.

Мета і задачі дослідження.

Метою є способи підвищення ефективності гібридних систем зв'язку.

Для досягнення цієї мети розв'язувались наступні задачі:

1. Розробка методу придушення періодичних спектральних смуг пропускання фотонного некогерентного багато вивідного КІХ-фільтра в гібридних системах зв'язку, заснованого на ефекті Верн'єри, що забезпечує підвищення спектральної ефективності гібридної системи зв'язку.
2. Розробка структури реконфігурованого комбінованого фотонного НВЧ фільтра для підвищення добротності системи.
3. Моделювання некогерентного фотонного НВЧ фільтра
4. Моделювання когерентного фотонного НВЧ фільтра
5. Моделювання когерентного оптичного Лайот фільтра

Методи дослідження. В першому розділі результати роботи отримані на основі використання основних положень теорії електричного зв'язку, теорії цифрової обробки сигналів, чисельних методів, теорії поширення радіохвиль. Другий розділ присвячений розробці методу придушення періодичних спектральних смуг НВЧ фотонного фільтра в гібридних системах зв'язку і структури фотонного реконфігурованого комбінованого СВЧ фільтра. Для вирішення цього завдання пропонується використовувати комбінацію некогерентного КІХ-фільтра і когерентного Лайот фільтра. Розроблений метод заснований на ефекті Верн'єри. В третьому застосовані методи математичного та комп'ютерного моделювання..

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ	Амплітудно-частотна характеристика
БС	Базова станція
БІХ	Фільтр з безкінечною імпульсною характеристикою
ВОЛЗа	Волоконно-оптична лінія затримки
ВОЛЗ	Волоконно-оптична лінія зв'язку
ДН	Діаграма направленості
КІХ	Фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою
ОБС	Модуляція одна бічна смуга
ОСФЛ	Оптична система формування радіолуна
ПМ	Поляризаційний модулятор
ПМС	Просторовий модулятор світла
РТЗ	Реальна тимчасова затримка
РЧ	Радіочастотне випромінювання
НВЧ	Надвисокочастотне випромінювання
ЦС	Центральна станція
AWG	Упорядкована хвилевідна решітка (Arrayed Waveguide Grating);
BER	Коефіцієнт бітових помилок (Bit Error Rate);
DGD	Пристрій диференціальної затримки (Differential Group Delay);
DFB	Лазер з розподілений зворотнім зв'язком (Distributed Feedback Laser);
FSR	Спектральна відстань між двома послідовними максимумами частотного відгуку (Free Spectral Range);
MWP	Мікрохвильова фотоніка (Microwave Photonics);
PLC	Планарна світлова схема (Planar Lightwave Circuits);
PMF	Оптичне волокно зі збереженням поляризації (Polarization Maintaining Fiber);
SOA	Напівпровідниковий оптичний підсилювач (Semiconductor

Optical Amplifiers);

PC Контролер поляризації (Polarisation Controller);

PD Фотодіод (Photodiode);

WDM Мультиплексування з поділом по довжині хвилі
(Wavelengthdivision Multiplexing).

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	8
1 Аналітичний огляд літературних джерел.....	10
1.1 НВЧ фотонні технології.....	10
1.2 Оптична обробка сигналів. Поняття дискретної оптичної обробки.....	16
1.3 Формування НВЧ сигналу в оптичній області.....	14
1.4. Проектування НВЧ фотонних фільтрів.....	19
1.5 Класифікація фотонних фільтрів.....	20
1.5.1 Некогерентні структури фотонних НВЧ фільтрів	21
1.5.2 Когерентні структури фотонних НВЧ фільтрів.....	24
Висновок до розділ.....	26
2 Розробка методу придушення періодичних спектральних смуг пропускання НВЧ фотонних фільтрів в гібридних системах зв'язку.....	27
2.1 Постановка мети розробки методу придушення періодичних спектральних смуг НВЧ фотонних фільтрів	27
2.2 Розробка математичної моделі комбінованого фотонного НВЧ фільтра.....	28
2.3 Розробка структурної схеми комбінованого фотонного НВЧ фільтра.....	31
Висновок до розділу.....	33
3 Моделювання.....	34
3.1 Моделювання некогерентного фотонного НВЧ КІХ-фільтра.....	34
3.2 Моделювання некогерентного фотонного НВЧ КІХ- фільтра.....	38
3.3 Моделювання комбінованого фотонного НВЧ фільтра.....	43
Висновок до розділу.....	44
Висновки.....	46
Список використаної літератури.....	47

Вступ

В сучасному світі досить швидко розвиваються і удосконалюються системи наземного і космічного зв'язку, тому актуальним стає питання щодо пропускної здатності, швидкодії, масштабованості, компактності і вагових характеристик вбудованих блоків і компонентів. Спрямовані на підвищення швидкості передачі даних у всіх системах зв'язку, все більше застосування знаходять гібридні технології, що поєднують різні середовища поширення сигналу: оптичне волокно, повітряні і безповітряні простору. Це пояснює доцільність використання переваг оптичних систем зв'язку, таких як висока пропускна здатність каналів передачі даних і перешкодозахищеність. І в зв'язку з цим постає питання про мінімізацію розмірів системи, швидкодії всередині системи, а також як обробки інформації.

До пошуку нових рішень, як і раніше існуючих задач, так і дотепер, що з'явилися в області проектування і обробки спрямована сучасна технічна наука.

Застосування нових способів побудови гібридних мереж, використання нових методів фільтрації НВЧ сигналу в оптичній області - все це веде до підвищення ефективності систем передачі та обробки інформації в гібридних системах зв'язку.

Технології оптичного формування радіопромінів, НВЧ оптичних фільтрів можуть забезпечити рішення вищезазначених завдань.

В якості ефективного технічного рішення вдосконалення та оптимізації гібридних систем зв'язку, що представляють собою «Радіо по волокну» (англ. Radio-over-Fiber) системи доступу, можуть бути використані оптичні способи формування радіосигналів на основі реальних часових затримок і НВЧ фотонні фільтри.

Досвід зарубіжних і вітчизняних вчених в області формування радіопромінів випромінюючих систем оптичними методами на основі тимчасових затримок, а також приклади розробок фотонних НВЧ фільтрів в оптичній області для формування бажаного спектру сигналу був використаний в рамках магістерського дослідження при вирішенні зазначених завдань. Дослідженням в області оптичних методів формування радіо променевих випромінюючих систем присвячені роботи

таких вчених як: Esman RD, Frankel MY, Vidal BR, Llorente RS, Tong D., Wu MC, Marti J., Matthews PJ, Chang C., Goldberg L., Yao JP, і багатьох інших. Аналіз робіт в даній області показав, що недостатня увага приділяється компактності реалізації, і системи не задовольняють вимогам по масо-габаритними показниками. Представлені роботи слабо або зовсім не враховують можливості реконфігурації оптичних систем формування радіо промінь.

Теоретичні та експериментальні дослідження в області фотонної НВЧ фільтрації були представлені такими вченими як: Campany J., Novak. D., Vidal BR, Marti J., Wilner K., Moslehi B., Goodman J., Jackson KP, Taylor HF, Zmunda H., Minasian RA, Yao J., Pastor D., Морозов О.Г., і багатьма іншими.

1 Аналіз літературних джерел

1.1 НВЧ фотонні технології

Незважаючи на первісну орієнтованість на далекий зв'язок, волоконно-оптичні технології знайшли застосування в широкому спектрі областей, серед яких мережі доступу, центри обробки даних, зондування, волоконні лазери, освітлення, візуалізація, і багато інших. Іншою важливою областю волоконно-оптичних технологій є інтеграція оптичних і надвисокочастотних (НВЧ) технологій для такого використання, як радары, комунікаційні лінії, військові системи та приладобудування. Ця область стала відома як мікрохвильова фотоніка (MWP) [1-7]. Це міждисциплінарний поле може отримати вигоду від додаткових можливостей, які оптична технологія може забезпечити в НВЧ галузі зв'язку. Доцільність дослідження MWP пояснюється можливістю оптичних пристроїв передавати корисну інформацію на великі відстані і працювати з широкими спектральними смугами пропускання. Ця область фотоніки включає в себе фотонну генерацію і передачу, обробку та моніторинг НВЧ сигналів, а також допоміжні фотонні і аналогово-цифрові перетворення.

Такі особливості, як низький рівень ослаблення і широка смуга пропускання волоконно-оптичних технологій можуть бути використані для реалізації функціоналу і можливостей НВЧ систем [8] - [14], які є вкрай складними або деколи не здійсненними безпосередньо в мікрохвильовій області. Ці переваги особливо актуальні, коли високочастотні сигнали схильні до існуючих обмежень в області генерації, обробки і передачі.

Традиційний метод обробки радіочастотних (РЧ) сигналів показаний на рисунку 1.1. Тут РЧ-сигнал, згенерований на високочастотному генераторі або отриманий з антени, поступає в РЧ блок обробки сигналів, де або в радіочастот, або на проміжній частоті, відбувається подальша його обробка. У будь-якому випадку, РЧ блок обробки сигналів здатний виконувати завдання обробки тільки в певній обмеженій спектральній смузі. Такий метод призводить до обмеженої

гнучкості смуги пропускання і обробки сигналів, так як будь-які зміни частотного діапазону оброблюваних сигналів зажадають нової конфігурації РЧ блоку обробки сигналів і, можливо, використання іншої апаратної технології. Крім того, навіть якщо частота несучої буде незмінна, то характер модулюючого сигналу може змінитися, що вимагатиме від процесора велику смугу пропускання або більшу частоту дискретизації. Це особливо актуально в разі дискретної обробки сигналів. Ці недоліки часто називаються в літературі по оптичних комунікацій терміном «*electronic bottleneck*», що в перекладі з англійської означає «електронне пляшкове горлечко» [8], [14]. Це обмеження є не єдиним джерелом спотворень, тому що електромагнітні та частотно-залежні втрати теж вносять свій внесок.

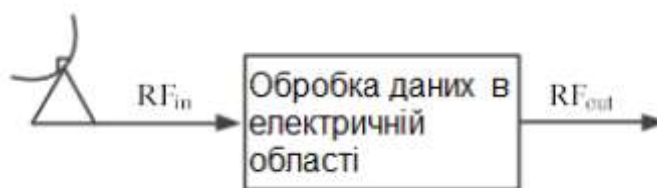


Рисунок 1.1 – Традиційний метод обробки РЧ сигналів

Перші MWP системи використовувалися для передачі електричних сигналів в оптичній області, як показано на малюнку 1.2. Електрооптичного пристрій перетворення (Е / О), як правило, модулятор Маха-Цендера або електропоглинаючий модулятор переносили корисний електричний сигнал на одну або більше оптичних несучих, які передавалися по оптичному середовищі (оптичне волокно), а потім відновлювалися в електричній області шляхом детектування опто-електронними перетворювачами (О / Е), PIN-фотодетекторами [15]. Такі системи відомі як НВЧ-фотонні лінії зв'язку.

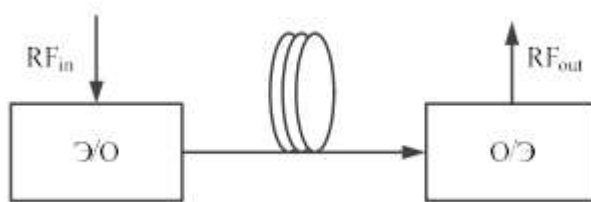


Рисунок 1.2 – Оптична лінія передачі РЧ сигналу

Своїми основними перевагами вони зобов'язані властивостями середовища поширення, таким як постійний низький коефіцієнт загасання в усьому частотному діапазоні модулюючих сигналів сантиметрової і міліметрової області, що дозволяє здійснювати передачу сигналу на великі відстані з малої деградацією сигналу; незалежність від формату даних, що означає, що низькочастотний і високочастотний сигнали можуть передаватися з однаковою продуктивністю; велика смуга пропускання; адаптивність до різних сценаріїв реалізації мереж внаслідок гнучкості оптичних волоконних кабелів; малу вагу і об'єм; стійкість до електромагнітних завад. Ці особливості дозволили реалізувати Radio-over-Fiber (RoF) мережі передачі даних [16-17], які забезпечують передачу радіосигналу, як правило, сантиметрового або міліметрового діапазонів, від центральної станції (ЦС) на одну або більше (БС) [18]. До поняття гібридних же мереж передачі даних варто віднести також сукупність RoF мереж і бездротових мереж передачі даних [19]. Цей підхід дозволяє спростити систему шляхом використання централізованої структури, яка включає антенний модуль, розташований ближче до кінцевого користувача [20]. Оптична несуча модулюється корисним РЧ сигналом або на проміжній частоті, або безпосередньо на частоті випромінювання. Для наочності цей процес продемонстрований на рисунку 1.3.

