

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

УДК 631.382

«Допущено до захисту»

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

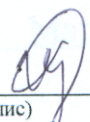
« 14 » 12 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Дослідження радіофотонних сенсорних систем на адресних волоконних
бреггівських структурах»

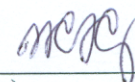
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

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

14.12.2020 
(дата, підпис)

Цвик Р. Б.

Керівник роботи
ст. вик.

14.12.2020 
(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 «Дослідження радіофотонних сенсорних систем на адресних волоконних
бреггівських структурах»

Виконав: студент 2 курсу, групи ТРм-19-1
спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Цвик Р. Б.

Керівник Хоменко Ж. М.

Рецензент Мартинчук П. П.

Житомир
2020

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук

« 15 » червня 2020 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Цвик Р.Б.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження радіофотонних сенсорних систем на адресних волоконних бреггівських структурах»

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

2. Мета дослідження поближення характеристик, а також розширення функціональних можливостей

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.
адресна, частота 30 ГГц, діапазон 1550.00...1550.50 нм, дискретний крок 0.05 нм.

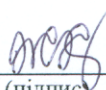
4. Основні задачі дослідження запропонувати математичні моделі бреггівських структур, провести комп'ютерне моделювання.

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2020

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

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)


(підпис)

Хоменко Ю.М.
(прізвище, ініціали)

Цвик Р.Б.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дана робота присвячена дослідженню та моделюванню характеристик, а також, розширення функціональних можливостей радіофотонних сенсорних систем на волоконних бреггівських структурах, заснованих на створенні теорії і техніки адресних структур зазначеного типу. В роботі виконаний огляд і порівняльний аналіз існуючих радіофотонних сенсорних систем на волоконних бреггівських структурах та проведено моделювання.

ANNOTATION

This work is devoted to the study and modeling of characteristics, as well as extensions. functionality of radio photonic sensor systems on fiber Bragg structures based on the creation of the theory and technique of address structures of this type. The paper reviews and comparative analysis of existing radio photonic sensor systems on fiber Bragg structures and simulations.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел, посилань. Загальний обсяг складає 97 аркушів, 53 рисунки, 2 таблиці.

Перелік ключових слів: радіофотонні сенсорні системи, волоконні брегівські решітки,

Об'єктом дослідження є радіофотонні сенсорні системи, побудовані на основі волоконних брегівських структур.

Предметом дослідження є теорія і техніка радіофотонних сенсорних систем, побудованих на основі адресних волоконних брегівських структур.

Метою роботи є полягає у вирішенні важливої науково-технічної проблеми - поліпшення характеристик, а також, розширення функціональних можливостей радіофотонних сенсорних систем на волоконних брегівських структурах, заснованих на створенні теорії і техніки адресних структур зазначеного типу.

Для досягнення даної мети необхідно виконати ряд завдань:

- провести аналіз існуючих і перспективних радіофотонних сенсорних систем на основі волоконних брегівських решіток;
- на основі проведеного аналізу запропонувати математичні моделі адресних волоконних брегівських структур;
- провести побудову радіофотонних сенсорних систем на адресних волоконних брегівських структурах за результатами їх комп'ютерного моделювання.

Методом досліджень, який використано у роботі, є порівняльний аналіз моделювання отриманих результатів .

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	10
1.1 Волоконні бреггівські решітки, застосування в сенсорних системах	10
1.1.1 Волоконні бреггівські решітки та їх застосування	10
1.1.2 Визначення центральної довжини хвилі волоконних бреггівських решіток	13
1.1.3 Мультиплексування і локалізація волоконних бреггівських решіток в сенсорній мережі	16
1.2 Радіофотонні методи опитування волоконних бреггівських решіток	18
1.2.1 Волоконні бреггівські решітки з дискретним фазовим зрушенням	19
1.3 Радіофотонні системи інтеррогації волоконних бреггівських решіток в багатосенсорних додатках	24
РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПЦІЯ ФОРМУВАННЯ АДРЕСНИХ ВОЛОКОННИХ БРЕГГІВСЬКИХ СТРУКТУР	34
2.1 Адресна волоконна бреггівська структура на основі ВБР з двома симетричними фазовими π -зрушеннями (2π -ВБР)	35
2.1.1 Методика опитування адресному 2π -ВБР структури	36
2.1.2 Моделювання адресному 2π -ВБР структури комплексним методом матриць передач і зв'язку мод	37
2.1.3 Результати чисельного моделювання адресному 2π -ВБР структури	40
2.2 Адресна волоконна бреггівська структура на основі двох ідентичних понад вузькосмугових решіток (2λ -ВБР)	41
2.2.1 Методика опитування адресних 2λ -ВБР структури	45
2.2.2 Моделювання адресному 2λ -ВБР структури	46

РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ РАДІОФОТОНОЇ СИСТЕМИ ОПИТУВАННЯ АДРЕСНИХ ВОЛОКОННИХ БРЕГГІВСЬКИХ СТРУКТУР	51
3.1 Малосенсорні вимірювальні системи на основі адресних структур	51
3.1.1 Опитування адресному 2π -ВБР структури (проходження сигналу)	51
3.1.2 Опитування адресному 2π -ВБР структури (відображення сигналу)	57
3.1.3 Опитування адресному 2λ -ВБР структури (відображення сигналу)	66
3.2 Багатосенсорні вимірювальні системи на основі адресних структур	71
3.2.1 Опитування масиву 2π -ВБР структур (проходження сигналу)	71
3.2.2 Опитування масиву 2λ -ВБР структур (відображення сигналу)	76
ВИСНОВОК	84
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ І НОРМАТИВНИХ ПОСИЛАНЬ	88
Список використаної літератури	92

ВСТУП

У рішенні ряду найважливіших соціальних і оборонних науково-технічних проблем світового розвитку радіофотоніка (РФ) займає одне з найважливіших місць. Протягом останніх років за рахунок своєї ефективності можливості і принципи РФ активно поширюються на область волоконно-оптичних сенсорних систем (ВОСС), формується новий клас сенсорних систем - радіофотонний. Волоконні бреггівські структури (ВБС), що будуються на основі волоконних бреггівських решіток (ВБР), є основним елементом радіофотонних сенсорних систем (РФСС). Завдяки властивим ВБС перевагам, таким як малий розмір і вага, несприйнятливість до електромагнітних полів, простота мультиплексування, дані природою волокна, вони лежать в основі вимірювання температури, механічних деформацій, показника заломлення, як окремо, так і комплексовані, в силу мультиплікативності бреггівського відгуку. За оцінками, глобальний ринок ВБР, в тому числі з радіофотонним опитуванням, оцінювався в 2017 році в 0,5 млрд. доларів США і, як очікується, зареєструє зростання на 15,0% у вартісному вираженні протягом прогнозованого періоду 2018-2026 років. Класично РФСС на ВБС можна розділити на три великі групи: одно-, мало- і багатосенсорні. Основою вимірювального перетворення в них є перетворення вимірюваного фізичного поля в зрушення оптичної центральної довжини хвилі ВБР, який в радіофотонній сенсоріці визначається в радіочастотній області, забезпечуючи при цьому високу точність і швидкість опитування, як правило, комплексованих волоконно-оптичних датчиків (Квод) на основі ВБС, істотно перевершують характеристики ВОСС. При цьому методи інтеррогації Квод можна розділити на пасивні, активні і активно-пасивні. До перших відносяться методи, які використовують фотонну фільтрацію в ВБС, як правило, одночастотних радіосигналів, закладених в зондуючий сигнал, як компонента промодульованої оптичної несучої або їх безлічі. Активно-пасивні методи, засновані на вимірі рознесення, як правило, двочастотних компонентів в ВБС і генерації при їх фотозмішуванні радіочастотної несучої, значення якої несе інформацію про

фізичний вплив. І, нарешті, активні методи, полягають в полігармонійному зондуванні ВБС і визначенні її характеристик з аналізу амплітудних і фазових характеристик обвідної биття відомих різницевих частот, закладених в зондуєче випромінювання. Якщо в інтеррогації ВБС в РФСС переваги виглядають більш, ніж переконливо, то мультиплексування декількох ВБС в одній сенсорній мережі залишається класичним. У великому колі може знадобитись використання методу стандартного мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) для реєстрації даних з декількох датчиків, які розподілені рівномірно в широкому спектрі (багатосенсорні системи). Іншим підходом є оптичне мультиплексування в тимчасовій області (TDM), де оптичний імпульсний сигнал посиляється на матрицю датчиків, а просторове становище кожної решітки визначається виміром різниці часу шляху між відбитими сигналами. Оптична частотна рефлектометрія (OFDR) може також застосовуватися для реєстрації даних з декількох ВБС. Ці методи в основному полягають в отриманні електричного імпульсного відгуку системи з декількох ВБС, об'єднаних в каскад (малосенсорні системи). Більш перспективний підхід до реєстрації даних в сенсорних мережах полягає в використанні мультиплексування з оптичним кодовим поділом (OCDM), при використанні якого масив датчиків зондують псевдовипадковою двійковою послідовністю (PRBS) з подальшим визначенням кореляції відбитого сигналу від кожного датчика з миттєвим кодом, відправленим в мережу. Необхідно відзначити, що розробкою радіофотонних сенсорних мереж, датчиків і інтеррогаторів займаються багато колективів фахівців, як в нашій країні, так і за кордоном.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Волоконні бреггівські решітки, застосування в сенсорних системах, проблеми визначення центральної довжини хвилі і мультиплексування

Радіофотоніка (мікрохвильова фотоніка) - це область, яка вивчає взаємодію між мікро- і оптичними хвилями, як в додатках генерації, розподілу, управління, обробки та аналізу СВЧ-сигналів за допомогою засобів фотоніки (телекомунікаційні, радіолокаційні та ін. системи), так і використання коштів мікрохвильової обробки сигналів для характеристики фотонних пристроїв і змін їх характеристик під впливом зовнішніх фізичних полів (радіофотонні сенсорні системи).

У системах радіофотоніки використовуються різні фотонні компоненти: оптичні джерела, оптичні підсилювачі, дисперсійні елементи, електрооптичні модулятори, оптичні фільтри, фотоприймачі тощо. Велика частина радіофотонних сенсорних систем призначена для роботи в діапазоні довжин хвиль 1550 нм, що пояснюється можливістю використання компонент низького цінового сегмента, розроблених для систем волоконно-оптичного зв'язку (як правило, радіофотонних телекомунікаційних систем) для цього діапазону довжин хвиль.

Базовим елементом більшості волоконно-оптичних і радіофотонних систем є волоконна бреггівська решітка.

1.1.1 Волоконні бреггівські решітки та їх застосування

ВБР - волоконно-оптичний пристрій, виготовлений за допомогою модуляції показника заломлення (ПЗ) ділянки оптичного волокна за допомогою ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Наявність неоднорідностей в ПЗ призводить до зв'язку зустрічно поширюваних мод в волокні. Виходячи з різних умов формування зв'язку мод, ВБР можуть бути розділені на три класи:

- 1) однорідні ВБР, мають сильну зв'язок мод і вузьку смугу пропускання, пов'язану з періодом решітки (рисунок 1.1);

2) чірповані ВБР структури, в яких зв'язок мод формується в широкій смузі частот, в зв'язку з мінливим періодом решітки (рисунок 1.2);

3) решітки з дискретним фазовим зрушенням, в яких порушується сталість фази модуляції ПЗ, а в спектрі формується надвузькосмугове вікно прозорості (рисунок 1.3).

ВБР широко і активно досліджуються, починаючи з моменту їх створення в 1978 році. Завдяки важливим і унікальним властивостям, включаючи гнучкі спектральні характеристики, повністю волоконну геометрію, низькі вносяться втрати, компактні розміри і низьку вартість, ВБР широко застосовуються для різних поширених додатків, наприклад, в волоконно-оптичній зв'язку, волоконно-оптичних сенсорах, в фотонних системах обробки сигналів. Останнім часом ВБР широко використовуються в системах радіофотоніки.

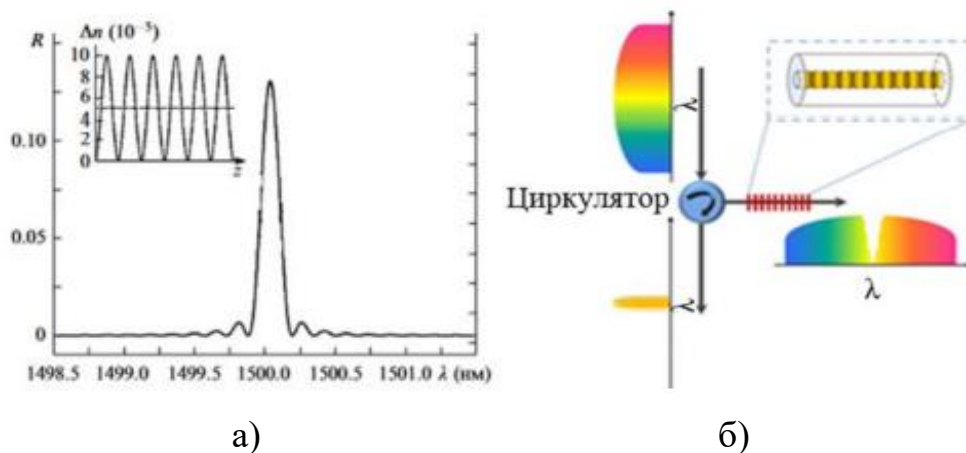


Рисунок 1.1 — Спектр відображення - а) і схема інтеррогації - б) однорідної ВБР

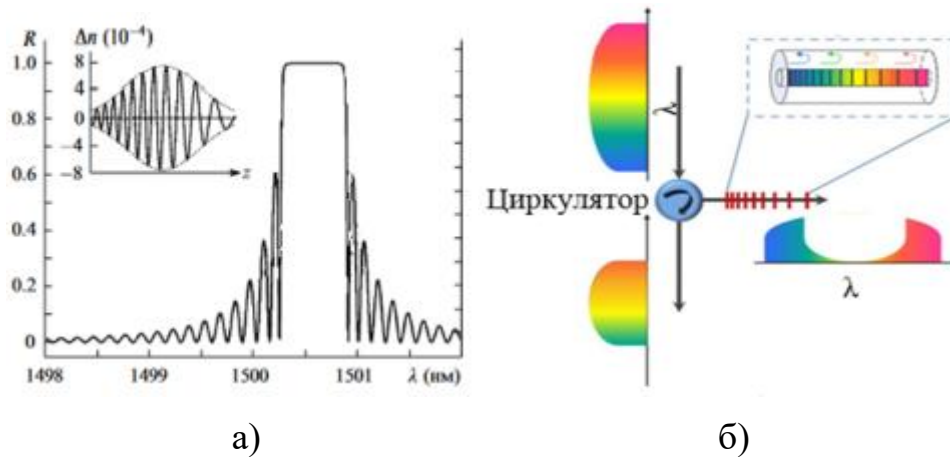


Рисунок 1.2 — Спектр відображення - а) і схема інтеррогації - б) чірпованої ВБР

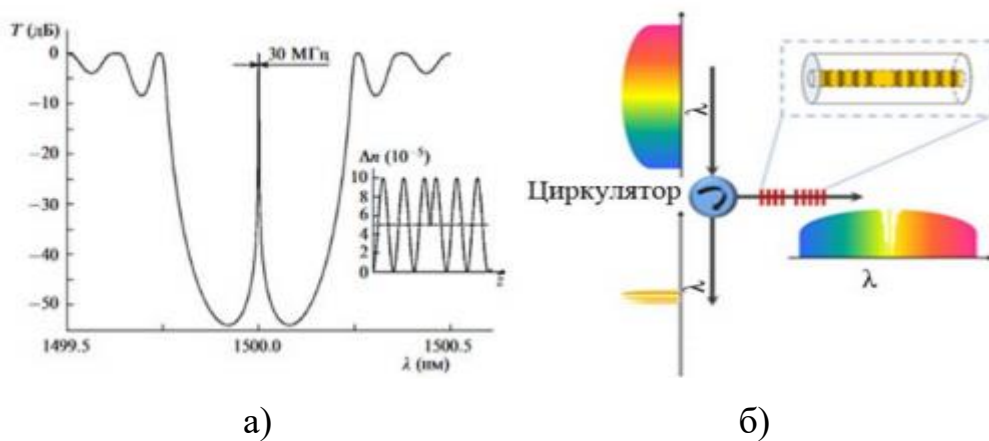


Рисунок 1.3 — Спектр відображення - а) і схема інтеррогації - б) для ВБР з дискретним фазовим π -зрушенням

Основними напрямками застосування є: фотонні формувачі діаграм спрямованості для фазованих антен, мікрохвильові фотонні фільтри, радіолокаційні системи, генератори надширокосмугових сигналів, фотонні СВЧ-фазообертачі, високочастотні генератори НВЧ-сигналів, фотонні вимірювачі миттєвої СВЧ-частоти, оптоелектронні генератори (ОЕО) і фотонні генератори СВЧ-сигналів довільної форми.