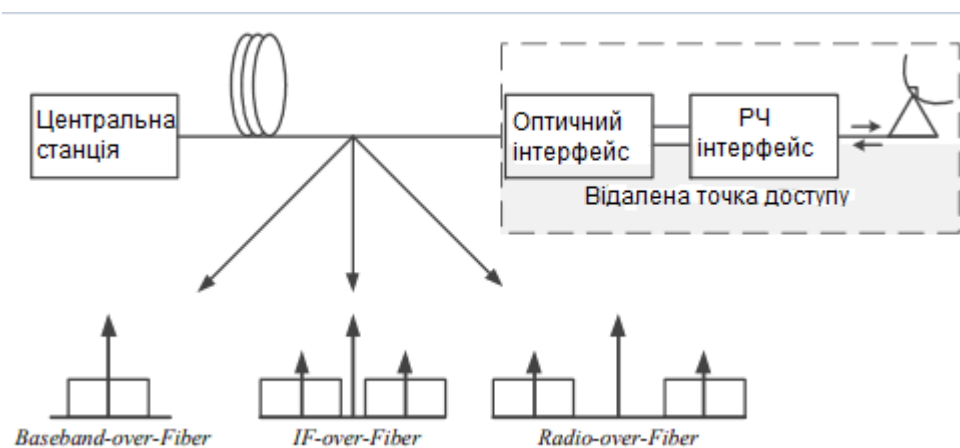


Рисунок 1.3 – Приклади формування модульованого сигналу в гібридних мережах передачі даних

Найкращий варіант буде залежати від кількості БС, хоча останній спосіб (RoF) найбільш поширений, тому що дозволяє використовувати прості БС

1.1 Оптична обробка сигналів. Поняття дискретної оптичної обробки

Волоконна оптика, крім передачі НВЧ сигналів, також може бути використана для обробки НВЧ сигналів безпосередньо в оптичній області. Вперше оптична обробка НВЧ сигналів була запропонована в 1976 г. [9]. Оптична обробка сигналів (малюнок 1.4) дає унікальні можливості управління надширокопasmові НВЧ сигналами фактично в усій спектральній області сантиметрового і міліметрового діапазонів, повністю усуваючи обмеження «*bottleneck*» повністю електричних приладів



Рисунок 1.4 – Оптична система обробки НВЧ сигналів

Крім того, оптична обробка сигналів при використанні оптичних хвилеводів пропонує нові рішення, пов'язані з побудовою каналів з високою пропускнуою здатністю [21]. Таким чином, оптична обробка сигналів демонструє собою новий підхід до питання обробки сигналів, який доповнює цифрову обробку і аналогову обробку з використанням НВЧ-компонентів [11], [22-25]. Крім того, обробка НВЧ сигналів безпосередньо в оптичному діапазоні дозволяє уникнути дорогих оптоелектронних перетворень, якщо сигнали вже в оптичному середовищі поширення.

Області застосування оптичної обробки сигналів включають в себе НВЧ фільтрацію [26], МГБ / с перші аналого-цифрові перетворювачі [27-29], змішувачі та частотні перетворювачі [30], корелятори сигналів [31], генератори сигналів довільної форми [32], аналого-цифрові перетворювачі в оптичній області [33], [34] і формувачі радіопромінь ФАР [35], схематично зображений на рисунку 1.5

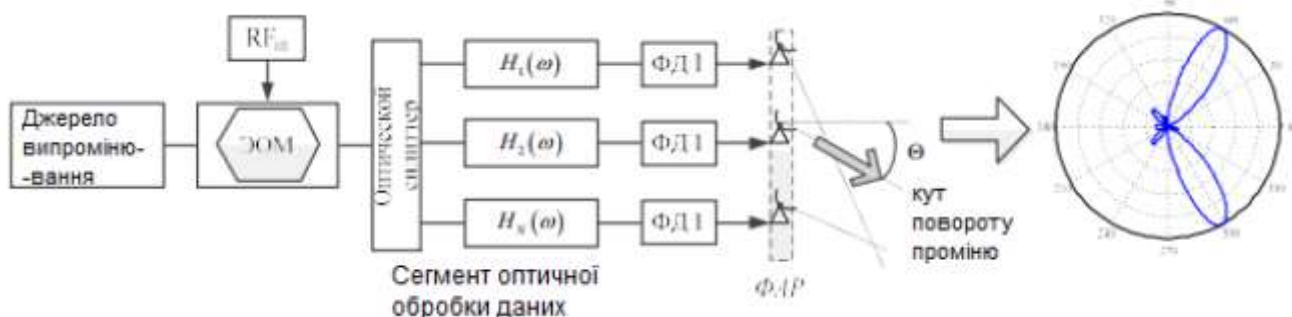


Рисунок 1.5 – Структурна схема формування ДН ФАР

На відміну від електричних фільтрів, відгук фотонних НВЧ фільтрів не залежить від частоти електричного сигналу, тому що центральна частота фільтра залежить виключно від оптичної затримки, що вноситься в структуру. Насправді, в практичних системах частотна характеристика обмежена пропускнуою здатністю електрооптичних і оптоелектронних перетворювачів (модулятори і фотодетектори відповідно). Процес обробки радіосигналів безпосередньо в оптичній області можна назвати дискретної оптичної обробкою НВЧ сигналів. Він полягає в дискретизації вхідного модульованого оптичного сигналу, обробці

вибірок і надалі їх структуруванні за допомогою оптичних ліній затримок і інших фотонних пристроїв [36]. Далі оброблений оптичний сигнал детектується оптоелектронними пристроями. Крім перерахованих переваг, методи дискретної оптичної обробки НВЧ сигналів можуть забезпечити дуже короткі часові затримки, що призводить до понад високій частоті дискретизації (понад 100 ГГц в порівнянні з декількома гігагерцами в області цифрової обробки сигналів). Крім того, оперування в оптичній області дає можливість як просторового, так і частотного поділу каналів завдяки WDM технологіям. На малюнку 1.6 продемонстровано застосування WDM технології.

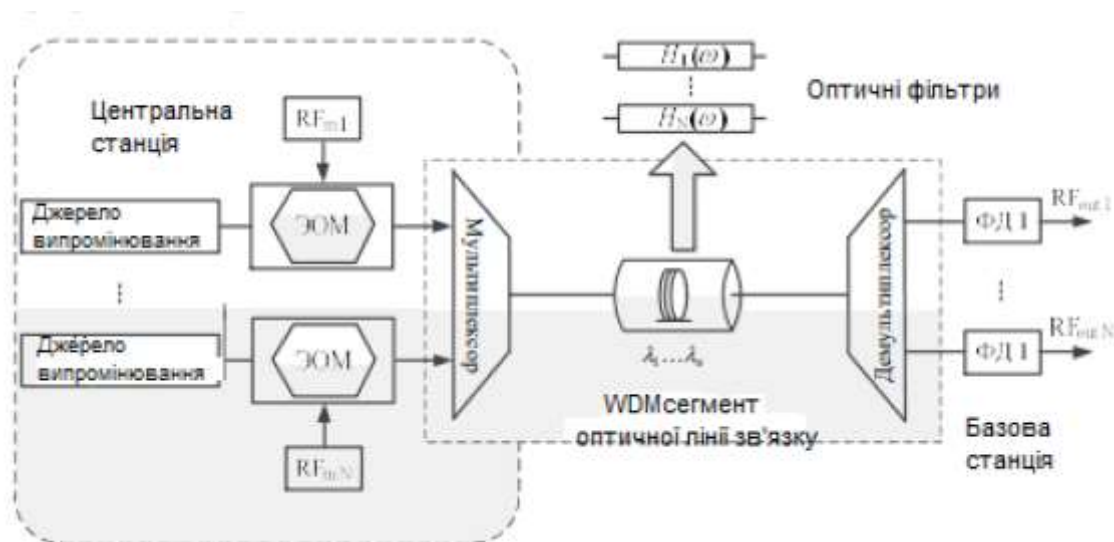


Рисунок 1.6 – Багатоportові WDM-оптичні мережі передачі даних

В цілому, розглянута технологія є привабливою для гібридних систем передачі даних [37], тому що антеною приймається не тільки корисний сигнал, але і різні перешкоди, які в подальшому призводять до інтерференції в оптичних лініях передачі. Можливість відфільтрувати небажані сигнали безпосередньо в оптичній області є унікальною характеристикою фотонних фільтрів. Також, фотонний фільтр може застосовуватися в якості смугового фільтра для пропускання необхідної смуги частот [38]. Більш того, необхідна спектральна смуга може змінюватися при можливості реконфігурації і перебудови фільтра. В обох випадках, вікно пропускання може змінювати від декількох МГц до десятків ГГц.

1.2 Формування НВЧ сигналу в оптичній області

Традиційно, формування НВЧ сигналу відбувається в електричних схемах і має багатоступеневий характер перетворення частоти. Ці системи складні і економічно не вигідні. До того ж, у багатьох застосуваннях згенерований НВЧ сигнал необхідно передати на віддалене відстань, а виконання цієї дії в електричній області є непрактичним внаслідок великого затухання при передачі по коаксіальному кабелю. Рішенням задачі служить передача НВЧ сигналу через

оптичне волокно [39]. Отже, стає актуальним питання генерації НВЧ сигналу в оптичній області.

Традиційним підходом до формування НВЧ сигналу вважається генерація його на основі суперпозиції двох оптичних хвиль з різними частотами, які надходять на фотодетектор. Потім формується електричний сигнал з частотою, що відповідає інтервалу довжин хвиль оптичних джерел [40]. Цей підхід дозволяє отримувати сигнал в електричному діапазоні з частотою понад ТГц діапазону, але має істотний недолік: внаслідок некогерентності оптичних джерел, згенерований НВЧ сигнал буде мати значний фазові шуми. За останній час було запропоновано велику кількість способів генерації НВЧ сигналу. Їх можна класифікувати на 4 категорії: 1) замикає оптичне накачування [41, 42], 2) оптична петля фазової синхронізації [43-49], 3) НВЧ генерація з використанням зовнішньої модуляції і 4) довгохвильового джерело випромінювання .

Перший спосіб полягає в тому, що дотримується висока когерентність джерел випромінювання. Схема реалізації способу зображена на рисунку 1.7 а. Внаслідок частотної модуляції на керуючому лазері, на його виході формується несуча і бокові складові різних порядків. Потім сигнал керуючого лазера надходить на два інших лазера, що несуть яких близькі до двох симетричним боковим складовим. Таким чином, несуча одного з лазерів фіксується на бічній складовою 2-го порядку керованого лазера, а несуча іншого лазера фіксується на бічній складовою 2-го порядку керованого лазера. З огляду на фазову кореляцію керованих лазерів, згенерований НВЧ сигнал має низький рівень фазових шумів. До того ж, при певній конфігурації, частота згенерованого НВЧ сигналу після детектування становить помножену остачі частоту модулюючого РЧ сигналу.

Другий спосіб досягнення фазової когерентності двох оптичних джерел полягає в створенні петлі фазової синхронізації, як показано на рисунок 1.7 б. Після детектування оптичного сигналу двох джерел випромінювання, відбувається порівняння його фази з фазою опорного сигналу. Фазовий детектор, виробляє струм пропорційний фазової різниці, який надходить на один з лазерів

по лінії зворотного зв'язку для корекції фази випромінювання за допомогою зміни довжини резонатора лазера або струму інжекції. При правильному налаштуванні посилення петлі зворотного зв'язку і часу відгуку, відносна фаза між двома лазерами буде значно знижена, і, отже, фаза згенерованого сигналу буде відповідати фазі опорного сигналу НВЧ генератора. Вимогою до високого показника ефективності даної системи є умова вузької спектральної ширини лінії лазерів, щоб забезпечити низькочастотні фазові флуктуації. Також відомий підхід спільного використання першого і другого методів формування НВЧ сигналу [46].

Для реалізації третього підходу застосовуються зовнішні модулятори. Найвідомішим з них є модулятор Маха-Цендера. Але його використання також має недолік, викликаний дрейфом робочої точки на передавальній характеристиці модулятора. Рішенням проблеми є використання оптичного фазового модулятора. Останній відрізняється тим, що формує в оптичній області як несучу, так і обидві бічні складові, тому застосовують вузькосмуговий режекторний фільтр для скасування оптичної несучої. Недоліком такого методу є те, що передаються по SMF-волокну бічні складові будуть відчувати вплив хроматичної дисперсії, що в свою чергу буде змінювати фазовий співвідношення між ними. Щоб уникнути негативних наслідків необхідно використовувати методи компенсації хроматичної дисперсії.

Останній спосіб генерації НВЧ сигналу використовує джерело випромінювання, здатний згенерувати дві несучі з необхідним розносом по частоті. З огляду на те, що випромінювання буде генеруватися з одного джерела, когерентність несучих буде на високому рівні. Перевагою реалізації даного методу є відсутність НВЧ опорного генератора, що значно здешевлює структуру. Ключовими елементами в схемі на малюнку 1.7В є ВБР-1 з двома понад вузькими смугами пропускання, виготовлена за технологією відносного фазового зсуву, і ВБР-2, зроблена за принципом суперпозиції двох стандартних ВБР.