У загальному сенсі, ВБР можуть служити в радіофотонних системах як дисперсійний елемент, лінія затримки, вузькосмуговий оптичний смуговий пропускає або фільтр, що загороджує, широкосмуговий комплексний оптичний формувач спектру.

1.1.2 Визначення центральної довжини хвилі волоконних бреггівських решіток

У цій роботі розглядаються розробки в галузі використання ВБР для різних радіофотонних сенсорних систем, з акцентом на системи вимірювального перетворення, калібрування і мультиплексування ВБР при перенесенні оптичної інформації в радіочастотну область і з можливістю використання переваг, як оптичного, так і радіочастотного діапазонів довжин хвиль.

В сучасних сенсорних системах для опитування, отримання і перетворення інформації з ВБР використовується широкосмугова або перебудовується в широкому діапазоні оптико-електронна вимірювальна апаратура - інтеррогатори. Сучасні інтеррогатори для волоконно-оптичних датчиків збудувати на основі: ОАС, перебудовуються лазерів, оптичних рефлектометрів OTDR і OFDR, скануючих фільтрів Фабрі-Перо (СФФП), а також дифракційних решіток КПОФ з ПЗС матрицями, ОУФ, AWG та ін. Детальна інформація про характеристики інтеррогаторів для волоконно-оптичних датчиків представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Порівняльні характеристики інтеррогаторів

№ п/п	Метод опитування ВБР			Застосування ВБР	Швидкість опитування, МГц	Роздільна здатність вимірів, пм	Локалізація ВБР в системі
1	Оптико-електронний	ОАС, СФФП (механічний привід)	Частотний	Статичні деформації, температура	10^{-6}	1...10	WDM, OFDM
2		СФФП (електронний привід)		Вібрації, динамічні деформації	10^{-4}	1...5	WDM, OFDM
3		КФП	Амплітудний	Прискорення	10^{-3}	1...5	WDM, OFDM, TDM
4		ОУФ		Акустика	1	1...10	WDM, OFDM, TDM

5		Оптичне кодування всередині ВБР	Амплітудно-фазовий	Багатофункціональний	3	1	OCDM, кореляція
6		Зондування ВБР з перетворенням «частота-час»	Частотний	Деформації + температура	5	0,25	TDM*
7		ОЕАГ на ВБР/фільтр на ВБР		Згин + Температура ...	10	0,3...0,4	TDM*
8		Контроль довжини на ВБР	Амплітудно-фазовий	Знос + температура + ...	50	0,1	TDM*
9		Контроль довжини хвилі ВБР з витравленої і невитравленої ділянок волокна	Амплітудно-частотний	Показник заломлення + температура + ...	50	0,1	WDM по групі**
10		Контроль ширини вікна прозорості чіпованої ВБР з фазовим зрушенням		Згин + температура	50	0,1	WDM по групі**
11		Адресна ВБР		Багатофункціональний	100	0,1	Радіофотонна, на адресній частоті

* Немає відомостей про багатосенсорних системах;

** Є відомості про малосенсорних системах.

Як видно з таблиці 1.1, оптико-електронна апаратура інтеррогації волоконно-оптичних датчиків характеризуються рядом обмежень, що показано в роботі.

Перше обмеження - мала швидкість опитування, яка необхідна для отримання високого дозволу вимірювань по довжині хвилі. При використанні ОАС

або СФФП високий дозвіл по довжині хвилі (1-10 пм) вимагає великого часу механічного сканування спектрального діапазону ВБР, що зумовлює низьку швидкість опитування (до 1 Гц). При використанні електронного сканування в СФФП (дозвіл до 1-5 пм), швидкість опитування досягає 100 Гц. Застосування КПФ і ПЗС-матриць з високою швидкістю опитування забезпечує швидкість сканування в 1 кГц при вирішенні 1-5 пм. Використання ОУФ дозволяє збільшити швидкість опитування до 1 МГц, але обмежує дозвіл по довжині хвилі (1-10 пм).

Другим обмеженням оптико-електронних інтеррогаторів для волоконно-оптичних датчиків є неможливість вимірювання декількох величин одночасно з однією ВБР. Структури ВБР комплексовані по природі і здатні вимірювати широкий спектр параметрів, таких як натяг, тиск, вібрації, теплові деформації, характеристики навколишнього середовища, що засноване на мультиплікативній чутливості ВБР до механічного напрузі, температурі, а в деяких випадках до показника заломлення навколишнього волокно середовища. З одного боку, це є істотним недоліком систем вимірювання на базі ВБР, з іншого показують їх потенціал. Крім того, складність одночасного розрізнення і вимірювання пояснюється тим, що ВБР можуть перекриватися по спектру.

По-третє, слід врахувати, що спектральні характеристики ВБР носять резонансний або близький до нього характер, однак функція перетворення «довжина хвилі (частота) - амплітуда» для оцінки їх в області резонансу або осцилює, або має досить плоский характер. Останнім часом, в структурі ВОД починають активно застосовуватися ВБР з неоднорідністю у вигляді дискретного фазового π -зсуву в законі модуляції коефіцієнта заломлення решітки. Однак подібні методи не завжди дозволяють досягти бажаного результату, а іноді призводять і до істотного подорожчання інтеррогаторів для волоконно-оптичних датчиків. В силу цього, часто використовують математичні методи апроксимації резонансних характеристик ВБР, щоб з певною ймовірністю визначити центральну довжину хвилі.

1.1.3 Мультиплексування і локалізація волоконних бреггівських решіток в сенсорній мережі

Розглянемо основну жорстка вимога до систем інтеррогації волоконно-оптичних датчиків, яке відображено в останньому стовпчику таблиці 1.1. Ця вимога локалізації або ідентифікації конкретної ВБР в сенсорній системі в умовах можливого перекриття спектрів відразу декількох решіток.

Мультиплексування декількох ВБР в одній сенсорній мережі пов'язано з видом використовуваних решіток. У великому колі може знадобитись використовувати метод стандартного мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) для опитування декількох датчиків, які розподілені рівномірно в широкому спектрі (багатосенсорні додатки) і не перекриваються по спектру. Іншим підходом є оптичне мультиплексування в тимчасовій області (TDM), де оптичний імпульсний сигнал посиляється на матрицю датчиків, а просторове положення кожної решітки визначається вимірюванням різниці часу шляху між відбитими сигналами. При цьому решітки також рідко перекриваються по спектру. Оптична частотна рефлектометрія (OFDR) може також застосовуватися для опитування декількох ВБР, ці методи в основному складаються в отриманні електричного

частотного відгуку даної системи з декількома ВБР, об'єднаних в каскад (малосенсорні додатки). Дозвіл решіток з перекриваються спектрами досягається в цьому випадку за рахунок досить складного інтерферометричної побудови зазначених систем.

Інший підхід до інтеррогації в сенсорних мережах полягає в використанні мультиплексування з оптичним кодовим поділом (OCDM), при використанні якого масив датчиків зондують псевдовипадковою двійковою послідовністю (PRBS) для кореляції відбитого сигналу від кожного датчика з миттєвим кодом, відправленим в мережу. У цьому методі використовуються супер структуровані ВБР, із записаним, в кожній з них, оптичним кодом, призначеним для дешифрування (ідентифікації) і отриманні ортогональності щодо своїх сусідніх датчиків в мережі. В цьому випадку ортогональність кодів між суміжними датчиками

дозволяють їм перекриватися в одному і тому ж робочому діапазоні, тим самим збільшуючи використання смуги в мережі.

Один з найпростіших способів досягнення оптичних структур з взаємно ортогональними між ними полягає в використанні дискретних витягнутих сфероїдальних функцій (ДВСФ) сліпучого. Вони запропоновані кілька десятиліть тому, але мають цікаві властивості, які відкриваються і досліджуються навіть в наші дні. Кожна послідовність ДВСФ (Рисунок 1.4) має певну структуру амплітуди і фази, що дає можливість розрізняти їх один від одного.

Незважаючи на переваги, даний метод дуже складний в реалізації. Інтеррогатор повинен мати можливість відновлювати обидві величини (амплітуду і фазу) частотної характеристики. Тому, потрібна спеціальна синхронізація між джерелом і обробником відбитого сигналом, що в кінцевому підсумку можна розуміти, як окремий випадок мультиплексування в тимчасовій області зі своїми недоліками за швидкістю опитування датчиків, погрішностей вимірювань і складності реалізації.

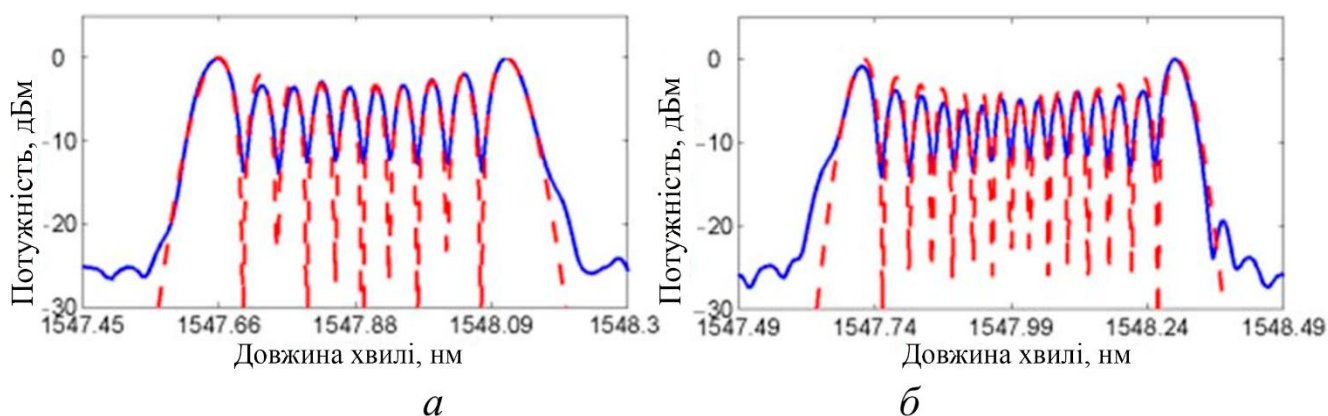


Рисунок 1.4 — Отриманий (суцільна лінія) і розрахунковий (пунктирна лінія) спектр ДВСФ, записаних в ВБР, для випадків $N = 10$ (а) і $N = 15$ (б)

На рисунку 1.5 представлена структурна схема сенсорної системи для опитування таких датчиків, яка в модернізованому варіанті (2017 р.) використовує полігармонічний радіофотонний двочастотний метод зондування.

Даний метод розроблений і широко використовується нами для отримання схожих характеристик в реалізаціях сенсорних систем на основі класичних ВБР, починаючи з 2004 р.

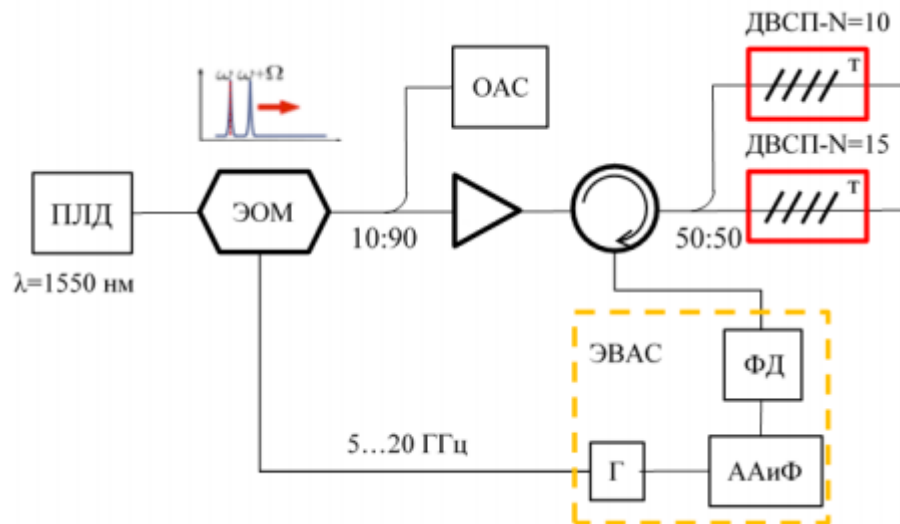


Рисунок 1.5 — Структурна схема інтеррогації кодових ВБР з ДВСФ: ПЛД - перебудовується лазерний діод, ЕОМ - електрооптичний модулятор, ОАС - оптичний аналізатор спектру, ДВСФ - дискретна витягнута сфероїдальних функція сліпучого, ЕВАС - електронний векторний аналізатор мереж, ФД - фотодіод, Г - генератор радіочастоти, ААиФ - аналізатор амплітуди і фази

З огляду на цей фактор, будемо шукати підходи до створення АВБС на основі результатів розробки полігармонічних і інших радіофотонних систем. Для цього більш детально розглянемо радіофотонні методи інтеррогації ВБР.

1.2 Радіофотонні методи опитування волоконних бреггівських решіток

В даному пункті проведено порівняльний аналіз радіофотонних методів опитування ВБР.

Розглянуто підсистеми опитування ВБР в РФСС на основі:

- пасивної фільтрації і спектральної обробки виділених з оптичного випромінювання радіочастотних компонент в фотонних фільтрах мікрохвильових сигналів;
- пасивно-активної фільтрації і генерації радіочастотних несучих в оптоелектронних генераторах або шляхом фотозмішування рознесених в волоконно-оптичних датчиках по частоті оптичних компонент випромінювання;
- активного зондування дво- або полігармонічні оптичним випромінюванням з радіочастотними компонентами волоконно-оптичних датчиків на основі ВБР.

Показано переваги останнього методу, в якому відсутня стадія вимірювання невідомої радіочастоти, отриманої в ході вимірювального перетворення. Зондування здійснюється з відомою різницевою частотою оптичних компонент.

1.2.1 Волоконні бреггівські решітки з дискретним фазовим зрушенням, зондуючим частотно-модульованим за лінійним законом випромінюванням

Реалізація першого датчика заснована на формуванні спектрального та частотно-однозначного відображення зсуву довжини хвилі по положенню кореляційного піку ЛЧМ-радіосигналу. Дана методика широко використовується в сучасних радіолокаційних системах для збільшення роздільної здатності вимірювань. Швидкість визначення центральної довжини хвилі відповідає одиницям мегагерц. Якщо використовується волокно з високим коефіцієнтом двулучепреломлення, то за різними поляризаційним складовим може бути виміряна як деформація, так і температура.