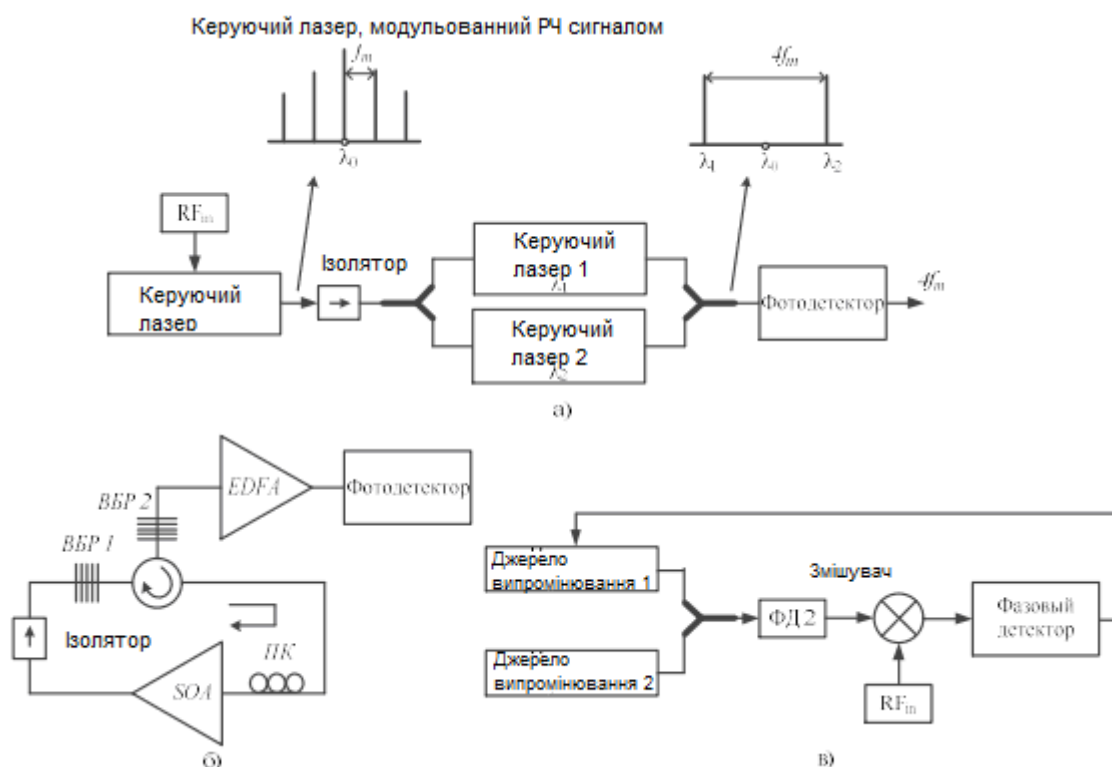


Рисунок 1.7 – Структурні схеми систем формування НВЧ сигналу в оптичній області

1.4 Проектування НВЧ фотонних фільтрів

Існують певні аспекти, які необхідно враховувати в час проектування фотонних фільтрів.

Когерентність джерел: в даному випадку необхідно розглянути два існуючих режими. Когерентний режим розуміє під собою стійку оптичну фазову кореляцію випромінювання в відводах фільтра. Внаслідок цього будь-які незначні зміни в параметрах системи (довжина оптичної лінії затримки, зміна показника заломлення через навколишнього впливу, поляризація і ін.) Можуть значно вплинути на відгук фільтра. Некогерентний режим, на відміну від попереднього, відрізняється тим, що оптичні фази між відводами фільтра повністю незалежні один від одного. При реалізації некогерентного режиму, коефіцієнти фільтра можуть приймати позитивні значення

Позитивні коефіцієнти: некогерентні фотонні фільтри є лінійними по оптичній інтенсивності, таким чином, вагові коефіцієнти будуть приймати тільки позитивні значення. Цей факт тягне за собою два важливих наслідки, які виходять з теорії позитивних систем [11], [14]. Перше і найбільш важливе обмеження полягає в тому, що діапазон використання передавальної функції вельми обмежений. Друге обмеження в тому, що незалежно від величини спектральної періодичності, передавальна функція завжди має резонансну частоту в основній смузі частот. Останнє не є серйозним недоліком, тому що на оптичному виході приймача може бути встановлений фільтр постійної напруги.

Спектральна періодичність є невід'ємною характеристикою фотонних НВЧ фільтрів, що є серйозним недоліком, тому що не дозволяє в повній мірі використовувати широкосмугові властивості фотоніки. Ставлення періодичності фільтра до ширини смуги пропускання є істотним обмеження

1.5 Класифікація фотонних фільтрів

Перший досвід в області оптичної фільтрації електричних сигналів, отриманий в кінці 70-х років, дав зрозуміти, що висока пропускну здатність модуляції оптичного волокна з низькими втратами можуть бути використані для реалізації лінії затримки широкосмугового діапазону [9]. Пізніше були запропоновані структури на основі багатомодового волокна [10], [11] і перші роботи на основі одномодового волокна [8], [13]. У цих ранніх роботах розглядаються різні конфігурації і потенційні обмеження, які присутні в оптичній обробці. Проте, ці схеми були засновані на пасивних структурах і не мали можливості реконфігурації. Пізніше були розроблені різні оптичні компоненти, які дозволили розробити більш гнучкі структури, які мають можливість регулювання потужності (можливість динамічно змінювати положення смуг пропускання або нулі фільтра) і реконфігурації (здатність динамічно змінювати значення амплітуди запізнілих вибірок, тобто змінювати вагові коефіцієнти фільтра) .

Фотонні НВЧ фільтри можна розділити на дві категорії [98]: фільтри, що працюють в когерентному режимі і фільтри, що працюють в некогерентному режимі. Для побудови фотонних фільтрів, що працюють в некогерентному режимі, використовуються лінії затримки з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ) і нескінченною імпульсною характеристикою (БІХ). Щоб уникнути оптичної інтерференції як джерела випромінювання використовуються некогерентні джерела або групи лазерів. Налаштування і реконфігурацію таких фільтрів здійснюють шляхом зміни часових ліній затримок або вагових коефіцієнтів фільтрації. У когерентних фільтрах, як правило, потрібно єдина несуча і проблема оптичної інтерференції не виникає за своєю суттю через відсутність будь-яких ліній затримок.

Таким чином, основні фотонні мікрохвильові фільтри можуть бути згруповані в наступні категорії.

1.5.1 Некогерентні структури фотонних НВЧ фільтрів. Некогерентні фотонні НВЧ-фільтри зазвичай реалізується на основі КІХ (рисунок 1.8) або БІХ (рисунок 1.9) конфігурації лінії затримки. Формування багатовивідного фільтра можливо за рахунок створення тимчасових ліній затримок і наявності декількох несучих. Лінії тимчасових затримок між сусідніми відводами фільтра можуть реалізовуватися з використанням як простого оптичного волокна, фізична довжина якого збільшується з кожним наступним відведенням фільтра, так і різних оптичних хвилеводів, в яких час проходження випромінювання змінюється в залежності від довжини хвилі за рахунок ефекту хроматичної дисперсії.

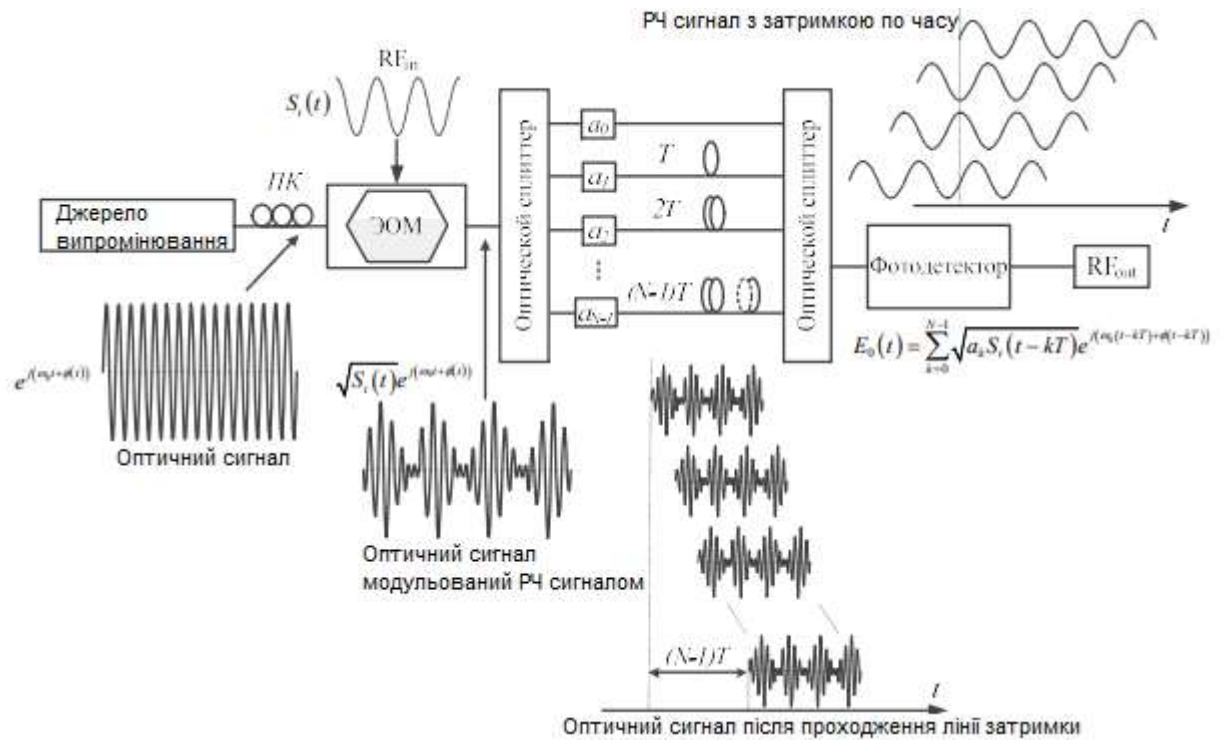


Рисунок 1.8 – Структура НВЧ фотонного КІХ-фільтра на прикладі виконання з блоком тимчасової затримки оптичного сигналу

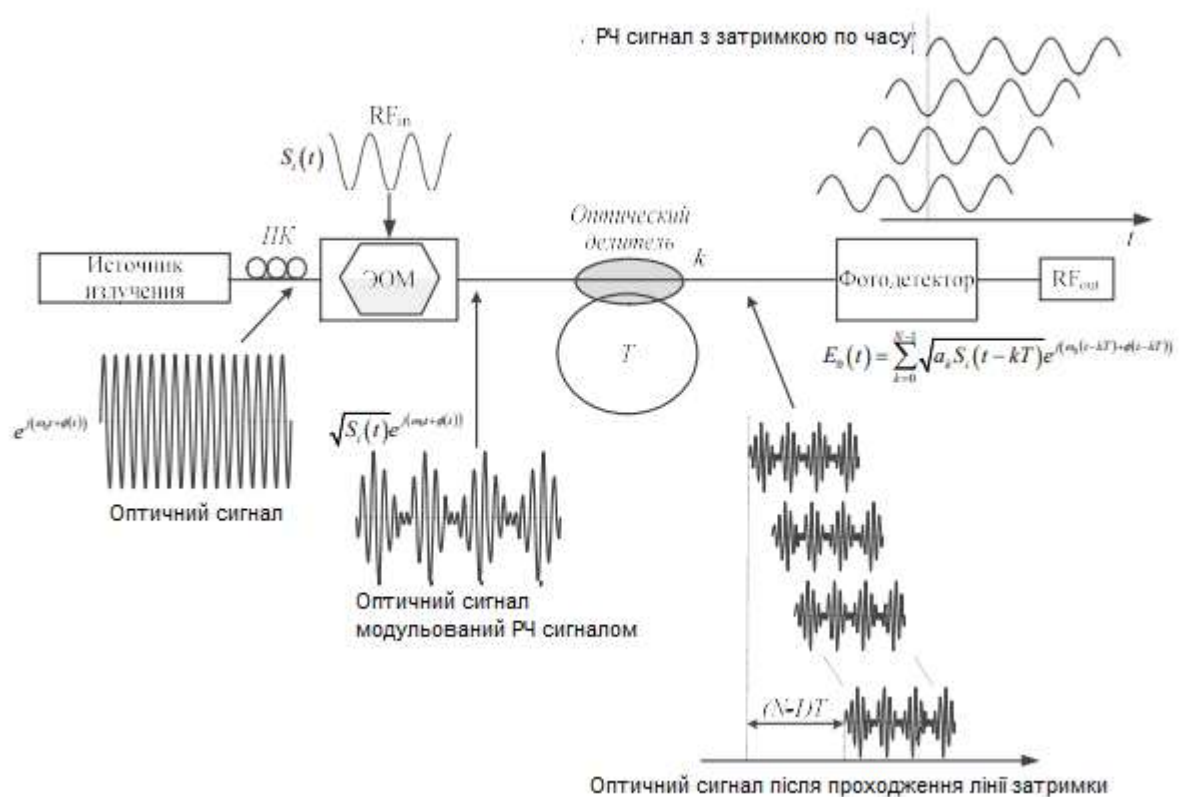


Рисунок 1.9 – Структура НВЧ фотонного БІХ-фільтра на прикладі виконання з блоком тимчасової затримки оптичного сигналу у вигляді оптичного подільника

Таким чином, джерелом випромінювання в некогерентних схемах НВЧ фотонних фільтрів може бути набір лазерів на різних довжинах хвиль або це може бути широкосмуговий джерело випромінювання з проріджуванням. Ключовим пристроєм в НВЧ фотонних фільтрах є модуль оптичної лінії затримки, який може складатися з масиву Бреггівських решіток, впорядкованої хвилеводної призми, чірпованої решітки Брегга або диспергуючого волокна. Для N -відвідної лінії затримки НВЧ фотонного КІХ-фільтра, вихідний НВЧ сигнал на фотодетектора може бути представлений в наступному вигляді:

$$y(t) = b_0 x(t) + b_1 x(t - T) + b_2 x(t - 2T) + \dots + b_{N-1} x(t - (N-1)T), \quad (1.1)$$

де b_0, b_1, b_2, b_{N-1} – вагові коефіцієнти фільтра, T – тимчасова затримка між сусідніми відводами фільтра. Застосувавши Фур'є перетворення до (1.1) отримуємо:

$$Y(j\omega) = b_0 X(j\omega) + b_1 e^{j\omega T} X(j\omega) + b_2 e^{j\omega 2T} X(j\omega) + \dots + b_{N-1} e^{j\omega (N-1)T} X(j\omega) \quad (1.2)$$

Передавальна функція фотонного фільтра виглядає наступним чином:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = b_0 + b_1 e^{j\omega T} + \dots + b_{N-1} e^{j\omega (N-1)T} \quad (1.3)$$

Структури некогерентних КІХ-фільтрів, засновані на перерахованих методах формування модуля оптичної затримки, наведені нижче.