На рисунку 1.6 зображена структурна схема сенсора на основі ВБР з фазовим π -зрушенням. Пристрій складається з фотонного фільтра (виділено пунктиром) і цифрового сигнального процесора (ЦСП). Фотонний фільтр побудований на базі фазового модулятора (ФМ) і ВБР з фазовим π -зрушенням з використанням перетворення смуги придушення ВБР в смугу пропускання результуючого фільтра шляхом фазово-амплітудної конверсії. Згідно зі схемою опитування, випромінювання від перебудовується лазерного джерела (ПЛД) через

контролер поляризації надходить на фазовий модулятор, отриманий сигнал надходить далі на ВБР, де шляхом фільтрації однієї бокової смуги фазомодульованого сигналу реалізується фазово-амплітудна конверсія. Амплітудно-модульований сигнал, потрапляючи на фотодіод (ФД), формує характеристику фотонного фільтра з резонансною частотою дорівнює різниці частоти оптичної несучої і смуги придушення ВБР. Для роботи датчика подається лінійно частотно-модульований (ЛЧМ) сигнал на вхід фотонного фільтра. На виході фільтра формується ЛЧМ сигнал з частотами, що потрапляють в смугу пропускання фільтра. Для підвищення дозволу за допомогою ЦСП будується кореляційна функція фільтрованої і вихідного сигналу.

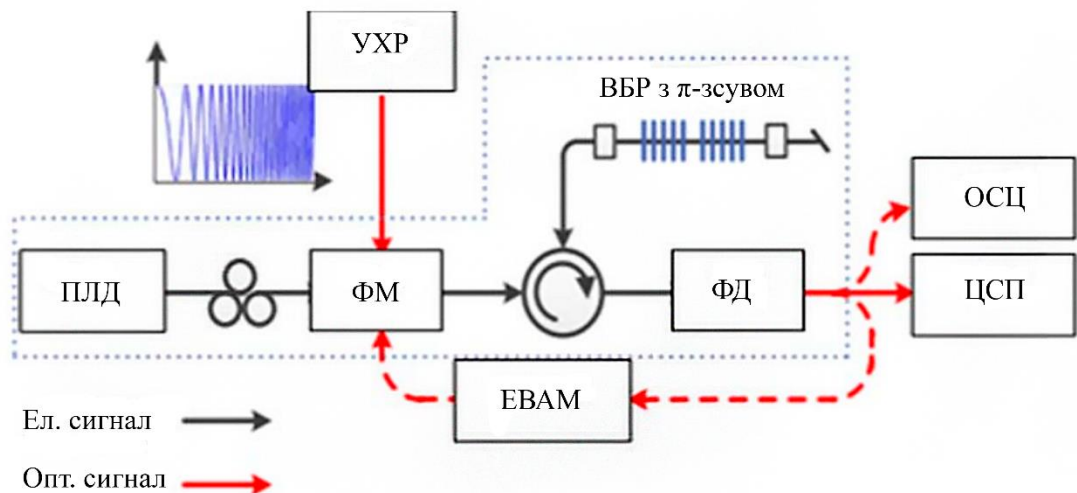


Рисунок 1.6 — Структурна схема сенсора на основі ВБР з фазовим π -зрушенням:

ПЛД - перебудовуване лазерне джерело, ФМ - фазовий модулятор, УХР - упорядкована хвилевідна решітка, ЕВАМ - електронний векторний аналізатор мереж, ФД - фотодіод, ОСЦ - осцилограф, ЦСП - цифровий сигнальний процесор

Особливістю цієї схеми інтеррогації є те, що резонансна частота фотонного фільтра пов'язана з положенням центральної частоти смуги придушення ВБР з фазовим зрушенням. Нехай f_c або λ_c частота або довжина хвилі оптичної несучої, а $ps - fbg$ або λ_{ps-fbg} центральна частота або довжина хвилі смуги придушення ВБР, то резонансна частота фотонного фільтра запишеться як:

$$f_{mpf} = f_{ps-fbg} - f_c = \frac{c}{n} \times \left(\frac{\lambda_c - \lambda_{ps-fbg}}{\lambda_c^2} \right) \quad (1.1)$$

де f_{mpf} - резонансна частота фотонного фільтра, c - швидкість світла у вакуумі, n -ефективний показник заломлення волокна.

Коли ВБР розтягується, резонансна частота смуги придушення зміщується внаслідок збільшення періоду решітки. В результаті резонансна частота фотонного фільтра також змінюється. Таким чином, ми отримуємо залежність між натягом і зрушенням довжини хвилі:

$$\Delta\lambda_{ps-fbg} = \lambda_{ps-fbg} \times (1 - P_e) \times \Delta\varepsilon \quad (1.2)$$

де P_e коефіцієнт фотоупругості волокна.

Результуючі зміна частоти фільтра запишеться як:

$$\Delta f_{mpf} = -\frac{c}{n\lambda_c^2} \times \lambda_{ps-fbg} \quad (1.3)$$

Залежність показує, що зміна частоти прямо пропорційно прикладеному до ВБР розтягування. У тому випадку, якщо широкосмуговий ЛЧМ сигнал подається на фільтр, тільки частина його спектра, що лежить в смузі пропускання, проходить. Натяг визначається шляхом вимірювання частоти відфільтрованого ЛЧМ сигналу.

ЛЧМ сигнал описується наступним виразом:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \times \exp(jknt^2) \quad (1.4)$$

де k - девіація частоти, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ - маска, T - тривалість.

Широкосмуговий ЛЧМ сигнал, що пройшов через фільтр, опишеться наступним виразом:

$$H_{out}(f) = S(f) \times H_{mpf}(f) \quad (1.5)$$

$$H_{mpf}(f) = \frac{\pi^2 R^2}{V_\pi^2} [1 - R(f_c - f)]^2 \quad (1.6)$$

де $S(f)$ Фур'є перетворення сигналу $s(t)$, $H_{mpf}(f)$ - АЧХ фільтра, R - характеристика чутливості фотодіода, V_π - полуволнової напруга ФМ, R_f - профіль спектра відбиття ВБР. Резонансна частота смуги пропускання фотонного фільтра відповідає випадку $R(f_c - f) = 0$, це означає, що частота f_{mpf} задовольняє рівності $f_c + f_{mpf} = f_{ps-fbg}$. На малюнку 1.7 показані епюри сигналів, що пояснюють роботу пристрою.

Як було сказано раніше, ВБР з фазовим зрушенням має смугу придушення на частоті $f_{ps-fbg1}$ при відсутності зовнішнього впливу (рисунок 1.7, а). Внаслідок фазово-амплітудної конверсії в ВБР, формується фотонний фільтр з резонансною частотою f_{mpf1} (рисунок 1.7, б). Спектр широкосмугового ЛЧМ сигналу на вході фільтра показаний на рисунку 1.7, в. Спектральні складові, що потрапляють в смугу пропускання фільтра, проходять. тимчасова діаграма сигналу на виході фільтра представлена на рисунку 1.7, г. Коли до ВБР докладено фізичний вплив, змінюється положення смуги придушення і резонансна частота фільтра, як показано на рисунках 1.7, д-е. резонансна частота фільтра складе величину f_{mpf2} . Спектр сигналу на виході фільтра (при його новій резонансній частоті) матиме вигляд, представлений на рисунку 1.7, ж, а його тимчасова діаграма на рисунку 1.7, з. Вимірюючи основну частоту НВЧ сигналу за допомогою ЦСП, визначають величину прикладеної до ВБР впливу. Оскільки смуга пропускання фотонного фільтра велика, дозвіл мало. Для того щоб його збільшити може бути введена кореляційна функція між вихідним і вхідним сигналом. Шляхом вимірювання положення отриманого стисненого імпульсу, величина впливу може бути визначена з високою точністю.

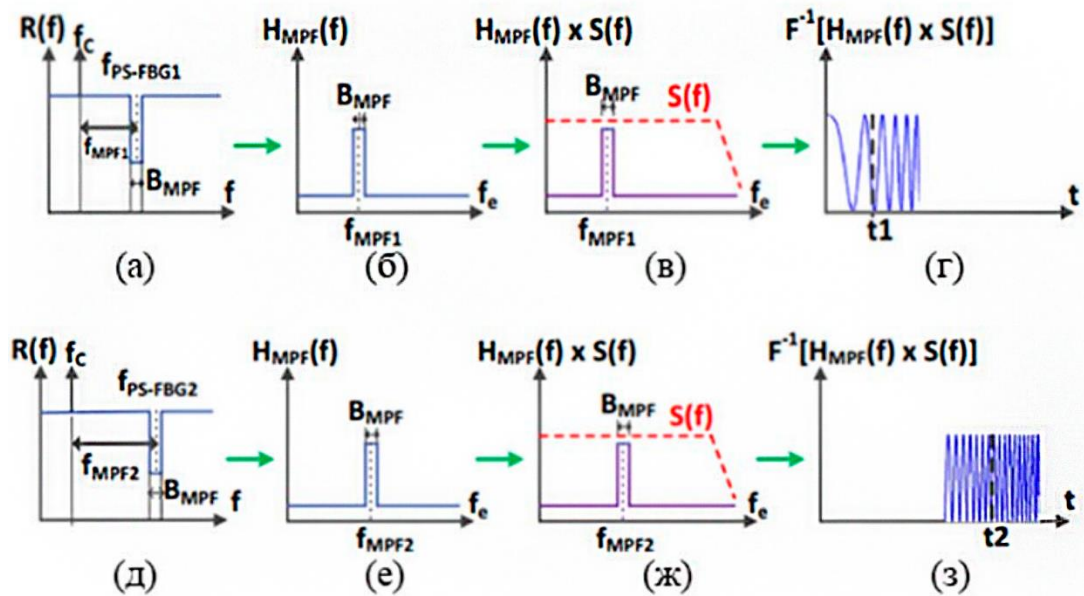


Рисунок 1.7 — сигналограма, що пояснює роботу пристрою: (А) - (Г) - без впливу, (Д) - (Е) - з доданням розтягуванням, (а) - (Д) – положення провалу ВБР з π -зрушенням без / з доданням впливом, (б) - (Е) - АЧХ фотонного фільтра без / з доданням впливом, (в) - (Ж) - спектр відфільтрованого сигналу, (Г) - (З) - тимчасова діаграма сигналу після фільтра

На рисунку 1.8, а представлений спектр ВБР з фазовим зрушенням, її спектральна ширина 0.55 нм, положення смуги придушення (центр) 1546.615 нм, ширина - 200 МГц. На рисунку 1.8, б представлена АЧХ результуючого фотонного фільтра.

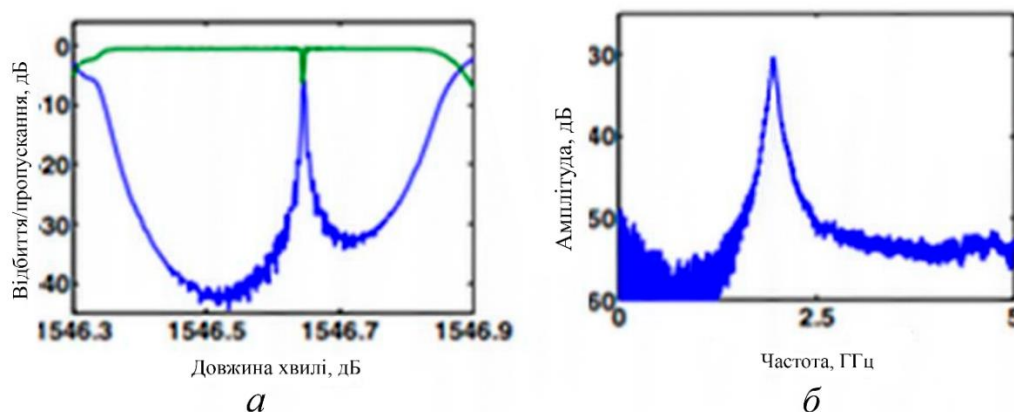


Рисунок 1.8 — Спектри відбиття (зелена) і пропускання (синя) крива ВБР з π -зрушенням (а), АЧХ фотонного фільтра, виміряна ЕВАМ (б)

З позицій полігармонічних РФСС можна використовувати комбгенератор безлічі двочастотних зонduючих випромінювань з різними різницеvими частотами для кожного положення ВБР з дискретним фазовим зрушенням. Ряд робіт, що описує аналогічні датчики, в тому числі тих же авторів, оперують тільки однією решіткою. Питання побудови малосенсорних або багатосенсорних систем не розглядаються.

1.3 Радіофотонні системи інтеррогації волоконних бреггівських решіток в багатосенсорних додатках

При паралельному включенні ВБР використовуються РФСС, засновані на топології «зірка» і принципах пасивних оптичних мереж.

На рисунку 1.9 показана РФСС вимірювальна система опитування масиву слабковідбиваючих ВБР. У цьому випадку застосовується пристрій на базі фотонного фільтра, структурна схема якого зображена на рисунку 1.9-а, узагальнена схема всього пристрою представлена на рисунку 1.9-б.

Оптичне випромінювання з лазерного діода (ЛД) піддається амплітудній модуляції в електрооптичному модуляторі (ЕОМ). Далі сигнал ділиться на N плечей. У кожному плечі розташовані лінії затримки і атенюатори для формування

затримок складових з певними ваговими коефіцієнтами. Далі сигнали об'єднуються і надходять на фотоприймач, де відбувається їх когерентне і некогерентне фото змішання. При некогерентному змішуванні система не сприйнятлива до зовнішніх впливів і має високу повторюваність характеристик. Зважаючи на ці причини, був обраний некогерентний режим роботи установки. При роботі в некогерентному режимі існують обмеження по мінімальній величині часу затримки, яка повинна бути одного порядку з тимчасовою когерентністю джерела.

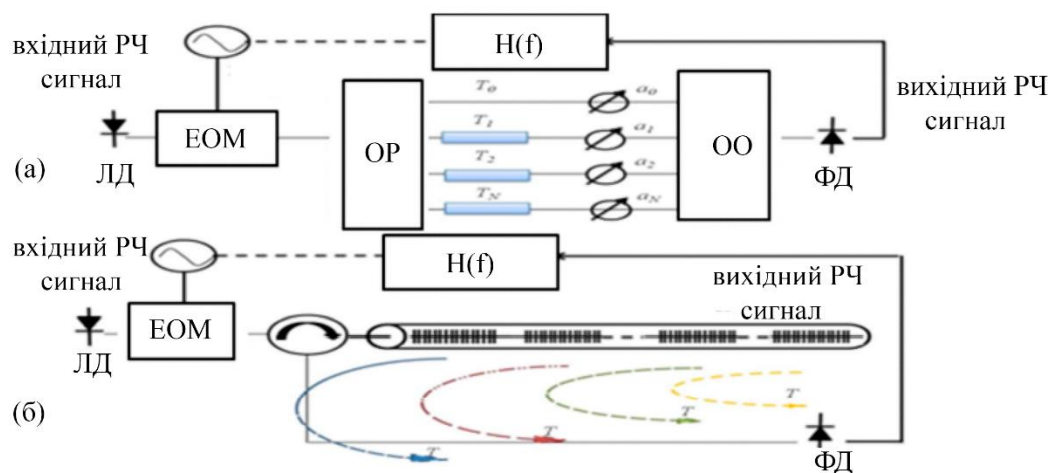


Рисунок 1.9 — Узагальнена структурна схема фотонного фільтра N-го порядку (а) і радіофотонного пристрою інтеррогації для каскаду слабковідбиваючих ВБР (б)

На рисунку 1.10 представлена РФСС з використанням дисперсійних ліній затримки, які формують квантовий фільтр радіочастотних сигналів. Широкосмуговий лазерний діод (ШЛД) з функцією контролю спектрального розподілу випромінювання формує вихідний оптичний сигнал, який далі піддається процедурі двосмугової модуляції радіосигналом частоти Ω з виходу електронного векторного аналізатора мереж (ЕВАН). Отриманий сигнал надходить на дисперсійний елемент, який має величину дисперсії φ_2 . Далі розташований інтерферометр, побудований на двох оптичних розгалужувачах. В одному з плечей за допомогою розгалужувачів $1 \times N$ і $N \times 1$ сформований масив датчиків.

Від кожного з датчиків за допомогою циркулятора виділяється відбите випромінювання. Крім цього, в кожную лінію датчиків вбудована керована лінія затримки, яка визначає робочий діапазон датчика. Оскільки величина затримки кожного датчика скомпенсована, такий параметр може бути використаний для визначення величини затримки між датчиками. Таким чином, даний пристрій формує тимчасові відрізки оптичного сигналу, з характеристиками, пов'язаними з різницею оптичного шляху кожного датчика. Контроль поляризації необорний для підвищення контрастності інтерференційної картини. В кінці оптичний сигнал надходить на балансний фотодетектор, побудований на базі двох фотодіодів. Різниця сигналів двох фотодіодів формує вихідний радіочастотний сигнал, що надходить для аналізу на ЕВАМ (може бути замінений на перебудовується генератор і осцилограф).

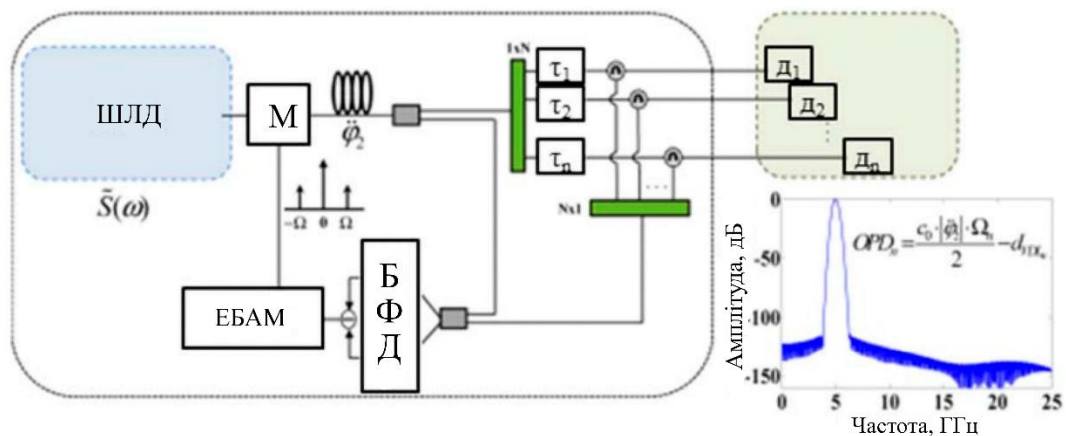


Рисунок 1.10 — РФСС з використанням дисперсійних ліній затримки: ШЛД - широкопasmовий лазерний діод, М - модулятор, ЕВАМ - електронний векторний аналізатор спектру, БФД - балансні фотодетектори, $\tau_1 \dots \tau_n$ - керовані лінії затримки, $\mathcal{D}_1 \dots \mathcal{D}_N$ – датчики

На рисунку 1.11 представлена дискретна оптична лінія затримки для радіосигналів, побудована з використанням однієї оптичної несучої.

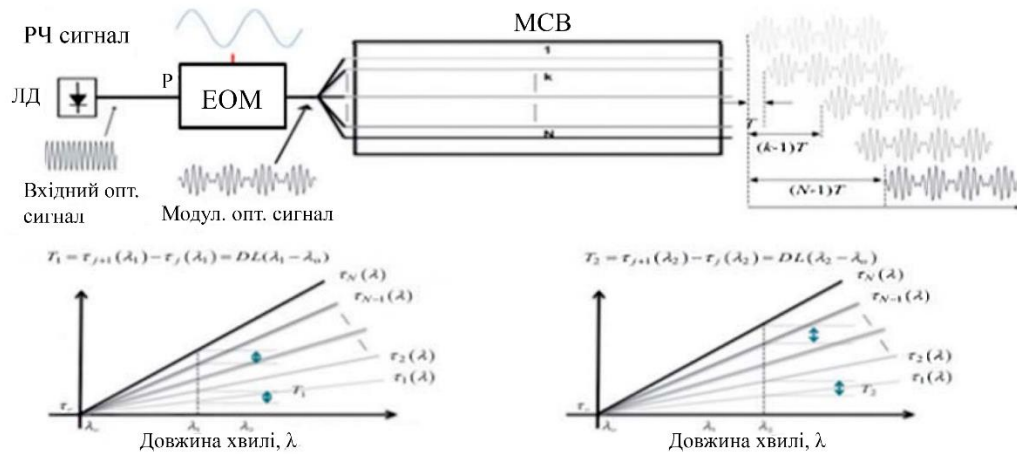


Рисунок 1.11 — Лінія затримки на гетерогенному мікро-структурованому волокні (МСВ) і модульованому оптичному сигналі: ЛД - лазерний діод, ЕОМ - електрооптичний модулятор

Пристрій складається з одночастотного лазерного діода, випромінювання якого модульоване по амплітуді або фазі за допомогою зовнішньої або внутрішньої модуляції. Далі, оптичний сигнал надходить в багатосерцевинне гетерогенне мікροструктуроване оптичне волокно. Не зважаючи на те, що серцевини волокна мають однакову довжину, ми можемо припустити, що кожна серцевина формує різну лінійну групову затримку, що залежить від довжини хвилі.

Що пов'язано з різною величиною хроматичної дисперсії першого порядку, як показано в нижній частині рисунку 1.10. На підставі зв'язку з цим групова затримка в кожній серцевині може бути описана як:

$$\tau_j(\lambda) = \tau_0 + j \times D \times L \times (\lambda - \lambda_0) \quad (1.7)$$

де D - величина хроматичної дисперсії першого порядку, τ_0 величина групової затримки, загальна для всіх серцевин.

Величина затримки на певній довжині хвилі опишеться як:

$$T_k = \tau_{j+1}(\lambda_k) - \tau_j(\lambda_k) = D \times L \times (\lambda_k - \lambda_0) \quad (1.8)$$

Величина затримки пов'язана з конкретним значенням довжини хвилі. Наприклад, в нижній частині рисунка 1.11 показано розподіл величини затримки для довжини хвилі λ_1 . У цьому випадку лінія затримки формує N копій вхідного сигналу з затримкою $0, T_1, 2T_1 \dots (N-1)T_1$. Щоб змінити величину введеної затримки необхідно змінити довжину хвилі лазера. На рисунку 1.10 показано, як змінюється величина введеної затримки від T_1 до T_2 , при зміні довжини хвилі джерела від λ_1 до λ_2 .

Аналіз представлених робіт показує, що радіофотонні системи опитування для волоконно-оптичних датчиків ВБР або вимагають складної оптичної апаратури при WDM мультиплексуванні, або тривалого періоду опитування при TDM мультиплексуванні, або складних конструкцій самих сенсорів для організації паралельного опитування, причому з формуванням безлічі вимірювальних каналів. У разі застосування адресних ВБР наведених недоліків можна було б уникнути.

При послідовному включенні ВБР використовуються складні інтерферометричні системи опитування для ВБР. Всі вони засновані на застосуванні електронного векторного аналізатора спектра, як кінцевого пристрою вимірювань. На рисунку 1.12 показана РФСС опитування на базі інфтерферометра Фабрі-Перо і Майкельсона.

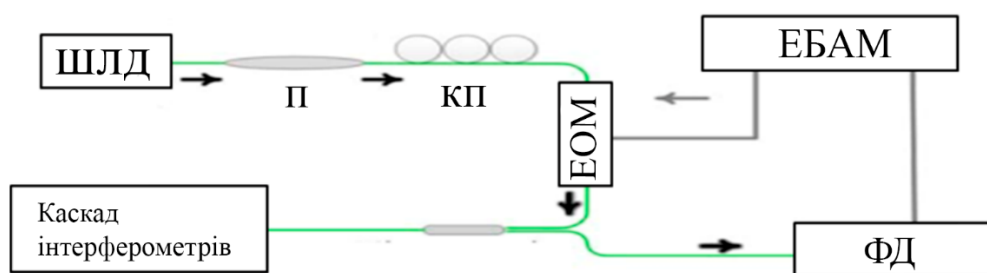


Рисунок 1.12 — РФСС на базі інфтерферометра Фабрі-Перо і Майкельсона: ШЛД - широкопasmовий лазерний діод, П - поляризатор, КП - контролер поляризації, ЕОМ - електрооптичний модулятор, ЕВАС - електронний векторний аналізатор спектру, ФД – фотодетектор

Оптичне випромінювання від широкосмугового лазерного діода (ШЛД) модулюється по амплітуді СВЧ сигналом (надходить з електронного векторного аналізатора мереж - ЕВАМ) за допомогою електрооптичного модулятора (ЕОМ). Для отримання необхідної глибини модуляції після модулятора розташовані поляризатор і контролер поляризації. Модульоване оптичне випромінювання з виходу ЕОМ надходить на розгалужувач 2x1 (виступаючий так само в ролі циркулятора). Оптичне волокно від каскаду інтерферометрів з'єднується з перехідником за допомогою зварювання. У пристрої можуть бути використані інтерферометри Фабрі-Перо і Майкельсона. Відбите від двох плечей інтерферометра оптичне випромінювання детектується фотодіодом. Отриманий електричний сигнал надходить на другий порт ЕВАМ, який генерує ЛЧМ сигнал НВЧ діапазону і вимірює параметр S21 системи.

На рисунку 1.13, а представлено пристрій для опитування з ВБР на основі фотонного фільтра на базі інтерферометра Саньяка.

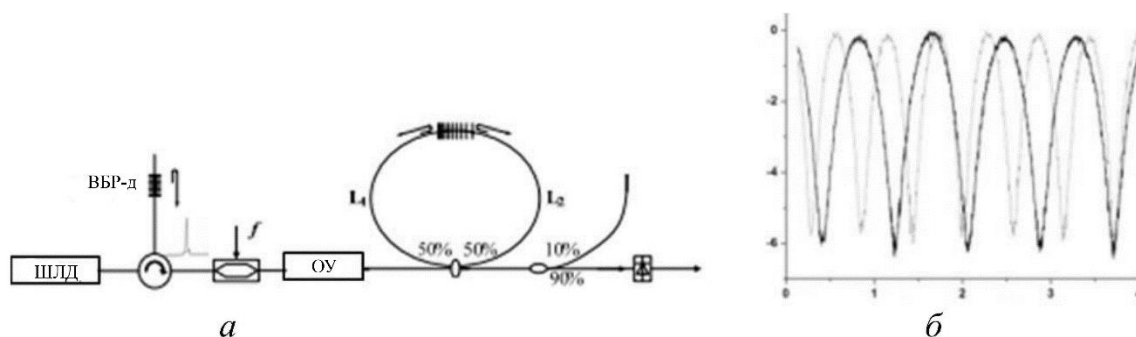


Рисунок 1.13 — Пристрій опитування ВБР на основі фотонного фільтра з інтерферометром Саньяка (а): ШЛД - широкосмуговий лазерний діод, М - модулятор, ЕВАМ - електронний векторний аналізатор спектру, БФД - балансові фотодетектори, $\tau_1 \dots \tau_n$ - керовані лінії затримки, $d_1 \dots d_N$ - датчики; відгук фільтра - (б)

Вихідний сигнал такої структури типової для фотонних режекторного фільтрів і може бути описаний, як:

$$P_e = P_0 = \left[1 + m \times \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \times \sin(2\pi ft + \varphi_0) \right] \quad (1.9)$$

де P_0 - потужність оптичного сигналу, відбитого від ВБР датчика, m, f, φ_0 - глибина модуляції ММЦ, частота модуляції і фаза сигналу на виході фотодіода відповідно. Член $\Delta\varphi = 4\pi \times f \times n_{eff} \times (L_1 - L_2 + 2 \times z - l)/c$ - різниця фаз модульованого сигналу в двох плечах інтерферометра Саньяка, L_1 і L_2 - довжина плечей, n_{eff} , c і l - показник заломлення, швидкість світла у вакуумі і довжина ВБР відповідно; z - ділянку ВБР, де відбувається віддзеркалення світла, визначається центральної довгою хвилі датчика. Відгук фільтра представлений на рисунку 1.13, б, коли довжина плечей інтерферометра різна.

Коли довжина хвилі ВБР датчика змінюється, змінюється положення його спектрального відгуку, що призводить до зміщення передавальної функції фотонного фільтра. Оскільки оптичне вивчення модулювати радіосигналом фіксованої частоти, відбувається зміна його амплітуди при зміщенні ВБР датчика.

Інтерферометрія зі зрушенням по частоті FSI дозволяє витягти з інформаційного сигналу дані, як про місце розташування, так і коефіцієнті відбиття кількох, навіть спектрально перекриваються, решіток. На відміну від методів, наведених вище, FSI ґрунтується на інтерференції Саньяка. Вимірюваним параметром є різниця фаз між двома складовими зонduючого випромінювання, що пройшли однаковий шлях в волокні і мають однакову частоту, зрушену щодо несе випромінювання, але отримали дане зміщення в різних точках свого шляху. Місцезнаходження датчика визначається зі співвідношення, що зв'язує зміна фази і величини зсуву складових по частоті.

Двочастотне або полігармонічне випромінювання не було застосовано у інтерферометричному методі FSI. Переваги його використання при формуванні по методу амплітудно-фазового перетворення оптичної несучої Ільїна-Морозова полягає в можливості зменшення впливу несучої частоти на постійну складову інтерференційного сигналу, а виділення кожної зі складових за допомогою фільтрів дозволить зняти обмеження методу FSI на однаковість коефіцієнта

відображення датчика в усій смузі частот сканування модулятора. Формування полігармонічного випромінювання на основі комб-генератора дозволить замінити широкосмуговий низько когерентне джерело, а в сумі з зазначеними вище змінами зменшити перехресні перешкоди між датчиками, підвищити роздільну здатність, збільшити відношення сигнал / шум і діапазон вимірювань.

При такій реалізації дотримуються вимоги єдиного поля по універсальності елементної бази фізичного рівня, транспортних магістралей і єдності модулів програмного забезпечення волоконно-оптичних сенсорних мереж. Вартість типового двокомпонентного FSI інтеррогатора для волоконно-оптичних датчиків буде в 3-5 разів менше вартості типової широкосмугової системи спектрального аналізу, наприклад, на оптичному аналізаторі спектру EXFO. Може бути використаний один лазерний випромінювач і сформований комбгенератор на кілька каналів вимірювань. Для їх поділу може бути використана впорядкована волноводная решітка і окремий фотоприймач на кожен з її каналів. У кожному каналі може бути встановлено до 5-10 однотипних датчиків. Розглянемо роботу двокомпонентного FSI інтеррогатора для волоконно-оптичних датчиків і результати модельного експерименту. На рисунку 1.14 показана структурна схема двокомпонентного FSI інтеррогатора для волоконно-оптичних датчиків.