Налаштування спектрального відгуку фільтра здійснюється шляхом зміни величини тимчасової затримки або шляхом зміни довжини хвилі між несучими. Одним з недоліків використання ВБР є той факт, що вони не перебудовуються. Тому вирішенням проблеми може стати використання перебудованого лазера. Використання чірпована Бреггівськими решітки також розглянуто нижче. Швидкість перестроювання таких лазерів може досягати мікро-секундного порога. Але, не дивлячись на швидкодію, деякі додатки вимагають більш високу швидкість настройки в нано-секундному

діапазоні. Цього можна досягти, використовуючи гребінчастий джерело випромінювання, швидкодія якого доходить до 40 нс.

Як згадувалося раніше, вагові коефіцієнти фотонного НВЧ фільтра з оптичними лініями затримки, що працює в некогерентному режимі, будуть приймати тільки позитивні значення [24]. Спираючись на теорію обробки сигналів, НВЧ фотонний фільтр з вищезгаданої конфігурацією буде працювати в якості фільтра нижніх частот. Для подолання цих обмежень були розроблені оптичні лінії затримки з можливістю реалізації негативних і комплексних вагових коефіцієнтів, що в свою чергу дозволило домогтися довільних форм фільтрації в некогерентному режимі.

1.5.2 Когерентні структури фотонних НВЧ фільтрів. Когерентний режим в НВЧ фотонних фільтрах може бути реалізований за допомогою джерела випромінювання використовує тільки одну довжину хвилі. З огляду на те, що в когерентних НВЧ фотонних фільтрах відсутні лінії затримки, оптична інтерференція негативно не позначатися на стабільності роботи фільтра.

Загальна структура побудови когерентного фільтра зображена на рисунку 1.10.

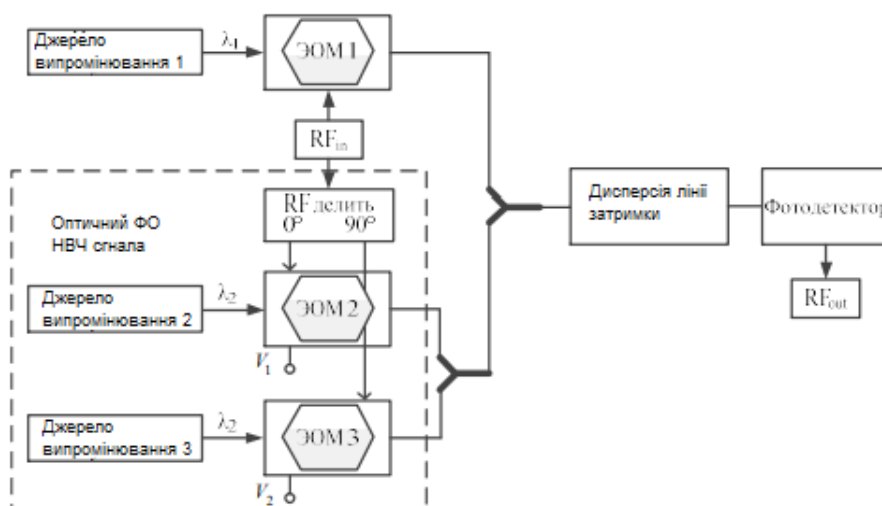


Рисунок 1.10 – Структура НВЧ фотонного фільтра для формування комплексних коефіцієнтів, заснована на оптичному фазо-обертаючому радіосигналу

Вузько смуговий сигнал лазера надходить на фазовий модулятор, на виході якого формується несуча і дві бічні складові. Слід зазначити, що бічні складові не збігаються по фазі. Таким чином, при безпосередньому детектуванні фазово-модульованого сигналу на фотодетектор неможливо отримати вихідний радіосигнал, за винятком постійної складової, тому що биття між оптичної несучої і нижньої бічної складової буде повністю компенсувати биття між оптичної несучої і верхньої бічної складової. Проте, якщо видалити одну з бічних складових, використовуючи ежекторний фільтр на проході, або застосувати подвійний смуговий фільтр в режимі відображення, наприклад ВБР або каскад ВБР, тоді при детектуванні ОБМ амплітудно-модульованого сигналу на фотодетектор сформується необхідний радіосигнал.

На рисунку 1.11 зображена схема когерентного фотонного НВЧ фільтра, в якому оптичний режекторний фільтр використовуються для видалення однієї з бічних складових фазово-модульованого сигналу, тим самим реалізуючи перехід з фазо модульованого сигналу в амплітудно-модульований з одного бічний смугою. Можна зробити висновок, що дана схема еквівалента НВЧ фільтру, смуга пропускання якого визначається смугою пропускання оптичного режекторного фільтра (на основі ВБР). Центральна частота визначається різницею частот між оптичної несучої і центральною частотою режекції. Таким чином, центральна частота смугового НВЧ фільтра налаштовується шляхом зміни центральної частоти режекторного фільтра або довжини хвилі джерела випромінювання. Спектральна характеристика фільтра в ході налаштування залишається незмінною. Це дає суттєву перевагу в порівнянні з некогерентними структурами фотонних фільтрів, в яких спектральна форма змінюється в ході налаштування фільтра, за винятком схем з комплексними коефіцієнтами, які розглядалися раніше.

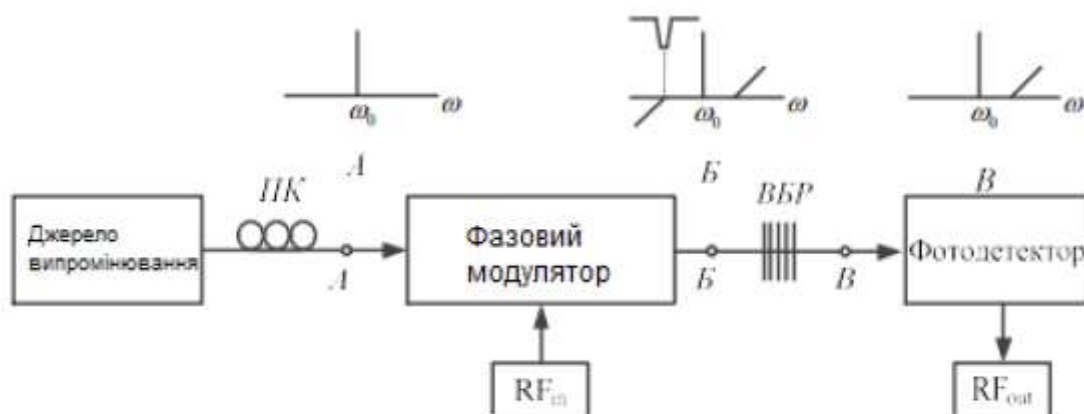


Рисунок 1.11 – Структура когерентного НВЧ фотонного фільтра, заснована на використанні АМ-ОЧП модуляції.

Можлива конфігурація розглянутої схеми із застосуванням двох ВБР, що працюють на відображення, одна з яких виділяє оптичну несучу, а інша пропускає одну з бічних складових. Недоліком такого методу є широка смуга пропускання, тому що використовується однорідна ВБР. Смуга пропускання НВЧ фотонного фільтра визначається пропускнуою здатністю ВБР для вибору бічної смуги. Використовуючи їх, кільцевого резонатора може зменшити ширину смуги, але вибірковість такого фільтра залишиться неприйнятною для багатьох додатків.

Висновок. В даному розділі було представлено базову інформацію, яка потрібна для дослідження ефективності методів гібридних систем зв'язку на основі дискретних фотонних оптоволоконних мікрохвильових фільтрів.

Ознайомились з НВЧ фотонними технологіями, а саме з їх особливостями, перевагами та недоліками. Також була представлена інформація щодо відомих способів проектування НВЧ фотонних фільтрів. В одному з підрозділів можна ознайомитись з класифікацією фотонних фільтрів, а конкретніше з некогерентними та когерентними структурами НВЧ фотонних фільтрів.

2 Розробка методу придушення періодичних спектральних смуг пропускання НВЧ фотонних фільтрів в гібридних системах зв'язку

2.1 Постановка мети розробки методу придушення періодичних спектральних смуг НВЧ фотонних фільтрів

Основною метою дослідження є розробка методу підвищення ефективності гібридних систем зв'язку. Важливе завдання в сучасних гібридних мережах виконує фільтрація, але підвищення обсягів і швидкостей передачі даних підвищує планку необхідної швидкодії систем. Розглянутий спосіб підвищення ефективності бездротових систем зв'язку, ґрунтувався на синтезі прогнозує фільтра в електронній області. Але в зв'язку з підвищенням вимог до швидкодії, рішення задачі фільтрації РЧ сигналів переносять в оптичну область, де проектується НВЧ фотонні фільтри. Метою реалізації фотонного НВЧ фільтра є підвищення спектральної ефективності гібридних систем зв'язку шляхом збільшення кількості частотних каналів. Оцінити отриманий виграв можна за допомогою показника спектральної ефективності системи зв'язку :

$$\gamma = \frac{R}{\Delta F} \quad (2.1)$$

де R – швидкість передачі даних, біт / с; ΔF – смуга частот каналу, Гц.

Показник спектральний ефективності характеризує кількість біт в секунду, які припадають на 1 Гц смуги частот каналу.

Крім підвищення спектральної ефективності системи зв'язку, актуальним є завдання придушення повторюваних спектральних складових фотонних НВЧ фільтрів внаслідок періодичності структури частотної характеристики фільтрів, пов'язаної з дискретною природою тимчасової обробки сигналів. Це властивість перешкоджає реалізації смуговий фільтрації з широкою спектральної смугою придушення, необхідної в багатьох важливих завданнях селекції сигналів, що в свою чергу обмежує можливість використання широкосмугових властивостей

фотоніки. Відношення між спектральною періодичністю (FSR) і шириною пропускання фільтра для даного числа відводів служить обмежувальним чинником застосовності даного підходу фільтрації. Тому розробка неперіодичної структури смугового НВЧ фотонного фільтра в заданому частотному діапазоні з низьким рівнем шумів є актуальною і важливою задачею.

Ще однією причиною актуальності реалізації поставленого завдання в оптичній області є той факт, що після процесу фотодетектування вже неможливо позбутися небажаних періодично повторюваних спектральних складових НВЧ сигналу.

Таким чином, досягнення поставленої мети дослідження у вигляді підвищення спектральної ефективності гібридної системи зв'язку, можливо за рахунок вирішення завдання розробки методу придушення періодичних спектральних смуг пропускання фотонного НВЧ фільтра в заданому частотному діапазоні

2.2 Розробка математичної моделі комбінованого фотонного НВЧ фільтра

В цілому, відомі структури фотонних фільтрів можна класифікувати за такими основними методами побудови: некогерентні багатовідвідні методи, засновані на реалізації кінцевої імпульсної характеристики (КІХ-фільтри), і когерентні методи проектування фотонних фільтрів з використанням оптичних фільтрів з подальшим перенесенням їх передавальної функції в НВЧ діапазон

Багатовивідні КІХ-фільтри легко переналаштовуються і реконфігуровані, позбавлені частотної нестабільності, нечутливі до змін навколишнього середовища внаслідок некогерентного структури, що в сукупності призвело до позитивних результатів при їх інтеграції в оптичні системи.

КІХ фільтри за своєю природою є фільтрами з періодичної АЧХ, що в свою чергу буде обмежувати смугу пропускання фільтра для вирішення цього

завдання пропонується використовувати комбінацію некогерентного КІХ-фільтра і когерентного Лайот фільтра. Це дозволить домогтися стабільності і продуктивності КІХ-фільтрів без обмежень, викликаних їх періодичною природою.

Підхід, який застосовується в даному дослідженні, полягає в комбінуванні некогерентного КІХ-фільтра з когерентним оптичним фільтром для формування каскадного спектрального відгуку всієї системи. За умови точного налаштування відгуків обох фільтрів буде досягнутий очікуваний ефект придушення небажаних спектральних повторень, тобто відбудеться придушення гармонік. Проріджування спектра досягається за рахунок різного спектрального відстані між гармоніками, і тому отримане значення FSR буде більше початкового значення завдяки ефекту верньєри. Метод, розроблений в даному дослідженні, заснований на ефекті верньєри, суть якого представлена на рисунок 2.1.

Зокрема, для реалізації даного методу був обраний когерентний оптичний Лайот фільтр через простоти реалізації, можливості реконфігурації і надійності, яка пояснюється тим, що всі оптичні сигнали будуть проходити по одному фізичному каналу передачі.

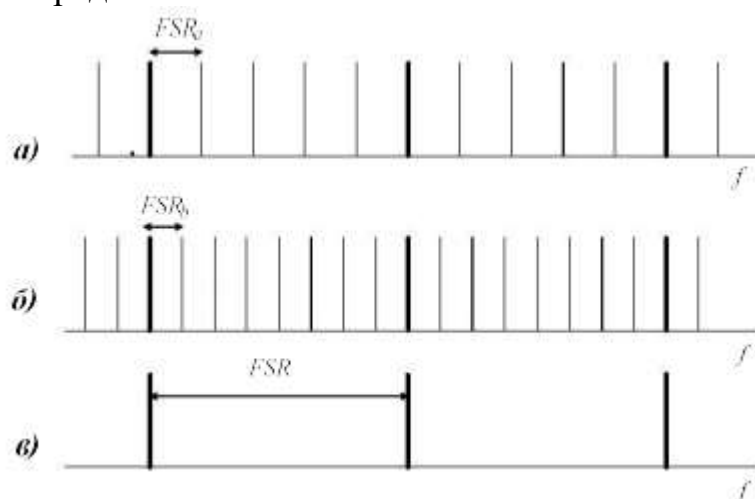


Рисунок 2.1 Принцип ефекту верньєри: а) частотний відгук першого фільтра; б) частотний відгук другого фільтра; в) результуючий частотний відгук фільтра,

заснований на ефекті верньєр

Багатовивідний КІХ-фільтр заснований на використанні властивостей фотоніки для затримки, оцінки та комбінування набору повторень НВЧ сигналу. Як правило, затримка вноситься дисперсною середовищем поширення для використання властивостей паралелізму фотоніки. Для реалізації методу був обраний оптичний Лайот фільтр зважаючи на простоту реалізації, можливості перебудови частоти і стійкості, яка забезпечується поширенням всіх оптичних сигналів в загальній фізичній середовищі. Структура Лайот фільтра складають сукупності двопроменевого переломлюючого середовища з вбудованими поляризаторами. Двопроменева переломлююча вісь кожного з сегментів орієнтована на 45 градусів по відношенню до напрямку осі поляризатора.

Метою роботи є використання КІХ фільтра для отримання необхідної пропускну здатності і форми обвідної, і використання більшої періодичності Лайот фільтра для придушення небажаних гармонік.

Передавальна функція КІХ-фільтра для НВЧ діапазону виглядає наступним чином :

$$|H_{incoherent}(f)| = \left| \sum_{k=1}^N P_k e^{-j[2\pi f(k-1)\Delta\tau]} \right| \quad (2.2)$$

де P_k – імпульсна характеристика фільтра, N – кількість відводів(в нашому випадку оптичних несучих), $\Delta\tau$ – тимчасова затримка між оптичними несучими, яка визначається за такою формулою:

$$\Delta\tau = D \cdot L \cdot \Delta\lambda \quad (2.3)$$

де D – показник хроматичної дисперсії середовища поширення, L – довжина дисперсійного середовища і $\Delta\lambda$ – відстань між оптичними несучими.

Передавальна функція Лайот фільтра виглядає наступним чином :

$$|H_{\text{coherent}}(f)| = \left| \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot DGD \cdot f}{n} \right) \right| \quad (2.4)$$

де DGD -це величина диференціальної групової затримки і n - порядок Лайот фільтра.

Значення FSR обох фільтрів повинні відповідати наступній вимозі:

$$FSR_{\text{coherent}} = m \cdot FSR_{\text{incoherent}} \quad (2.5)$$

Величина FSR для некогерентного KIX-фільтра визначається наступним виразом:

$$FSR_{\text{incoherent}} = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (2.6)$$

де $\Delta\tau$ - тимчасова затримка між оптичними несучими.

Величина FSR для когерентного фільтра в загальному вигляді оп ределяється такий вираз:

$$FSR_{\text{coherent}} = \frac{2^{m-1}}{DGD} \quad (2.7)$$

Величина DGD кожного наступного елемента затримки в Лайот фільтрі зі збільшенням порядку буде зменшуватися в 2 рази, тим самим регулюючи величину FSR, а також ширину смуги пропускання.

2.3 Розробка структурної схеми комбінованого фотонного НВЧ фільтра

Структурна схема запропонованої системи представлена на рисунку 2.2 Пунктирною лінією на малюнку виділено розроблений комбінований фотонний фільтр, що складається з некогерентного KIX-фільтра і когерентного Лайот фільтра. Для придушення небажаних гармонік когерентний Лайот фільтр підключається послідовно до некогерентного KIX-фільтра

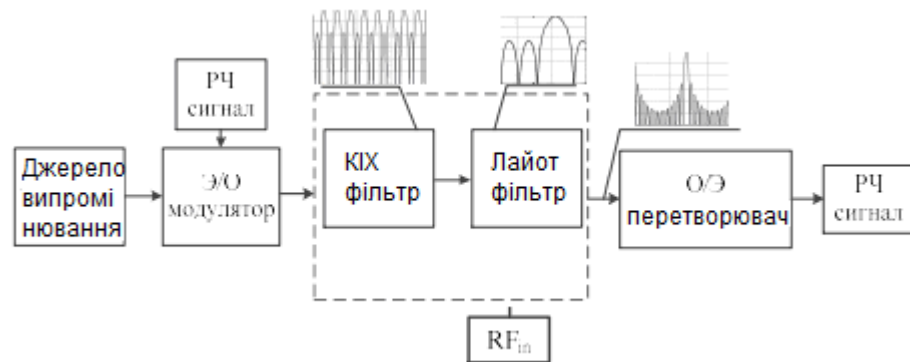


Рисунок 2.2 - Структурна схема системи з використанням комбінованого фотонного фільтра

Детальна структурна схема розробленого фільтра наведена на рисунок 2.3. Умовно її можна розділити на дві частини: перша частина - це некогерентний НВЧ фотонний КІХ-фільтр, реалізований на опто-волоконній лінії затримки, друга частина - це когерентний оптичний Лайот фільтр. Лайот фільтр на структурній схемі виділено пунктирною лінією і складається з набору пристроїв DGD. Можливе застосування пристроїв затримки з вбудованими поляризаторами, або використовувати окремі поляризатори, як це показано на структурній схемі.

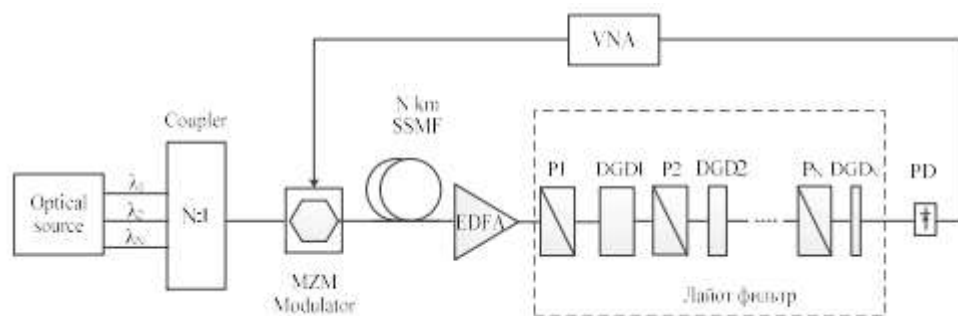


Рисунок 2.3 – Структурна схема розробленого комбінованого фотонного НВЧ фільтра

У ролі оптичного випромінювача (Optical Source) може виступати DFB чи іншої некогерентний джерело випромінювання. Змішувач (Coupler) використовується в схемі для хвильового ущільнення оптичних несучих. РЧ

сигнал надходить на електро-оптичний модулятор Маха-Цендера (MZM Modulator) з ВЧ генератора, який вбудований в векторний аналізатор ланцюгів (VNA). Для компенсації оптичних втрат в схему доданий EDFA-підсилювач. Поляризатори (P1, P2 ... PN) необхідні для орієнтації поляризаційної осі на 45 градусів. Пристрої затримки (DGD1, DGD2 ... DGDN) є компонентами Лайот фільтра і кількісно визначають порядок фільтра. У ролі оптоелектронного перетворювача може виступати фотодіод (PD). Детектувати сигнал надходить на векторний аналізатор ланцюгів, де відбувається його подальший аналіз.

Висновок. В даному розділі було розроблено метод придушення періодичних спектральних смуг пропускання фотонного некогерентного багатовивідного КІХ-фільтра, заснований на ефекті верньєри, що відрізняється послідовним включенням когерентного оптичного фільтра, що дозволяє перебудовувати частотну характеристику всередині робочого діапазону частот пропускання на виході фотонного НВЧ фільтра. Також розроблено структуру реконфігурованого комбінованого НВЧ фільтра, яка заснована на фотонній технології, що відрізняється використанням когерентного оптичного Лайот фільтра спільно з некогерентним багатовивідним фотонним КІХ-фільтром.

3 Моделювання

3.1 Моделювання некогерентного фотонного НВЧ КІХ- фільтра.

Згідно з отриманою передавальної функції некогерентного НВЧ фотонного КІХ-фільтра (2.2) було проведено моделювання в середовищі Matlab.

В якості вхідних параметрів для моделювання некогерентного КІХ-фільтра були обрані відносна потужність джерел оптичного випромінювання, їх кількість, відстань між оптичними несучими, довжина оптичного волокна і величина дисперсії. Необхідною умовою отримання бажаного відгуку фотонного НВЧ КІХ-фільтра є однакова потужність всіх джерел випромінювання. На рисунку 2.2 зображений спектральний відгук 4-х відвідного фотонного НВЧ КІХ-фільтра, в якому потужності оптичних випромінювачів були обрані з коефіцієнтами [1 0.5 0.5 1], тобто 2-ий і 3-ий випромінювачі були на 50% слабше.

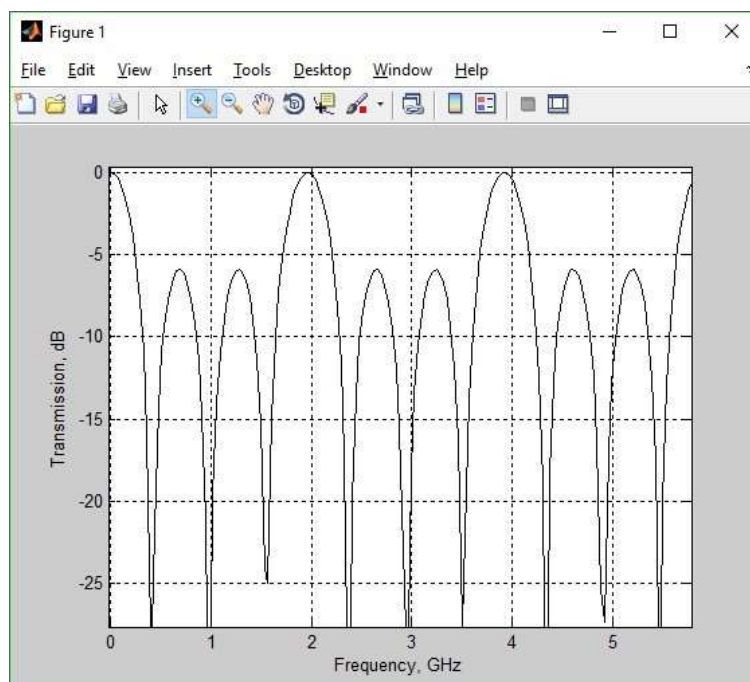


Рисунок 3.1 – Моделювання спектрального відгуку фотонного КІХ-фільтра

На рисунку 3.2 представлений спектральний відгук того ж фотонного НВЧ фільтра, але потужності оптичних випромінювачів були обрані однаковими [1 1 1 1].