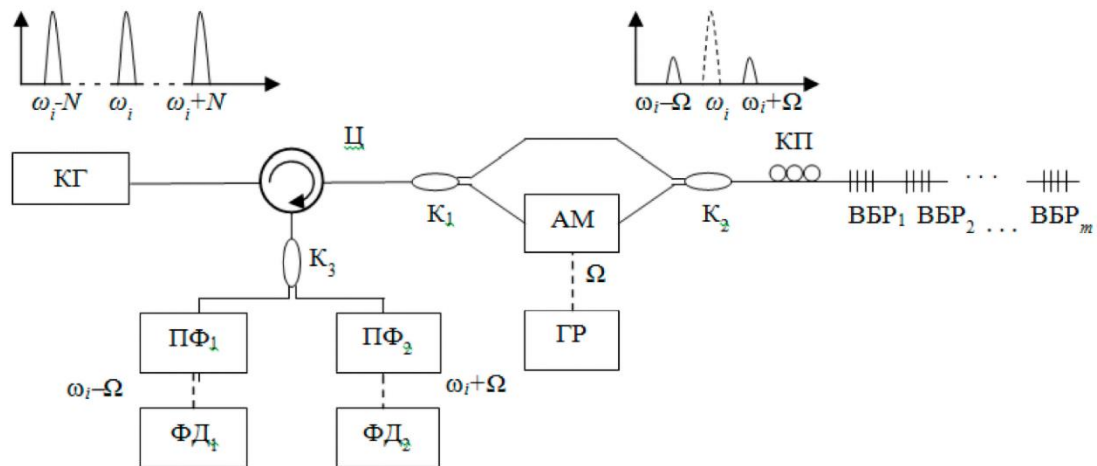


Рисунок 1.14 — Структурна схема двокомпонентного FSI інтеррогатора з комб-генератором (КГ), циркулятором (Ц), амплітудним модулятором (АМ), керованим генератором радіочастоти (ГР), Каплер (К), контролером поляризації (КП), смуговими фільтрами (ПФ), фотодетекторами (ФД) і декількома m слабковідбиваючими ВБР

Кожна спектральна складова $E_\omega(t)$ надходить на послідовність решіток і приймається фотодетекторами, проходячи шлях однакової довжини, але отримуючи модулюючий вплив в різних місцях зазначеного шляху. У першому випадку оптичне випромінювання проходить по верхньому плечу інтерферометра Маха-Цендера, відбивається від решіток, модулюється в амплітудному модуляторі АМ синусоїдальним радіочастотним сигналом на частоті Ω в нижньому плечі інтерферометра Маха-Цендера і надходить на ФД через ПФ. У другому випадку оптичне випромінювання проходить по нижньому плечу інтерферометра Маха-Цендера, модулюється амплітудним модулятором АМ синусоїдальним радіочастотним сигналом на частоті Ω , відбивається від решіток, і надходить на ФД через ПФ. Внесок інтерференційних складових E_ω є адитивним, що означає, що навіть некогерентний джерело випромінювання може призводити до подібної інтерференції.

Високу просторову роздільну здатність і більший діапазон вимірювань може бути досягнутий збільшенням частоти сканування і підбором оптимального кроку сканування.

Зауважимо, що модулятор повинен працювати в двонаправленому режимі. Електрооптичні модулятори (ЕОМ) є двонаправленими, однак, на високих частотах зростає різниця в швидкості поширення світла в зворотному напрямку і радіочастотного сигналу - в прямому, що знижує ефективність модуляції. Це головний фактор, що обмежує частоту сканування і, отже, просторову роздільну здатність.

Чутливість системи і діапазон виміру залежать від співвідношення сигнал/шум детектуючого сигналу, який, в свою чергу, залежить від втрат в системі і ефективності модуляції ЕОМ. В сигнал, відбитий від найбільш віддалених датчиків, також вносяться шуми ближніх датчиків.

При потужності джерела в кілька міліват, можна детектувати датчики з дозволом за коефіцієнтом відбиття менш 0.1% і динамічним діапазоном вимірювання 10-20 дБ.

Проведений аналіз робіт показав, що при побудові РФСС для послідовної інтеррогації ВБР використовується складне інтерферометричного обладнання. Найкращими характеристиками володіє двокомпонентний інтерферометр зі зміщенням частоти. Оскільки показано, що джерелом випромінювання в такому інтерферометрі може бути навіть некогерентний джерело, видалення ММЦ і заміна решіток на адресні істотно дозволить знизити вартість реалізації такої РФСС.

Основний недолік розглянутих вище РФСС, як для паралельної, так і послідовної інтеррогації ВБР, полягає у відсутності адресності ВБР. Це призводить до необхідності побудови складних систем зондування і опитування для волоконно-оптичних датчиків, як налаштованих на різні довжини хвиль ВБР, так і об'єднані в групи по загальній центральній довжині хвилі з використанням зазначених вище інтерферометричних технологій.

РОЗДІЛ 2

КОНЦЕПЦІЯ ФОРМУВАННЯ АДРЕСНИХ ВОЛОКОННИХ БРЕГГІВСЬКИХ СТРУКТУР

Складність і висока вартість мультиплексування Квод досі є основним обмеженням для широкого впровадження сенсорних систем як розподіленого і квазі-розподіленого, так і точкового типів. У цьому розділі запропоновано новий метод мультиплексування, який використовує переваги як широкосмугових оптико-електронних, так і двочастотних або полігармонічних радіофотонних сенсорних систем. Від перших узятий найпростіший широкосмуговий випромінювач, але не використовується складна і дорога система спектрометрії для визначення центральної довжини хвилі ВБР. Від друге взята система реєстрації на частоті биття між двома складовими, але не використовується дорога система генерації дво- або полігармонічних систем зондування. Параметр мультиплексування визначається частотою розносу між вікнами прозорості ВБР, наприклад, з двома симетричними фазовими π -зрушеннями ДСФС, або між двома ідентичними надвузькосмуговими ВБР, яка відрізняється на певну величину у кожного з Квод і, власне, формує його адресу. При цьому структури на основі ВБР залишаються чутливим елементом систем. Таким чином, формується новий клас чутливих елементів - адресні волоконні бреггівські структури (АВБС).

Запропонований підхід є радіофотонним і суттєво відрізняється від принципів оптичного кодового мультиплексування, за допомогою якого також намагаються створити кодовані (адресні) сенсорні системи. Основна відмінність радіофотонного підходу - вимоги до головного елементу сенсорної системи - АВБС, які полягають в тому, щоб оптичний відгук від неї містив би, як мінімум, дві вузькосмугові компоненти в оптичному діапазоні. Різниця між спектральним положенням компонент становить частоту, що лежить в радіочастотній області електромагнітних хвиль, і служить адресою (кодом) АВБС, а її амплітудні і частотні параметри несуть інформацію про вимірюваний фізичному полі.

Обрано два теоретичних підходи до формування АВБС з інваріантним відстанню між її елементами при накладенні вимірюваних полів. Першим підходом є використання ВБР з двома симетричними фазовими π -зрушеннями (2 π -ВБР), а другим - використання двох ідентичних 2 λ -ВБР).

Для моделювання 2 λ -ВБР використовується комплексний метод матриць передачі і пов'язаних мод. Дві ідентичні 2 λ -ВБР отримані через рішення зворотної задачі синтезу профілю показника заломлення (ПЗ) ВБР методом зворотного перетворення Фур'є. Визначено характерні параметри цих структур і дано аналіз функціоналів для їх центральної довжини хвилі, адресної частоти, ширини смуги пропускання вікон прозорості 2 π -ВБР або надвузькосмугових решіток 2 λ -ВБР. На прикладі 2 π -ВБР показано поведінку решіток при зміні різних параметрів її ПЗ, як амплітудно-фазових, так і геометричних. Наведено результати моделювання АВБС в програмному середовищі OptiGrating 4.2.2. Наведено їх амплітудно-частотні характеристики при зміні коефіцієнта зв'язку мод. Показана можливість отримання 2 π -ВБР як з гаусовим профілем, так і з плоскою вершиною.

2.1 Адресна волоконна брегівська структура на основі ВБР з двома симетричними фазовими π -зрушеннями (2 π -ВБР)

ВБР має характерний для неї спектр відображення і використовується в як чутливий елемент Квод або частотних фільтрів.

Спектральна вибірковість відображення ВБР обумовлена періодичним по довжині зміною показника заломлення серцевини волокна і обумовлена дифракцією на цих періодичних оптичних неоднорідностях.

ВБР з двома симетричними фазовими π -зрушеннями привертає увагу розробників ВОД, оскільки вона достатня легка у виробництві і може бути виготовлена за допомогою фазової маски з мінімально ставляться до параметрів модуляції коефіцієнта заломлення і рівномірності характеристик його профілю. АВБС 2 π -ВБР являє собою три послідовно розташовані ВБР з фазовими π -зрушеннями між ними. Широкопasmові лазерне випромінювання, що пройшло

через 2π -ВБР, формуватиме двочастотних випромінювання в області вікон прозорості, відповідних спектральному розташуванню двох симетричних фазових π -зрушень поблизу центральної довжини хвилі центральної решітки.

Характерною особливістю 2π -ВБР є інваріантність відстані між фазовими π -зрушеннями в амплітудно-частотній площині при накладенні на 2π -ВБР деформаційних або температурних полів. Це дозволяє використовувати характерну особливість фазових зрушень для формування адреси при використанні 2π -ВБР, як різновиду АВБС.

2.1.1 Методика опитування адресної 2π -ВБР структури

Позначимо вимоги до вимірювальної системи і профілем 2π -ВБР, які дозволять використовувати 2π -ВБР структуру (або масив 2π -ВБР структур) в Як чутливі елементи вимірювальної системи, побудованої на їх основі. По-перше, необхідно забезпечити можливість опитування характерною особливості 2π -ВБР структури (частот фазових π -зрушень) на всьому діапазоні вимірювань. По-друге, щоб в область дослідження потрапляв світловий відгук тільки від частот фазових π -зрушень 2π -ВБР.

Виконання першої вимоги забезпечимо за рахунок застосування широкої 2π -ВБР структури з формою профілю близькою до прямокутної. Друга вимога методу полягає в тому, щоб в область опитування потрапляв світло тільки від частот двох фазових π -зрушень 2π -ВБР структури. Використання джерела лазерного випромінювання з частотним діапазоном рівним діапазону вимірювань або використання смугового оптичного фільтра, що пропускає тільки необхідний діапазон частот, дозволить уникнути попадання стороннього, - немає від частот фазових π -зрушень 2π -ВБР структури, - випромінювання в область аналізу сигналу. Це умова необхідна для того, щоб на всьому діапазоні вимірювань в інтервал, рівний діапазону зміни бреггівськими частоти датчика, потрапляло

випромінювання тільки від частот фазових π -зрушень 2π -ВБР. Таким чином, виконується і друга половина першого вимоги методу.

Покажемо на основі математичного синтезу форми 2π -ВБР, що при виконанні викладених вище вимог методу стає доступна технологія опитування 2π -ВБР (або масиву 2π -ВБР) і визначення її центральної довжини хвилі без застосування дорогих оптоелектронних компонент.

2.1.2 Моделювання адресному 2π -ВБР структури комплексним методом матриць передач і зв'язку мод

Існує кілька поширених методів моделювання характеристик 2π -ВБР, серед них - методи пов'язаних мод, матриць Джонса і метод матриць передач. Метод пов'язаних мод часто застосовується для опису синтезу однорідних 2π -ВБР через свою простоту. Матричні методи використовуються у випадках, коли решітка має неоднорідну структуру. Зокрема, для моделювання характеристик 2π -ВБР структур добре зарекомендував себе метод, заснований на побудові матриць передач. Згідно з методом матриць передач 2π -ВБР структура розбивається на M однорідних секцій (для ВБР з двома фазовими π -зрушеннями $1 \leq m \leq M$, $M = 5$), для яких визначаються коефіцієнти відображення і передачі амплітуди поширюються в зі направленому і зустрічному напрямках мод після проходження m -ої секції [9]. Структуру 2π -ВБР можна уявити як сукупність трьох однорідних волоконних брегговських решіток, розташованих одна за одною, як це показано на рисунку 2.1. Для кожної з секцій (S1-S3) описується матриця передачі, а для опису фазового зсуву вводиться спеціальна матриця S_ϕ , що визначає фазовий зсув.

Матриця передачі кожної секції може бути описана виразом:

$$S(\lambda, h) = \begin{bmatrix} \frac{e^{iq(\lambda)h} - r(\lambda)^2 e^{-iq(\lambda)h}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{r(\lambda)(e^{-iq(\lambda)h} + e^{iq(\lambda)h})}{1 - r(\lambda)^2} \\ \frac{r(\lambda)(e^{-iq(\lambda)h} - e^{iq(\lambda)h})}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{e^{-iq(\lambda)h} - r(\lambda)^2 e^{iq(\lambda)h}}{1 - r(\lambda)^2} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де h - довжина сегмента з ділянкою ВБР.

Параметри контуру описуються співвідношеннями (2.2):

$$r(\lambda) = \frac{q(\lambda) - \sigma\beta(\lambda)}{\kappa}, q(\lambda) = \sqrt{\sigma\beta(\lambda)^2 - \kappa^2},$$

$$\sigma\beta(\lambda) = 2\pi \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right), \kappa = \pi \frac{\sigma n}{\lambda_{B1}}, \sigma n = \frac{n_{mod}}{n_{eff}},$$

де, λ_B - центральна довжина хвилі ВБР, κ - постійна поширення, σn - індекс модуляції коефіцієнта заломлення, n_{mod} - величина наведеного показника заломлення ВБР, n_{eff} - ефективний показник заломлення серцевини волокна. Для опису фазового π -зсуву введемо спеціальну матрицю S_φ виду:

$$S_\varphi(\varphi) = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

де φ - величина фазового зсуву.

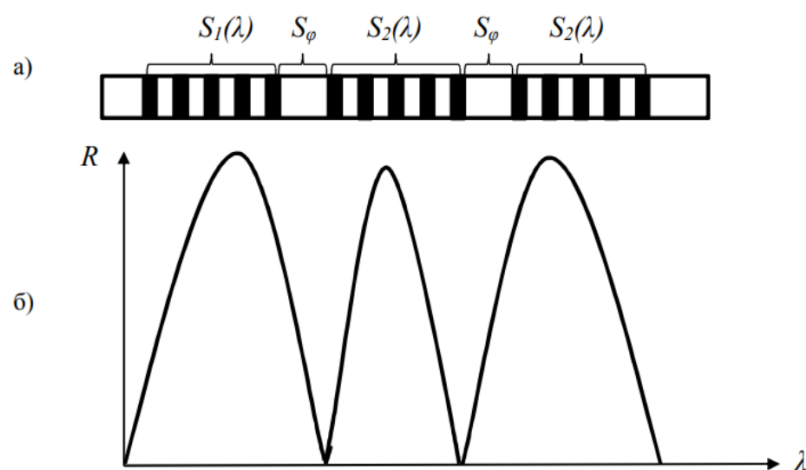


Рисунок 2.1 - ВБР з двома фазовими неоднорідностями: структура 2 π -ВБР (а), схема спектральної характеристики відображення (б)

Результуюча матриця, що описує 2 π -ВБР структуру, запишеться в вигляді твору матриць передачі кожної секції і двох матриць фазових зрушень:

$$S_{res}(\lambda) = S(\lambda, h_1) \times S_{\varphi}(\varphi) \times S(\lambda, h_2) \times S_{\varphi}(\varphi) \times S(\lambda, h_3), \quad (2.4)$$

де h_1 , h_2 і h_3 - довжини першого, другого і третього сегментів, відповідно.