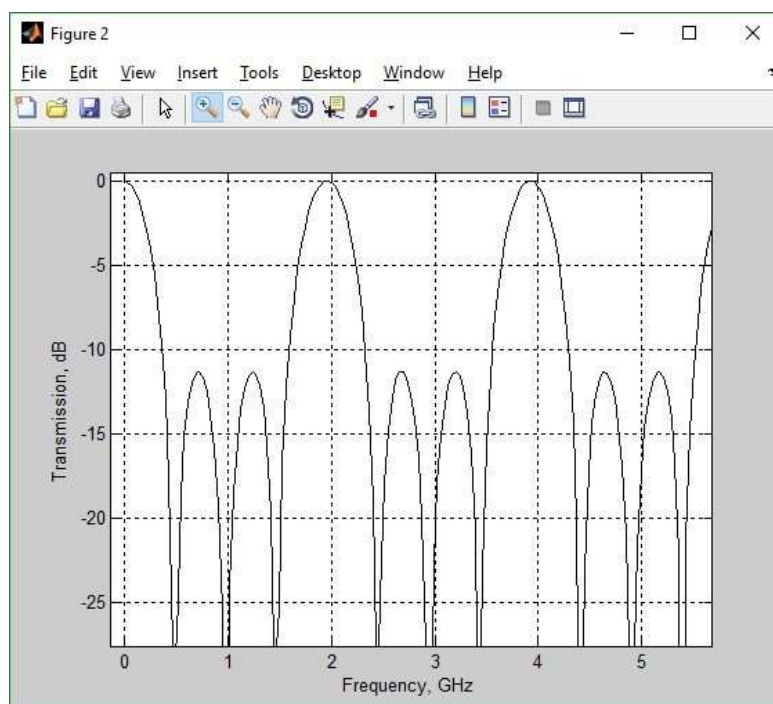
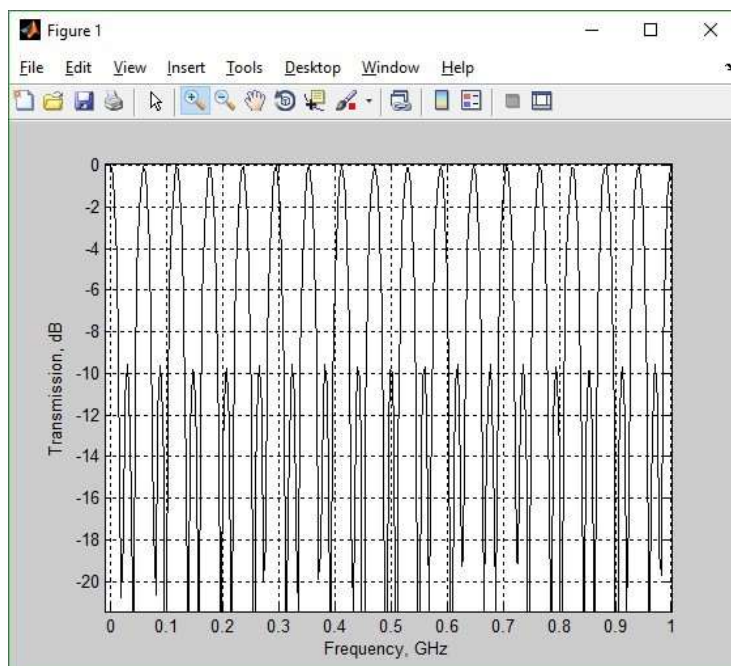


Рисунок 3.2 – Моделювання спектрального відгуку фотонного КІХ-фільтра

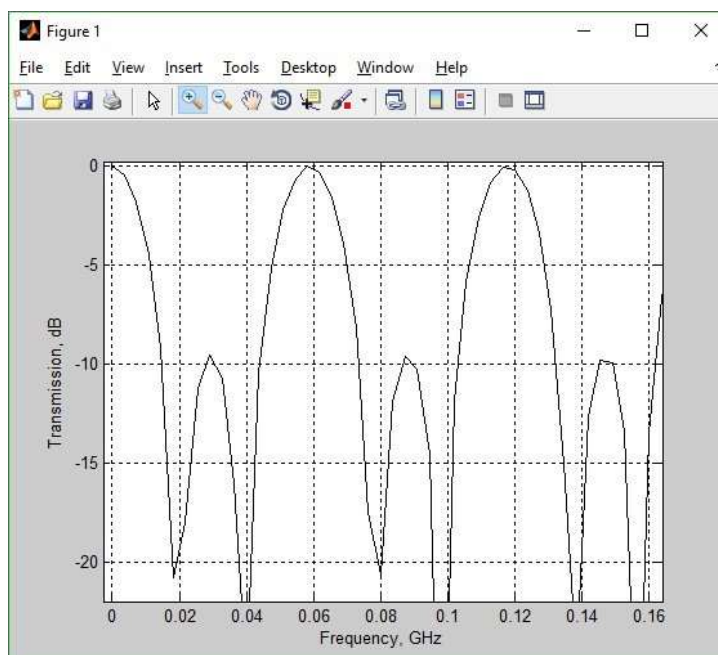
Як видно з цих малюнків, рівень бічних гармонік у випадку з однаковими потужностями оптичних джерел випромінювання на 6 дБ нижче, ніж в випадку з коефіцієнтами $[1 \ 0.5 \ 0.5 \ 1]$.

Таким чином, рівень придушення бічних гармонік НЕ буде максимальним, якщо не буде виконуватися умова рівності потужностей джерел оптичного випромінювання. Дана умова є важливим аспектом вирішення поставленого завдання.

Моделювання дозволяє домогтися дуже вузької смуги пропускання КІХ-фільтра. На малюнку 3.3 зображений спектральний відгук фільтра 3-го порядку, тобто задіяні 3 джерела оптичного випромінювання. Ширина смуги пропускання фільтра становить 18 МГц, а значення FSR 58,2 МГц



а)



б)

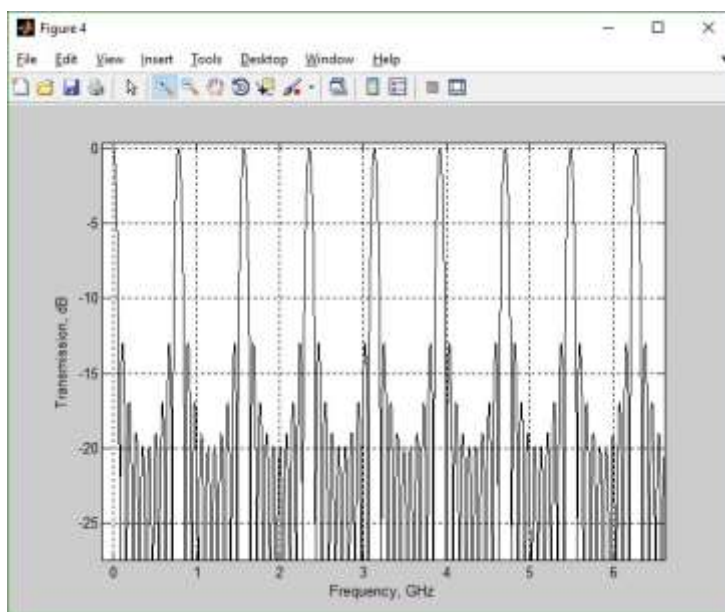
Рисунок 3.3 – Моделювання спектрального відгуку фотонного КІХ-фільтра:

а) зображення на інтервалі до 1 ГГц,

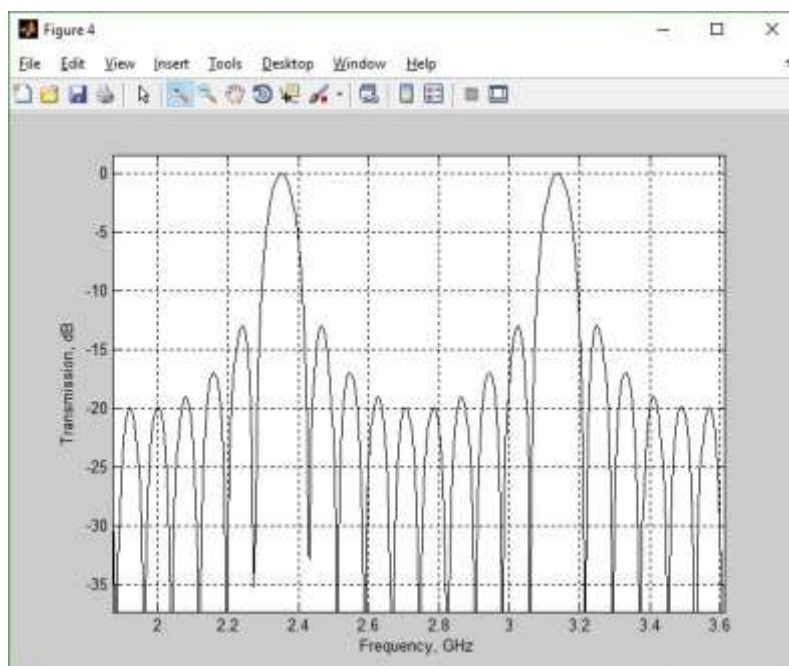
б) збільшене зображення двох періодів фільтра

Дані показники були отримані при наступних умови: кількість джерел оптичного випромінювання - 3, $\Delta\lambda$ - 10 нм, довжина оптичного волокна- 100 км, і величина дисперсії 17.

На рисунку 3.4 зображений спектральний відгук КІХ-фільтра 10-го порядку. Ширина смуги пропускання фільтра становить 70 МГц, а значення FSR становить 780 МГц.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Моделювання спектрального відгуку фотонного КІХ-фільтра:

- а) зображення на інтервалі до 7 ГГц,
- б) збільшене зображення періоду фільтра

Дані показники були отримані при наступних умови: кількість джерел оптичного випромінювання - 10, $\Delta\lambda$ - 2.5 нм, довжина оптичного волокна- 30 км, і величина дисперсії 17.

Результати моделювання показали, що ширина смуги пропускання фотонного НВЧ КІХ-фільтра, а також величина FSR залежать від кількості джерел випромінювання, відстані між оптичними несучими і довжиною оптичного волокна, на якому реалізований проектований фільтр.

Зі збільшенням кількості оптичних джерел випромінювання, тобто з підвищенням кількості відводів фільтра, спостерігається зміна ширини смуги пропускання головною гармоніки в бік звуження, але спектральна періодичність зберігає колишнє значення. На величину FSR впливають такі параметри, як відстань між оптичними несучими, довжина оптичного середовища поширення і величина її дисперсії. Так як величина дисперсії є незмінною для обраного типу оптичного волокна, то регульованими параметрами є довжина середовища поширення і рознос довжин хвиль оптичних несучих. При одночасному збільшенні цих параметрів спостерігається збільшенням спектральної періодичності відгуку фільтра і звуження смуги пропускання головною гармоніки.

3.2 Моделювання когерентного оптичного Лайот фільтра

Лайот фільтр являє собою оптичний фільтр, заснований на властивості поляризації світла. Лайот фільтр, як правило, складається з двопрорежено переломлюючих пластин, товщина кожної наступної з яких в два рази менше попередньої і поляризаторів світла. Поляризаційна вісь кожної з двопрорежено переломлюючих пластин орієнтована під кутом в 45 градусів по відношенню до осі поляризатора. Світло, що поширюється в кристалі, можна представити у вигляді двох компонент, що мають різні фазові затримки.

Напруженість електричного поля, що поширюється в горизонтальній області в x -напрямку з кутовою частотою ω і значенням хвильового вектора $k = |\vec{k}|$, також залежить від часу t і виражається наступним чином:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx) \quad (3.1)$$

Напруженість поля в перпендикулярній площині поширення можна представити таким виразом:

$$\vec{E} = E_0 \cos(\alpha) \vec{e}_z + E_0 \sin(\alpha) \vec{e}_y = E_{0z} \vec{e}_z + E_{0y} \vec{e}_y \quad (3.2)$$

де $\vec{e}_z$ і $\vec{e}_y$ - одиничний базисний вектор, α - кут між площиною поляризації світла і оптичної віссю. На рисунку 3.5 схематично зображено положення векторів випромінювання до і після проходження двопророново переломлюючих середовища, де відбувається диференціальна групова затримка [140]. Тому для отримання аналогічного ефекту, двопророново переломлюючих пластини були замінені пристроями DGD (пристрій груповий диференціальної затримки), які надають ідентичний ефект на що проходить випромінювання, і є більш універсальним. Порядок Лайот фільтра, в даному випадку, визначається кількістю використаних пристроїв DGD. Це означає, що при необхідності реконфігурації Лайот фільтра для отримання інших значень FSR досить підключити в схему додатковий пристрій, або ж змінити величину DGD у випадку з електронним пристроєм.