Характерний спектр пропускання 2π -ВБР структури, описаний у вигляді (2.4) з матрицями переходу (2.3) буде мати вигляд (2.5):

$$T_{res}(\lambda) = \left(\left| S_{res}(\lambda)_{1,1} - \frac{S_{res}(\lambda)_{1,2} \times S_{res}(\lambda)_{2,1}}{S_{res}(\lambda)_{2,2}} \right| \right)^2. \quad (2.5)$$

На рисунку 2.2,а наведено характерний спектр пропускання волоконної бреггівської решітки з двома фазовими π -зрушеннями. Моделюючи вхідні параметри, можна домогтися зміни форми спектра пропускання 2π -ВБР структури, щоб забезпечити її форму, яка задовольняла б вимогам методу радіофотонної адресного інтеррогації 2π -ВБР структур, наприклад, рисунок 2.2, б.

Вхідними параметрами для моделювання 2π -ВБР структури є: період ВБР, Λ , м; центральна довжина хвилі ВБР, λ_B , м; наведений показник заломлення ВБР, n_{mod} ; ефективний показник заломлення ВБР, n_{eff} ; довжини однорідних ділянок ВБР $h_1: h_2: h_3$, м; і величини фазових зрушень, вимірювані в радіанах.

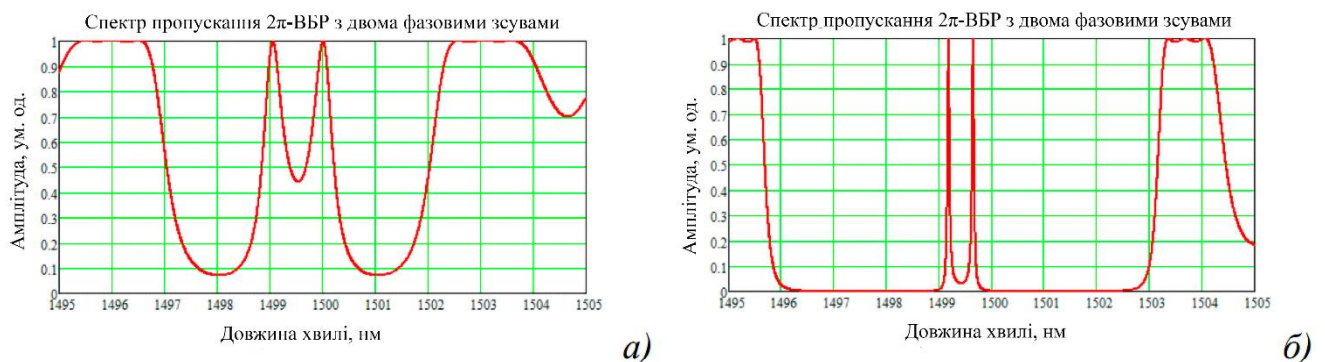


Рисунок 2.2 — Спектр пропускання 2π -ВБР структур зі слабким - а) і сильним зв'язком мод - б)

Підбираючи конкретні параметри моделювання, і аналізуючи отриманий спектр 2π -ВБР структури, можна сформулювати будь-який наперед необхідний в амплітудно-частотній площині її профіль.

Покажемо технічну можливість формування 2π -ВБР структури з широкою формою контуру і прямокутною формою профілю в амплітудно-частотній площині. Підбираючи довжини однорідних ділянок, задаючи величину фазового зсуву і змінюючи величину наведеного показника заломлення можна домогтися того, щоб форма 2π -ВБР структури в амплітудно-частотній площині підходила під вимоги методу радіофотонного асиметричного адресного опитування АВБС, реалізованого на основі 2π -ВБР структур.

2.1.3 Результати чисельного моделювання адресної 2π -ВБР структури

Для моделювання 2π -ВБР з двома фазовими зрушеннями були обрані вихідні параметри, наведені в таблиці 2.1, які задовольняють вимогам методу опитування 2π -ВБР з широкою спектральною формою і з невеликим розносом частот між фазовими π -зрушеннями.

Спектр пропускання 2π -ВБР з параметрами, наведеними в таблиці 2.1, показаний на рисунку 2.2, б.

Таблиця 2.1 — Вихідні дані для побудови моделі 2π -ВБР значення

Параметр	Значення
Період ВБР, Λ , м	5.18938×10^{-7}
Центральна довжина хвилі ВБР, λ_B , м	1.499×10^{-6}
Наведений показник заломлення ВБР, n_{mod}	50×10^{-4}
Ефективний показник заломлення ВБР, n_{eff}	1.4447
Довжина однорідних ділянок ВБР $h_1:h_2:h_3$, м	$3.3 \times 10^{-4}:3.3 \times 10^{-4}:3.3 \times 10^{-4}$
Величина фазового зсуву, рад.	$\pi/2$

Як можна бачити з малюнка 2.2, б, рознос частот фазових зрушень 2π -ВБР складає близько 500 пм (62.5 ГГц), а спектральна ширина самої 2π -ВБР близько 7 нм.

Ці параметри забезпечують можливість вимірювань за допомогою адресного 2π -ВБР структури в діапазоні, як мінімум ± 2 нм без захоплення в область опитування випромінювань від бічних спектральних складових.

Такі параметри 2π -ВБР досягаються за рахунок великого значення наведеного показника заломлення (близько 50×10^{-4} м) і довжин сегментів ВБР (порядку 3.3×10^{-3} м), що входять до складу адресному 2π -ВБР структури.

Змінюючи параметри моделювання можна отримати адресні 2π -ВБР структури з різним наперед заданою формою і з конкретними адресними розносили частот між двома фазовими π -зрушеннями 2π -ВБР структури.

2.2 Адресна волоконна бреггівська структура на основі двох ідентичних надвузькосмугових решіток (2λ -ВБР)

Що володіють численними перевагами ВБР залучили значний інтерес розробників в різних оптичних системах, включаючи системи зв'язку зі спектральним і кодовою ущільненням (WDM і OCDMA), а також ВОСС і РФСС.

При цьому в різних системах потрібно застосування різних по спектральних характеристиках решіток. Наприклад, прямокутні решітки можуть бути розроблені для реалізації смугового фільтра з плоскою вершиною і вузькою смугою пропускання. Лінійно змінюються фронти і проста трикутна ВБР можуть знайти застосування в системах визначення центральної довжини хвилі і в датчиках з особливими умовами експлуатації, наприклад, для кліматичних випробувань. Зазначені ВБР мають свої особливі переваги. Серед різних методів синтезу ВБР перетворення Фур'є (ПФ) успішно застосовується в випадках, коли

визначальними функціями є період і глибина модуляції показника заломлення волокна.

Як правило, перетворення Фур'є складається з визначення параметрів амплітуди і фази, які можуть бути розділені і нанесені на серцевину волокна незалежно. Ідея освіти довільної спектральної форми ВБР заснована на тому факті, що коефіцієнт модуляції ВБР є зворотним Фур'є -Перетворення спектра відбиття решітки. Профіль очікуваного спектра можна приблизно описати математично функцією, наприклад, трикутника (рисунок 2.12).

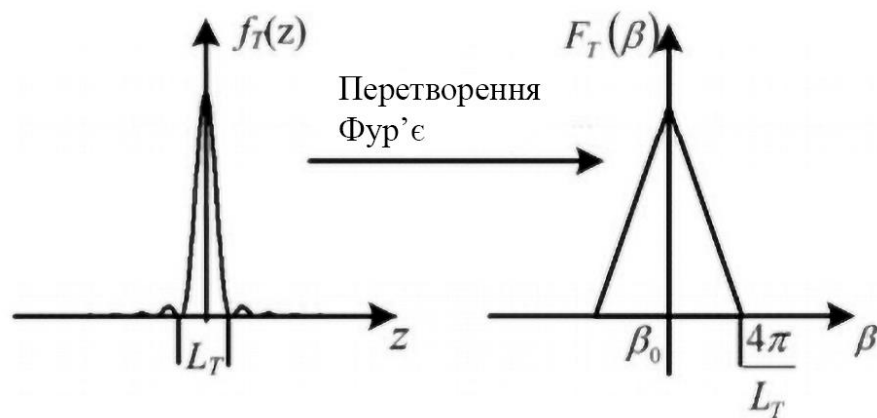


Рисунок 2.3 — Схематичне уявлення перетворення Фур'є для трикутної форми спектра ВБР

Зворотним перетворенням Фур'є можна задати амплітуду для визначення коефіцієнта модуляції. Як правило, після перетворення Фур'є отримаємо дискретну фазу, також можемо побудувати фазову модуляцію решітки уздовж осі, яка є оптичною віссю в волокні. Таким чином, зв'язок між профілем контуру ВБР і обвідної коефіцієнта модуляції показника заломлення волокна виражається співвідношенням (2.6):

$$F(z)\exp(j\theta) \int_{-\infty}^{\infty} F_{\beta} \exp(j\beta z) d\beta, \quad (2.6)$$

де β - просторової частота, z - координата вздовж довжини волокна, $F(z)$ - коефіцієнт модуляції обвідної, θ - фаза модуляції в ВБР (в симетричній

парної решітці це константа), F_β - спектральна форма. задавши спектральну форму F_β , зворотним перетворенням Фур'є отримуємо залежність інтенсивності модуляції $F(z)$ сигналу уздовж волокна.

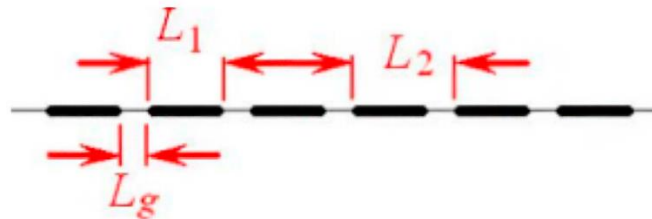


Рисунок 2.4 — Періодична АВБС

Розглянемо перетворення Фур'є для структур з періодичною модуляцією показника заломлення (рисунок 2.13). Кожна з решіток відокремлена ділянкою довжиною L_g . У загальному вигляді L_g можна розбити на дві складові: перша складова відповідає цілочисленному множнику m бреггівськими довжини хвилі, а що залишилася фази - α . Фазова затримка між двома решітками є твором величини α на даний множник:

$$\varphi_m = m \times \alpha. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт модуляції показника заломлення серцевини волокна може бути записаний у вигляді:

$$\Delta n(z) = \text{Re}\{\Delta n_0 f(z)\} = \{\Delta n_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} u(z - mL_2) \exp[j\beta_0 z + \phi_m]\}, \quad (2.8)$$

де $u(z)$ функція виду:

$$u(z) = \begin{cases} 1, & |z| \leq L_1/2 \\ 0, & |z| > L_1/2 \end{cases} \quad (2.9)$$

Перетворення Фур'є для функції $f(z)$ в (2.8) має вигляд:

$$F(\beta_0 + \beta) = F(\beta_0) \quad (2.10)$$

де: $Y(\beta) = 2\sin(\beta L_1/2)/\beta$, $\delta(\beta)$ - дельта-функція Дірака.

Якщо величина фазового провалу дорівнює π , можна отримати:

$$F(\beta_0 + \beta) = F(\beta_0 - \beta) \quad (2.11)$$

Приклад спектра Фур'є такої решітки представлений на малюнку 2.14.

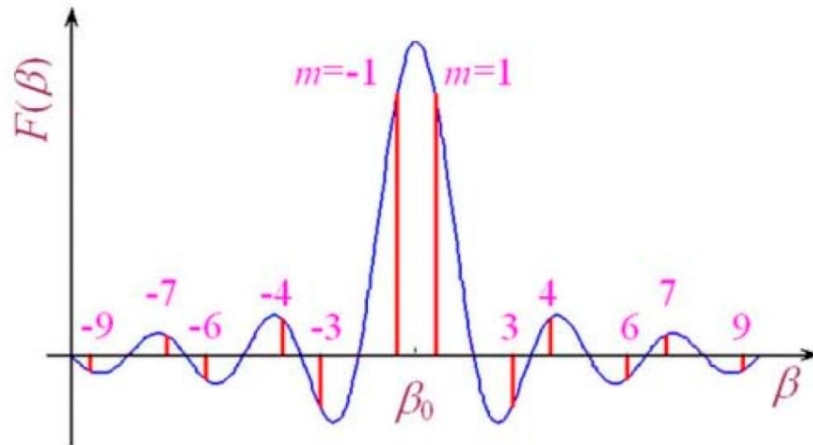


Рисунок 2.5 — Спектр Фур'є 2 λ -ВБР структури

Зі співвідношення (2.11) можна зробити висновки про симетричності коефіцієнтів Фур'є щодо β_0 , спектральні компоненти з коефіцієнтами $m = 1, 3, 4, \dots$ рівні компонентів $m = -1, -3, -4, \dots$, спектральні компоненти з коефіцієнтами $m = \pm 2, \pm 5, \pm 8$ пригнічені. Метод перетворення Фур'є є одним з найпростіших підходів моделювання 2 λ -ВБР, проте при великих коефіцієнтах відображення решітки даний метод вносить значні помилки.

Запишемо матрицю передачі для 2 λ -ВБР структури у вигляді:

$$\begin{bmatrix} R_{L/2} \\ S_{-L/2} \end{bmatrix} = F_m G_m F_{m-1} G_{m-1} \dots F_i G_i \dots F_l G_l \begin{bmatrix} R_{-L/2} \\ S_{L/2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

З рисунка 2.14 ми бачимо, що для отримання двох ідентичних ВБР, які формують 2 λ -ВБР, фазовий зсув має дорівнювати π ($\varphi_i = \pi$) і, отже:

$$L_g = \frac{L_1}{2} + \frac{\Lambda}{2} = \frac{L_1}{2} + (1 + \Delta t) \frac{\Lambda}{2}, \quad (2.13)$$

де $\Delta t \ll 1$ - величина шумового впливу.

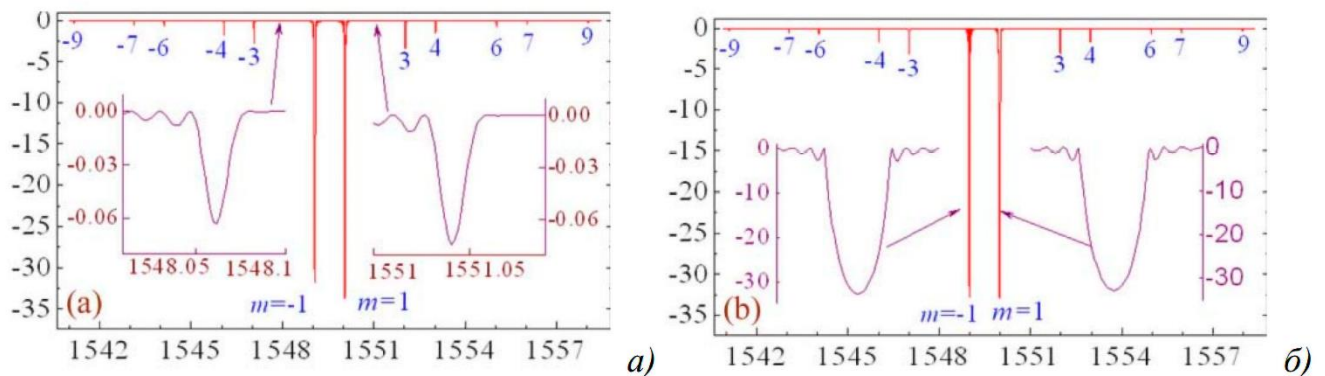


Рисунок 2.6 — Спектр пропускання 2 λ-ВБР: а) - до і б) - після впливу

Як можна бачити з рисунка 2.14, застосування методу пов'язаних мод спільно з перетворенням Фур'є дозволяє більш точно описати 2 λ-ВБР при великих коефіцієнтах відображення 2λ-ВБР.