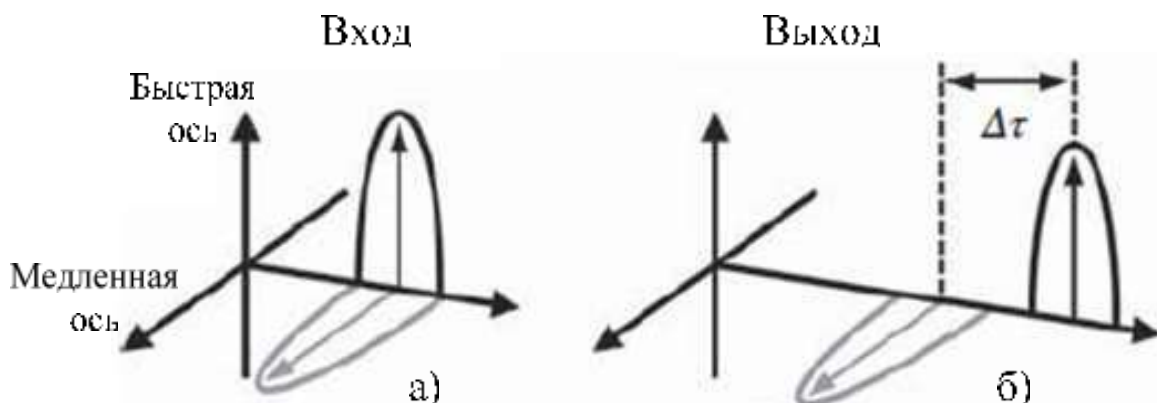
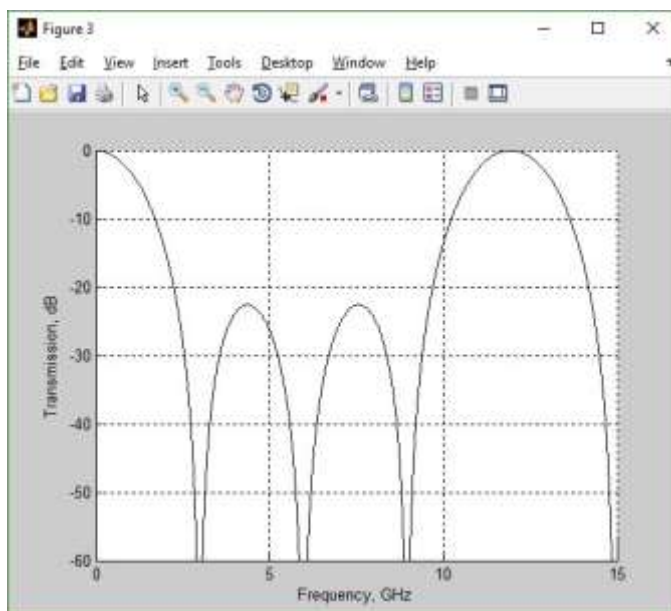
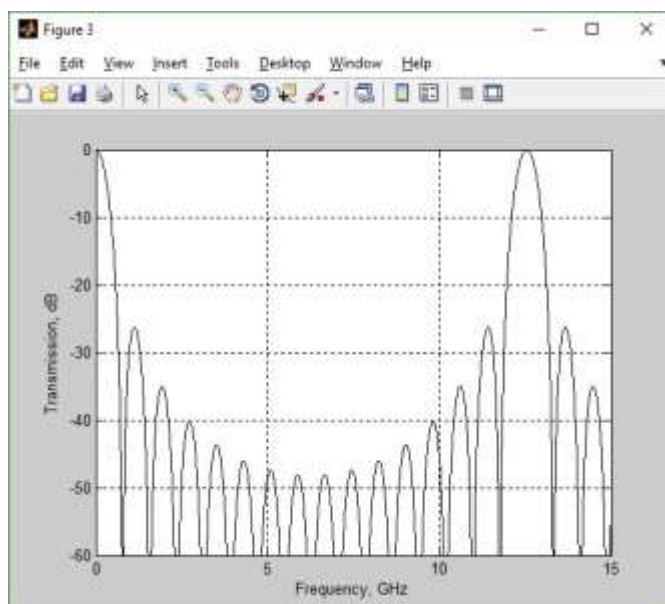


Рисунок 3.6 - Положення векторів випромінювання з тимчасовою затримкою поширення: а) на вході, б) на виході

Передатна характеристика (2.3) використовувалася для створення імітаційної моделі в середовищі Matlab і отримання спектрального відгуку оптичного Лайот фільтра в НВЧ області. Вхідними параметрами для імітаційного моделювання були обрані величина пристрої DGD і порядок фільтра (кількість пристроїв затримки). На рисунку 3.7 зображений спектральний відгук Лайот фільтра 2-го (а) і 4-го (б) порядку. Ширина полоси пропускання фільтра 2-го порядку становить 1,95 ГГц, а значення FSR становить 11,94 ГГц; фільтра 4-го порядку становить 500 МГц, а значення FSR складає 12,549 ГГц.



а)

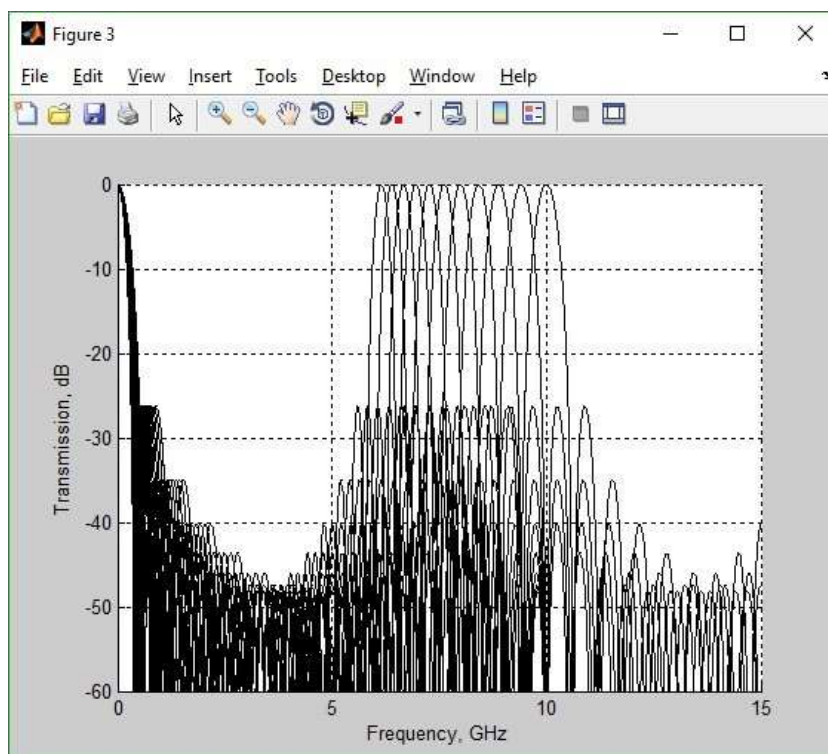


б)

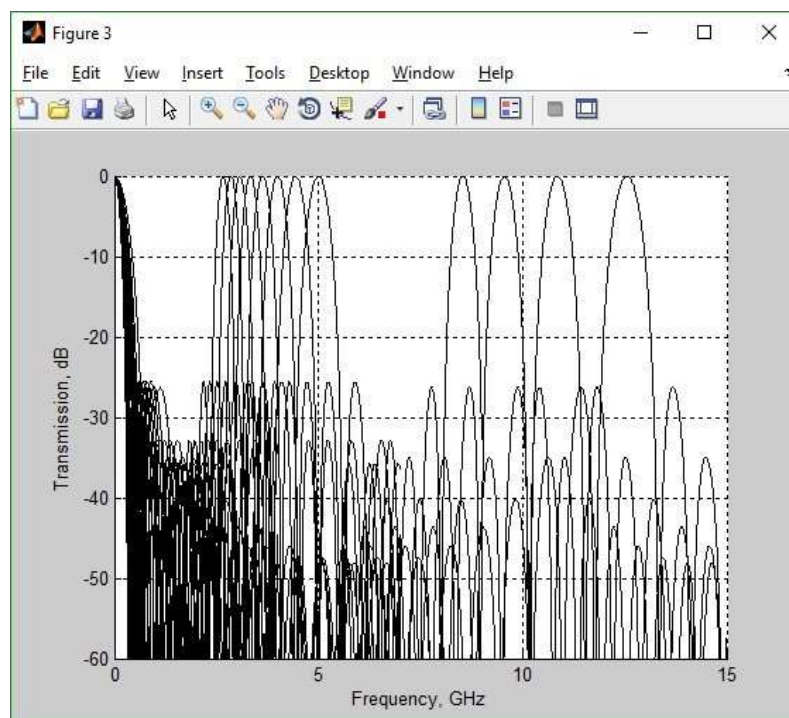
Рисунок 3.7 – Спектральний відгук Лайот фільтра: а) 2-го порядку; б) 4-го порядку

Дані показники були отримані при наступних умовах: а) величина першого пристрою DGD - 637,5 пс; б) величина першого пристрою DGD - 167,5 пс.

Отриманий результат симуляції демонструє єдину смугу пропускання на заданому частотному діапазоні. Тим самим, в заданій смузі можна домогтися ефекту смуговий фільтрації. За потреби реконфігурації отриманого відгуку, необхідно змінити порядок Лайот фільтра або величину пристроїв DGD. На малюнку 3.8 показані різні варіанти перебудови частотного відгуку Лайот фільтра.



a)



б)

Рисунок 3.8 – Демонстрація можливості реконфігурації Лайот фільтра а) в діапазоні 5-10 ГГц
б) в діапазоні до 5 ГГц і в області 10 Г

3.3 Моделювання комбінованого фотонного НВЧ фільтра

На основі отриманої математичної моделі і розробленої структурної схеми комбінованого фотонного фільтра було проведено моделювання в середовищі Matlab.

Кінцевий частотний відгук розробленого фільтра має наступний вигляд:

$$|H(f)| = |H_{incoherent}(f)| \cdot |H_{coherent}(f)| \quad (3.3)$$

де $H_{incoherent}(f)$ – відгук КІХ-фільтри

$H_{coherent}(f)$ – відгук Лайот фільтра..

Отриманий вираз було використано для побудови частотного відгуку комбінованого фотонного фільтра в НВЧ діапазоні.

Отримані результати моделювання представлені нижче. Основною умовою отримання необхідної спектральної характеристики проектованого фільтру є умова (2.4). На малюнку 3.9 зображений спектральний відгук комбінованого фотонного фільтра, отриманий в результаті послідовного з'єднання некогерентного фотонного НВЧ КІХ-фільтра і Лайот фільтра 4-го порядку, які були розглянуті в попередніх розділах.

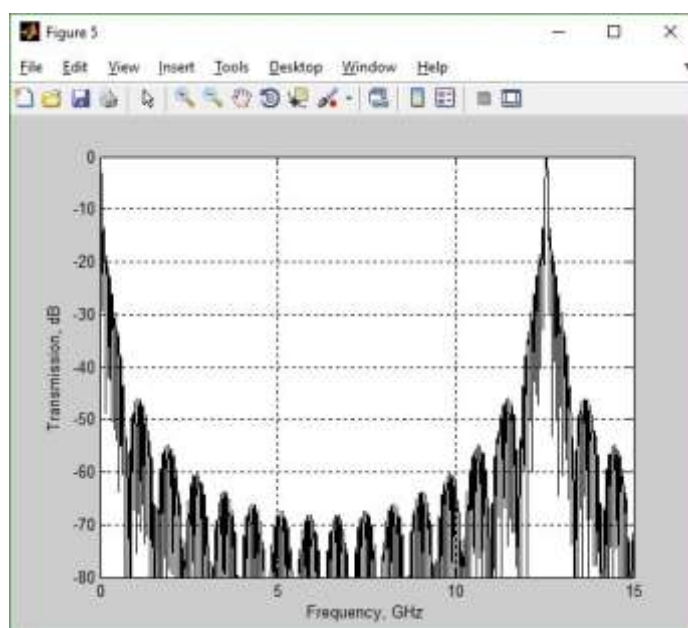


Рисунок 3.9 – Спектральний відгук комбінованого фотонного фільтра

Ширина смуги пропускання фільтра становить 80 МГц, а значення FSR складе 12,549 ГГц. Отриманий результат демонструє єдину смугу пропускання в заданому частотному діапазоні. Ширина пропускання головною гармоніки зменшилася в порівнянні з шириною головної гармоніки Лайот фільтра 4-го порядку, що демонструє підвищення добротності комбінованого фільтра. Добротність фільтру розраховується відповідно до наступного виразу:

$$Q = \frac{FSR}{\Delta\Omega} \quad (3.4)$$

де $\Delta\Omega$ – ширина смуги пропускання головною гармоніки фільтра за рівнем -3 дБ.

Висновок. В даному розділі було проведено моделювання некогерентного фотонного НВЧ КІХ-фільтра, де видно, що ширина смуги пропускання фотонного НВЧ КІХ-фільтра, а також величина FSR залежать від кількості джерел випромінювання, відстані між оптичними несучими і довжиною оптичного волокна, на якому реалізований проектований фільтр. В наступному підрозділі проводилось моделювання когерентного оптичного Лайот фільтра, де отриманий результат симуляції демонструє єдину смугу пропускання на заданому частотному діапазоні. Тим самим, в заданій смузі можна домогтися ефекту смуговий фільтрації. За потреби реконфігурації отриманого відгуку, необхідно змінити порядок Лайот фільтра або величину пристроїв DGD. Та проведено моделювання комбінованого фотонного НВЧ фільтра

Результати моделювання в середовищі Matlab показують, що за допомогою фотонного НВЧ КІХ-фільтра можливо отримати вузьку смугу пропускання головної гармоніки, але недоліком, в той же час, є висока спектральна періодичність, яка не дозволяє в повній мірі використовувати весь частотний діапазон каналу. Для посилення ролі FSR фільтра добре підходить розглянутий когерентний оптичний Лайот фільтр, відгук якого в НВЧ діапазоні має набагато

більше значення FSR в порівнянні з некогерентним КІХ-фільтром. Недолік широкої смуги пропускання головною гармоніки Лайот фільтра компенсується за рахунок некогерентного КІХфільтра.

Висновок

По результатам проведеного дослідження можна стверджувати, що поставлена мета досягнута, адже розроблено метод придушення періодичних спектральних смуг пропускання фотонного некогерентного багато вивідного КІХ-фільтра в гібридних системах зв'язку заснований на ефекті Верньєри, що відрізняється послідовним включенням когерентного оптичного фільтра з некогерентним фільтром, що дозволяє перебудовувати ЧХ всередині робочого діапазону частот пропускання на виході фотонного НВЧ фільтра, що дозволив збільшити спектральну ефективність каналу зв'язку в 6-8 разів. Саме цей метод придушення періодичних спектральних смуг пропускання дозволяє збільшити робочий діапазон фотонних мікрохвильових фільтрів для повноцінного використання широкосмугової природи фотонних технологій,

Розроблено структуру реконфігурованих комбінованого НВЧ фільтра, заснована на фотонів технології, що відрізняється використанням когерентного оптичного Лайот фільтра другого порядку спільно з некогерентним багато вивідним фотонним КІХ-фільтром, що дозволила підвищити стійкість перед перешкодами на 5 дБ за рахунок підвищення добротності розробленого фотонного фільтра. Щодо розробленого комбінованого фотонного фільтра, то він здатний конкурувати з класичними фільтрами, заснованими на НВЧ технологіях.

Також проведено декілька моделювань різних типів НВЧ фільтра, з отриманих даних моделювання, видно придушення небажаних гармонік, а також вузьку смугу пропускання смугового фільтра в заданому частотному діапазоні. . Результати моделювання також показують, що комбінований спектральний відгук двох фільтрів є вузько смуговим і переналаштувальним. Розрахована величина добротності Лайот фільтра 4-го порядку згідно (3.4) становить 25,1, а величина добротності некогерентного КІХ-фільтра, який був використаний в складі комбінованого фільтра, дорівнює 11,1. Величина добротності розробленого комбінованого фільтра дорівнює 156,9. Таким чином, величина добротності збільшилася в 6,25 рази по відношенню до Лайот фільтра 4-го порядку

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Скрипник Ю. О., Манойлов В. П., Яненко О. П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 374 с.
2. Capmany, J. Microwave photonics combines two worlds. / J. Capmany, D. Novak. // *Nature Photonics*. – 2007. – vol.1, no.6. – pp. 319-330.
3. Кравченко О. С. Оптоволоконні технології в інформаційно-комунікаційних мережах. – Одеса: ОНАС, 2012. – 512 с.
4. Martí, J. Microwave photonics and radio-over-fiber research. / J. Martí, J. Capmany. // *IEEE Microwave Magazine*. – 2009. – vol.10, no.4. – pp. 96-105.
5. Berceli, T. Microwave photonics—a historical perspective. / T. Berceli, P.R. Herczfeld. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2010. – vol.58, no.11. – pp. 2992-3000.
6. Vidal, B. Photonic Technologies for Millimeter-and Submillimeter-wave Signals. / B. Vidal, T. Nagatsuma, N.J. Gomes, T.E. Darcie. // *Advances in Optical Technology*. – 2012. – vol.2012. – pp. 925065-18.
7. Токарев В. Н. Основы цифрового зв'язку. – Харків: Університет радіоелектроніки, 2005. – 254 с.
8. Moslehi, B. Fiber-optic lattice signal processing. / B. Moslehi, J. Goodman, M. Tur, H.J. Shaw. // *Proc. IEEE*. – 1984. – vol.72. – pp. 909-930.
9. Wilner, K. Fiber-optic delay lines for microwave signal processing. / K. Wilner, A.P. Van Den Heuvel. // *Proc. IEEE*. – 1976. – vol.64. – pp. 805-807.
10. Chang, C. Fiber optic delay line devices for RF signal processing. / C. Chang, J. A. Cassaboom, H. F. Taylor. // *Electron. Lett.* – 1977. – vol.13. – pp. 678-680.
11. Taylor, H.F. Fiber and integrated optical devices for signal processing. / H.F. Taylor. // *SPIE*. – 1979. – vol.176. – pp. 17-27
12. Jackson, K.P. Fiber-optic delay-line signal processors. / K.P. Jackson, H.J. Shaw. // *Optical Signal Processing*. – 1987. – ch.7. – p. 462. 132
13. Jackson, K. Optical fiber delay-line signal processing. / K. Jackson, S. Newton, B. Moslehi, M. Tur, C. Cutler, J. Goodman, H.J. Shaw. // *IEEE Trans.*

Microwave Theory Tech. – 1985. – vol.33, № 3. – pp. 193-210.

14. Davies, D.E.N. Fiber and integrated optical devices for signal processing. / D.E.N. Davies, G.W. James. // Electron. Lett. – 1984. – vol.20. – pp. 95-96

15. Cox, C.H. Analog Optical Links. / C.H. Cox. // Ed. Cambridge University Press. – 2004. – 304 p.

16. Nguyen H. Optical Fiber-Based Microwave Photonic Filters // Optics Letters, 2020 - vol.27, № 3.- pp. - 95-96.

17. Park Y., Jung S. Discrete-Time Microwave Photonic Filters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011 - vol.14, № 5.- pp. - 81-86.

18. Novak, D. Optically fed millimeter-wave wireless communications. / D. Novak, G.H. Smith, C. Lim, H.F. Liu, R.B. Waterhouse. // OFC Proceedings. – 1998. – TuC1. pp. 14.

19. Torres, R.C. Hybrid fiber radio networks: new concepts and technologies. / R.C. Torres // PFC. – 2010. – Polytechnic university of Catalunya. – Spain.\

20. Савчук С. Г. Інформаційно-комунікаційні технології та мережі зв'язку: підручник. – Київ: КПІ, 2017. – 360 с.

21. Zmuda, H. Photonic Aspects of Modern Radar. / H. Zmuda, E.N. Toughlian. // Ed. Artech House. – 1994. – 537 p. 133

22. Binh, L.N. Photonic signal processing: techniques and applications. / L.N. Binh. // CRC Press. – 2007. – 376 p.

23. Tedjini, S. All-optical networks as microwave and millimetre-wave circuits. / S. Tedjini, A. Ho-Quoc, D.M. Khalil. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1995. – vol.43, no.9. – pp. 2428-2434.

24. Minasian, R.A. Photonic Signal Processing of Microwave Signals. / R.A. Minasian. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – vol. 54, no.2. – pp. 832-846.

25. Capmany, J. Microwave Photonic Signal Processing. / J. Capmany, J. Mora, I. Gasulla, J. Sancho, J. Lloret, S. Sales. // Journal of Lightwave Technology. – 2013. – vol.31, no.4. – pp. 571-586.

26. Capmany, J. Discrete-time optical processing of microwave signals. / J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor, S. Sales // *Lightwave Technol.* – 2005. – vol. 23, no. 2. – pp. 702-723.

27. Coppinger, F. Photonic time stretch and its application to analog-to-digital conversion. / F. Coppinger, A. Bushan, B. Jalali. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 1999. – vol. 47, no. 7. – pp. 1309-1314.

28. Juodawlkis, P. Optically sampled analog-to-digital converters. / P. Juodawlkis, J. Twitchell, G. Betts, J. Hargreaves, R. Younger, J. Wasserman, F. O'Donnell, K. Ray, R. C. Williamson. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2001. – vol. 49, no. 10. – pp. 1840-1853

29. Han, Y. Photonic time-stretched analog-to-digital converter: Fundamental concepts and practical considerations. / Y. Han, B. Jalali. // *J. Lightw. Technol.* – 2003. – vol. 21, no.12. – pp. 3085-3103.

30. Roussel, H. Optical frequency conversion using a linearized LiNbO₃ modulator. / H. Roussel, R. Helkey. // *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* – 1998. – vol. 8, no. 11. – pp. 408-410.

31. Hunter, D. Programmable high-speed optical code recognition using fiber Bragg grating arrays. / D. Hunter, R. Minasian. // *Electron. Lett.* – 1999. – vol. 35, no.5. – pp. 412-414. 134

32. Chou, J. Adaptive RF-photonic arbitrary waveform generator. / J. Chou, Y. Han, B. Jalali. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2003. – vol. 15, no. 4. – pp. 581-583.

33. Taylor, H.F. An optical analog-to-digital converter-design and analysis. / H.F. Taylor. // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1979. – vol. 15, no. 4. – pp. 210-216.

34. Valley, G.C. Photonic analog-to-digital converters. / G.C.Valley. // *Opt. Express.* – 2007. – vol. 15, no. 5. – pp. 1955-1982.

35. Vidal, B. Fast Optical Beamforming Architectures for Satellite-Based Applications. / B. Vidal, T. Mengual, J.Marti. // *Advances in Optical Technologies*. – 2012. – vol. 2012, no. 6. – pp. 1-5
36. Iezekiel, S. Microwave Photonics. Devices and Applications. / S. Iezekiel. // Ed. Wiley. – 2009. – 360 p.
37. Minasian, R.A. Photonics-based interference mitigation filters. / R.A. Minasian, K.E. Alameh, E.H.W. Chan. // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 2001. – vol. 49. – pp. 1894-1899.
38. Kitayama, K.I. Architectural considerations of fiber-radio millimeter-wave wireless access systems. / K. I. Kitayama. // *J. Fib. Integrated. Opt.* – 2000. – vol. 19. – pp. 167-186.
39. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2010. – 626 p.
40. Gliese, U. Multifunctional fiber-optic microwave links based on remote heterodyne detection. / U. Gliese, T.N. Nielsen, S. Norskov, K. E. Stubkjaer. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 1998. – vol. 46, no. 5. – pp. 458-468.
41. Goldberg, L. Microwave signal generation with injection locked laser diodes. / L. Goldberg, H.F. Taylor, J.F.Weller, D.M. Bloom. // *Electron. Lett.* – 1983. – vol. 19, no.13. – pp. 4914-93. 135
42. Goldberg, L. 35 GHz microwave signal generation with injection locked laser diode. / L. Goldberg, A. Yurek, H.F. Taylor, J.F. Weller. // *Electron Lett.* – 1985. – vol.21, no.18. – pp. 714-715
43. Harrison, J. Linewidth and offset frequency locking of external cavity GaAlAs lasers. / J. Harrison, A. Mooradian. // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1989. – vol. 25, no. 6. – pp. 1252-1255
44. Ramos, R.T. Fast heterodyne optical phase-lock loop using double quantum well laser diodes. / R.T. Ramos, A.J. Seeds. // *Electron. Lett.* – 1992. – vol. 28, no. 1. – pp. 82-83.

45. Gliese, U. A wideband heterodyne optical phase-locked loop for generation of 3–18 GHz microwave carriers. / U. Gliese, T.N. Nielsen, M. Bruun, E.L. Christensen, K.E. Stubkjaer, S. Lindgren, B. Broberg. // IEEE Photon. Technol. Lett. – 1992. – vol.4, no.8. – pp. 936-938.

46. Bordonalli, A.C. High-Performance phase locking of wide linewidth semiconductor lasers by combined use of optical injection locking and optical phase-locked loop. / A.C. Bordonalli, C. Walton, A.J. Seeds. // J. Lightw. Technol. – vol.17, no.2. – pp. 328-342.

47. Williams, K.J. 6–34 GHz offset phase locking of Nd: YAG 1319 nm nonplanar ring lasers. / K.J. Williams. // Electron. Lett. – 1989. – vol.25, no.18. – pp. 1242-1243.

48. Fan, Z.F. Optical generation of a mHz-linewidth microwave signal using semiconductor lasers and a discriminator-aided phase-locked loop. / Z.F. Fan, M. Dagenais. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1997. – vol.45, no.8. – pp. 1296-1300.

49. Rideout, H. Discriminator-aided optical phase-locked loop incorporating a frequency down-conversion module. / H. Rideout, J. Seregelyi, S. Paquet, J.P. Yao. // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2006. – vol.18, no.22. – pp.