2.2.1 Методика опитування адресних 2 λ-ВБР структур

Позначимо вимоги до вимірювальної системи і профілем 2 λ-ВБР, які дозволяють використовувати 2 λ-ВБР структуру (або масив 2 λ-ВБР структур) в якості чутливих елементів вимірювальної системи, побудованої на їх основі [151-156]. По-перше, необхідно забезпечити можливість опитування характерній рисі 2 λ-ВБР структури - частот двох ідентичних понад вузькосмугових ВБР - у всьому вимірювальному діапазоні. По-друге, щоб в область дослідження потрапляв світловий відгук тільки від адресних частот 2 λ-ВБР структури.

Виконання першого і другого вимоги забезпечимо за рахунок побудови вимірювальної оптико-електронної схеми. Включимо в вимірювальну схему джерело лазерного випромінювання з частотним діапазоном, рівним вимірювального діапазону і застосуємо смуговий оптичний фільтр, що пропускає тільки необхідний діапазон частот, що дозволить уникнути попадання стороннього

– не від двох адресних частот 2λ -ВБР структур, - випромінювання в область аналізу сигналу.

В якості смугового фільтра з успіхом може бути використана широка волоконна бреггівська решітка з формою близькою до прямокутної в амплітудно-частотній площині, накладена безпосередньо після джерела лазерного випромінювання. Технічна можливість моделювання ВБР із заданою формою спектра добре викладена в роботах [24, 57, 66, 71, 81]. Таким чином, виконується і друга половина першого вимоги методу. Покажемо на основі математичного синтезу форми 2λ -ВБР, що при виконанні викладених вище вимог методу стає доступна технологія опитування 2λ -ВБР (або масиву 2λ -ВБР) і визначення її бреггівської частоти (Центральної довжини хвилі) без застосування дорогих оптоелектронних компонент і складних систем обробки сигналу.

2.2.2 Моделювання адресному 2λ -ВБР структури

Коефіцієнт відображення ВБР може бути представлений таким співвідношенням:

$$n(z) = n_0 + \Delta n_{AC}(z) \exp\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} j\right) + \Delta n_{DC}(z), \quad (2.14)$$

де n_0 - ефективний коефіцієнт заломлення; Δn_{AC} і Δn_{DC} - коефіцієнти модуляції показника заломлення; Λ - період решітки. Для змінної складової справедливо вираз:

$$\Delta n_{AC}(z) = [f(z) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(z - iL_s) g(z)] \exp\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} j\right), \quad (2.15)$$

де $f(z)$ - функція опитування; $g(z)$ - функція профілю ВБР; L_s - період опитування.

Піддавши функцію $\Delta n_{AC}(z)$ перетворенню Фур'є, отримаємо:

$$K(\beta) = F(\beta) \left[G(\beta) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(\beta - \beta_0 - \frac{2\pi}{L_s} i) \right], \quad (2.16)$$

де $\beta_0 = 2\pi/\Lambda$; $F(\beta)$ і $G(\beta)$ - Фур'є-функції $f(z)$ і $g(z)$, відповідно;

Якщо фазовий зсув прикладений між кожною досліджуваною ВБР, то результуючий спектр буде:

$$K(\beta) = F(\beta) \left[G(\beta) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta\left(\beta - \beta_0 - \frac{2\pi}{L_s} i - \frac{\alpha}{L_s}\right) \right], \quad (2.17)$$

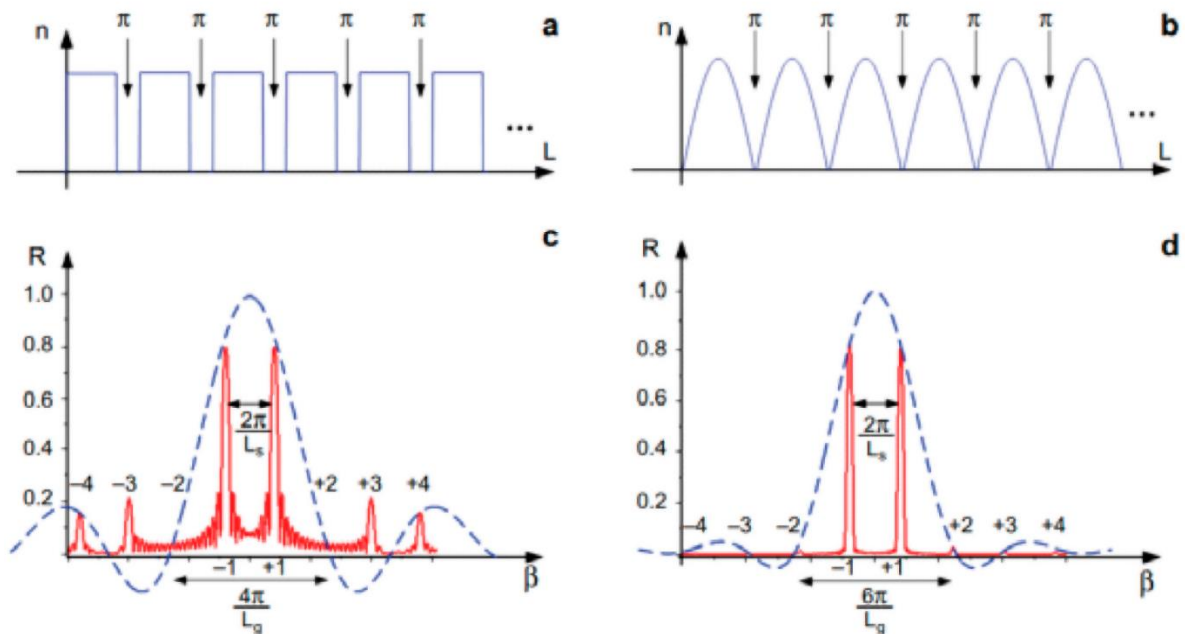


Рисунок 2.7 — Моделювання ВБР прямокутним - а) і косинусним - б) сигналами і відповідні спектри відображення - с) і д)

При $\alpha = \pi$, канали будь-яких порядків симетричні β_0 . У разі якщо функція вибірки є прямокутною з періодом $2/3$, спектральні компоненти перетворення Фур'є при $m = 1$ ідентичні компонентам при $m = -1$. Однак, спектральні компоненти більш високих порядків все ще присутні, що негативно позначається на параметрах 2λ -ВБР структури.

При використанні ж косинусної функції вибірки з коефіцієнтом заповнення рівним одиниці і фазовим зрушенням рівному π , в вихідному спектрі

спостерігаються тільки дві компоненти. Косинусна функція вибірки і відповідне перетворення Фур'є може бути записано:

$$f_{cos}(z) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi z}{L_g}\right), & \text{при } -\frac{L_g}{2} \leq z \leq \frac{L_g}{2}, \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$F_{cos}(\beta) = \frac{\cos\left(\frac{\beta L_g}{2}\right)}{1 - \left(\frac{2\beta L_g}{\pi}\right)^2}, \quad (2.19)$$

де L_g - довжина ділянки решітки відповідного періоду функції вибірки.

При наявності фазового зсуву в решітці, зміна показника заломлення можна записати в наступному вигляді:

$$\Delta n = \frac{\Delta \varphi_{shift} \lambda}{4\pi L_{DC}}, \quad (2.20)$$

Де L_{DC} - довжина ділянки модуляції показника заломлення решітки.

На рисунку 2.17,а і 2.17,б представлено порівняння спектрів відбиття рівномірного фазового зсуву і дискретного. Повні довжини структур складають 2 і 30 мм, ділянку фазового зсуву - 0.5 мм, розташований в центрі АВБС.

Фізичні розміри фазового зсуву щодо повної довжини решітки значно впливають на форму вихідного спектра АВБС.

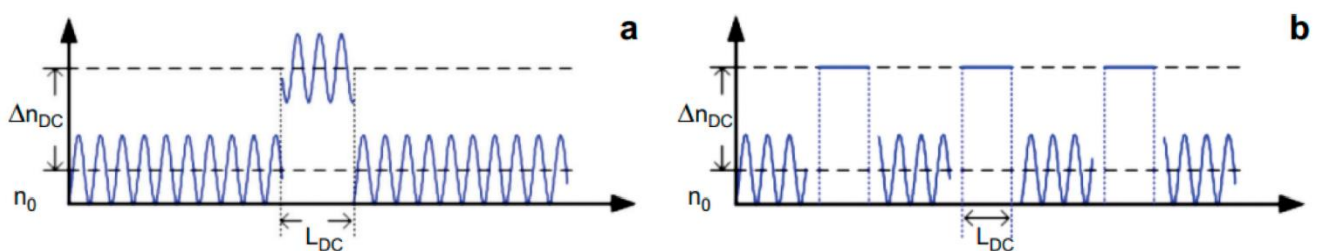


Рисунок 2.8 — Два види решіток з фазовим зрушенням: а) - рівномірний і б) – дискретний

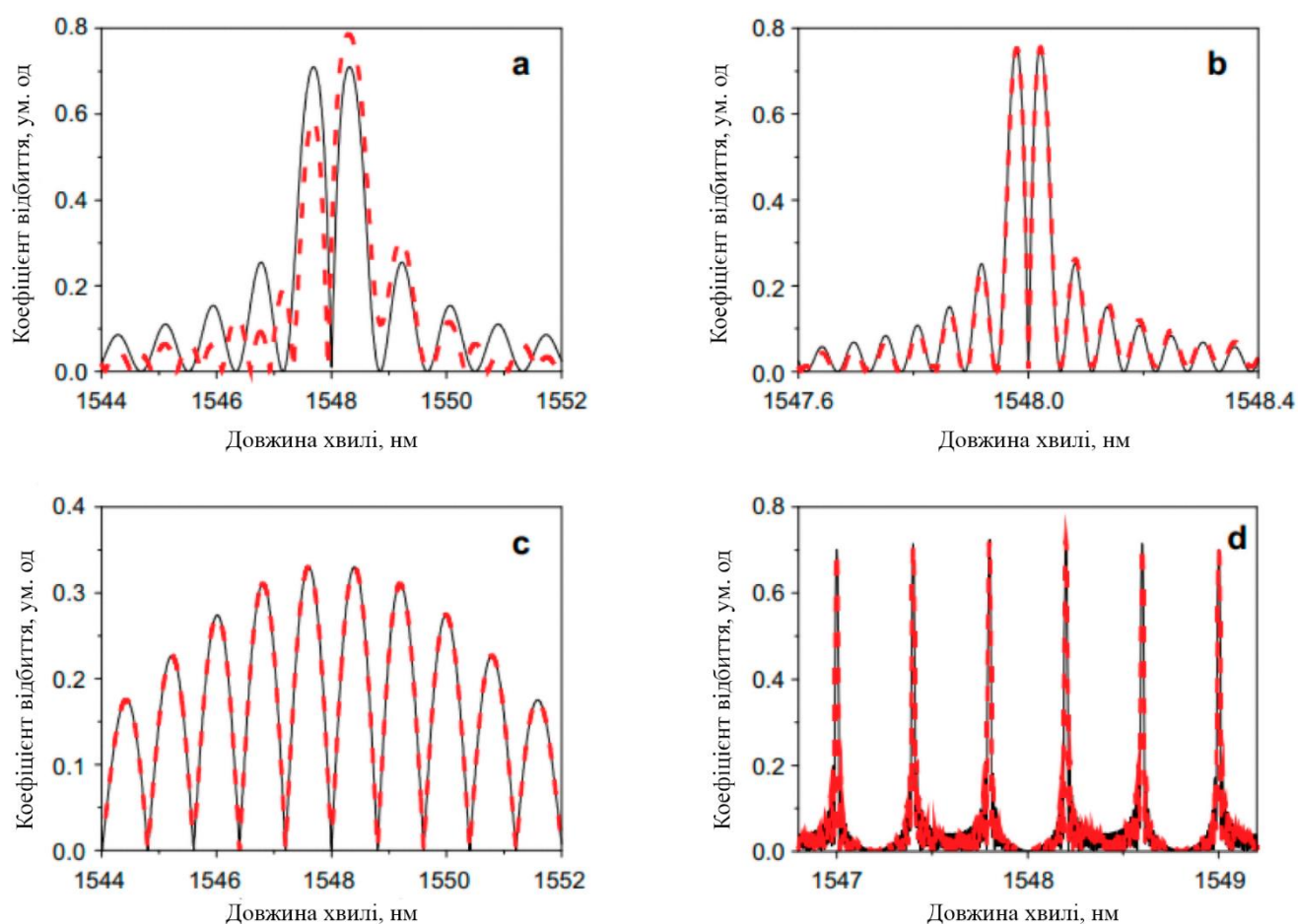


Рисунок 2.9 — Спектри відбиття рівномірного фазового зсуву АВБС довжиною: а) - 2 мм і б) - 30 мм; вибірки рівномірного фазового зсуву з довжинами: в) - 2 мм і г) - 60 мм. Суцільна - постійний фазовий зсув, пунктиром - дискретний

У разі якщо величина фазового провалу порівнянна з розмірами самої решітки, в короткохвильовій області спектра виникають бічні складові великої амплітуди. У разі, коли величина фазового провалу значно менше загальної довжини решітки, рівномірний фазовий зсув стає схожий на дискретний, а рівень бічних складових прямо пропорційно впаде. На практиці розміри фазового провалу обмежуються глибиною модуляції коефіцієнта відображення. Таким чином, існує компроміс між розмірами фазового зсуву і симетричністю профілю показника заломлення 2λ -ВБР структури.

На рисунках 2.18, в і 2.18, г представлено порівняння вибірки рівномірного фазового зсуву і дискретного. Повні довжини решіток становлять 2 і 60 мм, період вибірки 1 мм, функція вибірки має гауссівський профіль розподілу з шириною на напіввисоті 100 мкм. Розміри фазового провалу щодо повної ширини решітки не впливають на профіль показника заломлення відбитого спектру. Даний факт обумовлений тим, що постійний і змінний фазові зрушення рознесені і, отже, не залежать одне від одного.

Результати моделювання показують, що при малих розмірах фазового провалу (щодо загальної довжини 2λ -ВБР), постійне фазове зрушення може замінити дискретне.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ РАДІОФОТОНОЇ СИСТЕМИ ОПИТУВАННЯ АДРЕСНИХ ВОЛОКОННИХ БРЕГГІВСЬКИХ СТРУКТУР

3.1 Малосенсорні вимірювальні системи на основі адресних структур

3.1.1 Опитування адресної 2π -ВБР структури (проходження сигналу)

Розглянемо модель адресної 2π -ВБР структури широкої прямокутної форми. Запропонуємо найпростішу оптико-електронну схему опитування 2π -ВБР структури, побудовану на аналізі проходження оптичного сигналу через адресну 2π -ВБР структуру і похилий фільтр. Модель оптико-електронної схеми опитування 2π -ВБР побудуємо таким чином, щоб на фотоприймач потрапляв сигнал, сформований тільки частотами, що виникають від фазових π -зрушень 2π -ВБР, крім того, забезпечимо можливість визначення положень фазових π -зрушень в залежності від зміщення центральної довжини хвилі 2π -ВБР за рахунок похилого фільтра. Виконавши ці вимоги РФСС для АВБС методу, отримаємо умови, при яких, одиночну 2π -ВБР структуру можна використовувати в якості АВБС датчика малосенсорної РФСС спираючись лише на характерну особливість АВБС - її адресу.

Попередньо, для проведення комп'ютерного моделювання, в програмному пакеті OptiGrating 4.2.2, була змодельована адресна 2π -ВБР структура з параметрами: довжина першого і третього однорідного сегмента ВБР 554.77 мкм, довжина середнього сегмента 281.08 мкм, фазові зрушення між сегментами - $\pi/2$, коефіцієнтом зв'язку мод 0.008. Довжини хвиль частотних складових, що утворюють адреса, після моделювання вийшли рівними 1549.881 і 1550.119 нм, відповідно. Різниця довжин хвиль між фазовими зрушеннями склала 238 пм, що відповідає адресному 256 частоті 2π -ВБР структури в 29.75 ГГц. Спектральна характеристика моделі адресному 2π -ВБР структури наведена на рисунку 3.1.

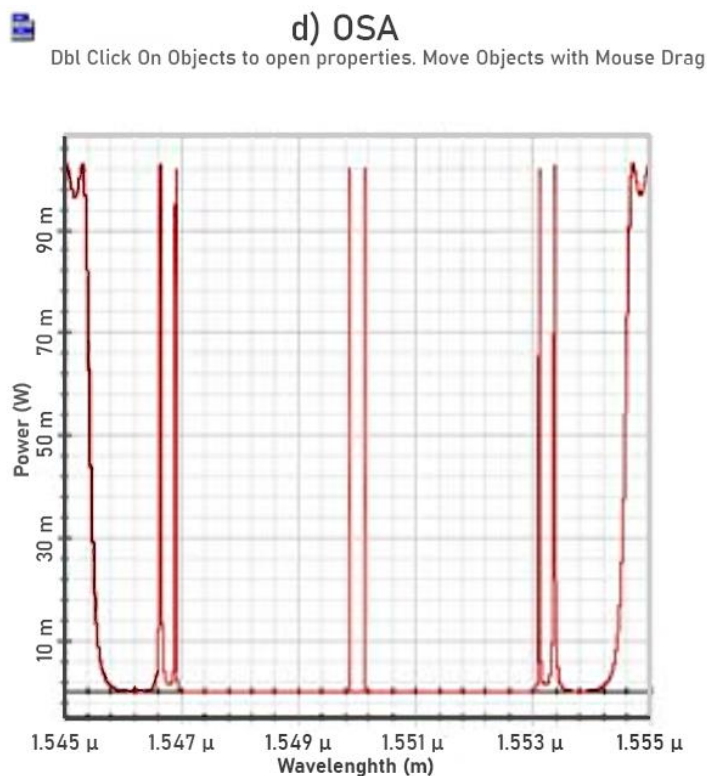


Рисунок 3.1 — Спектральна характеристика моделі адресної 2π -ВБР структури з адресною частотою 29.75 ГГц

Як добре можна бачити, на спектрі пропускання адресному 2π -ВБР структури на рисунку 3.1, в центрі 2π -ВБР структури знаходяться два частотні компоненти, що утворюють її адресу з розносом частот 29.75 ГГц. Ліві і праві спектральні складові адресному 2π -ВБР структури не входять в область розгляду. Отже, необхідно виключити їх з аналізу результуючого сигналу, для чого буде використаний частотний смуговий фільтр.

На рисунку 3.2 приведена модель оптико-електронної схеми опитування адресної 2π -ВБР структури. Випромінювання від лазерного джерела - (1) CWLaser з центральною довжиною хвилі 1550 нм, спектр якого наведено на рисунку 3.3, а, проходить через частотний прямокутний фільтр - (2) Rectangle Optical Filter з шириною пропускання 2 нм, який звужує спектр випромінювання до необхідної його спектральної ширини - рисунок 3.3, б. Оптичне випромінювання з виходу частотного фільтра (2) Rectangle Optical Filter потрапляє на адресну 2π -ВБР структуру - (3) 2π -ВБР. Спектральна характеристика вихідного випромінювання

після проходження (3) 2π -ВБР приведена на рисунку 3.3, в, де добре видно дві 257 частотні складові оптичного сигналу рівною амплітуди. Як лінійний похилий фільтр використовувався лівий схил трапецеїдального фільтра (4) Trapezoidal Optical Filter. Після проходження лінійного похилого фільтра (4) Trapezoidal Optical Filter, амплітуди частотних складових 2π -ВБР асиметрично змінюються - рисунок 3.3, г. Результуюче оптичне випромінювання приймається на фотоприймачі - (5) Photodetector PIN і видається на аналізатор спектру електричного сигналу - (6) RF Spectrum Analyzer, а сам сигнал показаний на (7) Oscilloscope Visualizer.

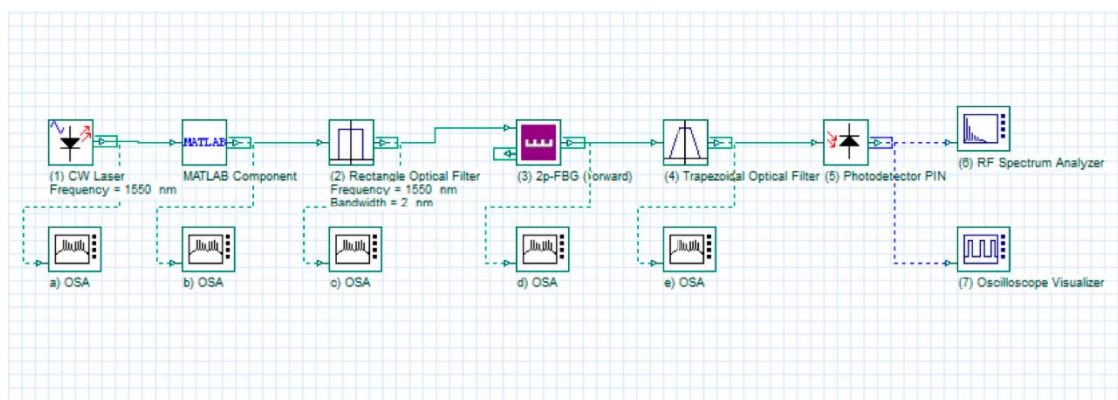


Рисунок 3.2 — Модель оптико-електронної схеми опитування адресної 2π -ВБР структури (проходження сигналу)

Зауважимо, що пару джерело і фільтр: (1) CW Laser - джерело і (2) Rectangle Optical Filter - фільтр, можна без втрати спільності міркувань замінити на один джерело лазерного випромінювання з необхідним діапазоном частот випромінювання. Більш того, така заміна була б у багатьох випадках економічно і технічно виправдана.

Спектр електричного сигналу, що приймається з фотоприймача, наведено на рисунку 3.4. На аналізаторі спектра електричного сигналу з фотоприймача добре видно частота, що виникає в результаті коливань биття частот фазових зрушень на фотоприймачі, яка відповідає адресному частоті 2π -ВБР структури - 29.75 ГГц.

Оцінимо вплив зміщення центральної довжини хвилі адресної 2π -ВБР структури на результати вимірювання. Для чого, змодельємо зміщення

центральної довжини хвилі адресної 2π -ВБР структури в діапазоні від 1549.75 до 1550.00 нм з дискретним кроком 0.025 нм, отримаємо результати вимірювань частоти і амплітуди на адресному частоті 2π -ВБР структури для 11 послідовних різних положень 2π -ВБР структури. На рисунку 3.5 різним кольором наведено одинадцять різних положень спектральних характеристик адресної 2π -ВБР структури після проходження випромінювання через лінійний похилий фільтр. Частотні складові, що утворюють адресну пару позначені на рисунку 3.5 однаковим кольором.

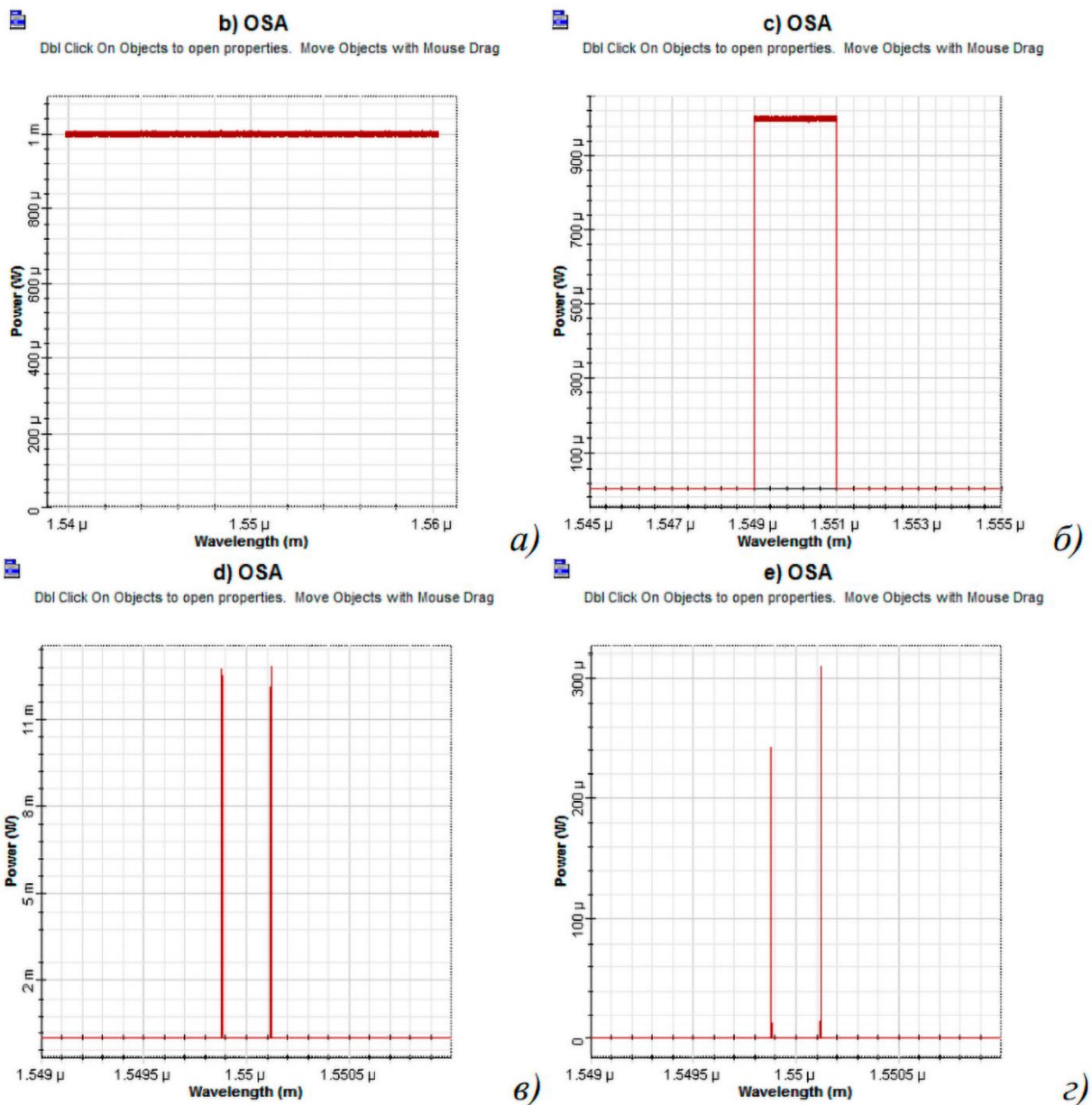


Рисунок 3.3 — Спектральні характеристики проходження сигналу через оптико-електронну схему

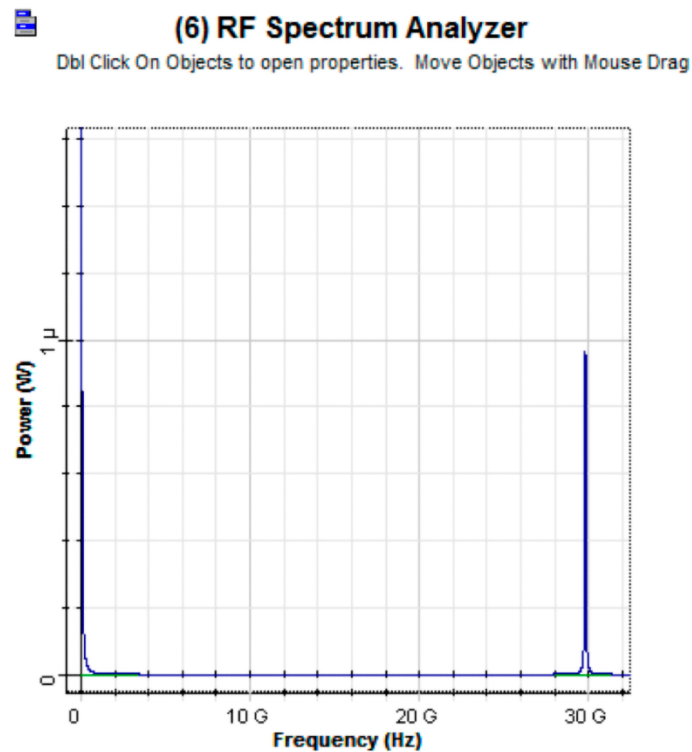


Рисунок 3.4 — Спектр електричного сигналу після фотоприймача

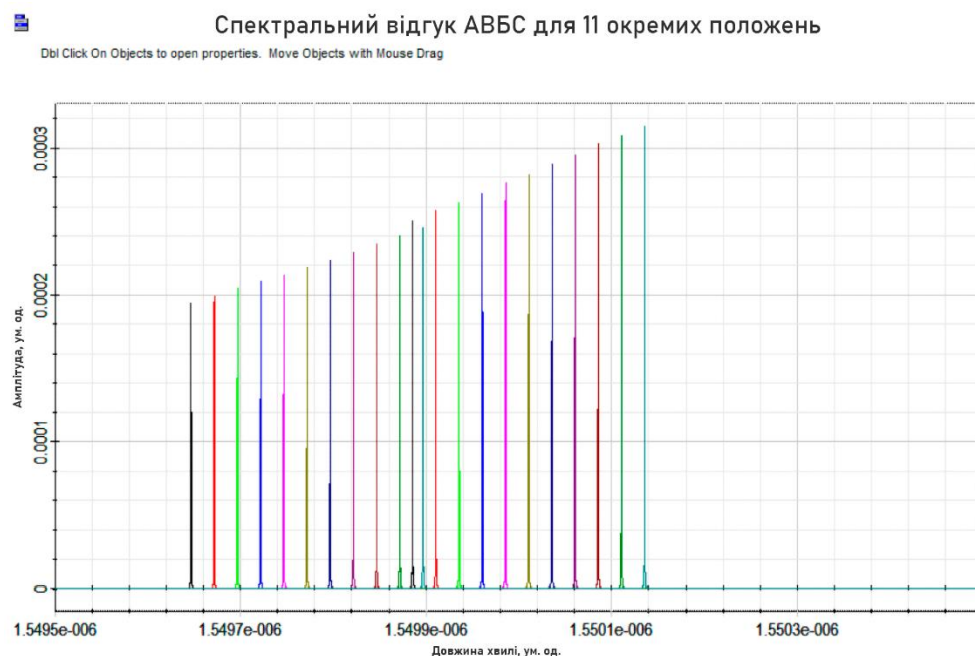


Рисунок 3.5 — Спектральні відгуки адресної 2π -ВБР структури в оптичному діапазоні при зміщенні її центральної довжини хвилі. Однаковий колір ліній позначає ліву і праву частотну складову, яка формує адресу

На рисунку 3.6,а наведено спектр сигналу, що приймається на фотоприймачі - (5) Photodetector PIN, а на рисунку 3.6,б приведена амплітуда адресної частоти для всіх 11 випадків положення адресної 2π -ВБР структури в діапазоні від 1549.75 до 1550.00 нм з дискретним кроком 0.025 нм.

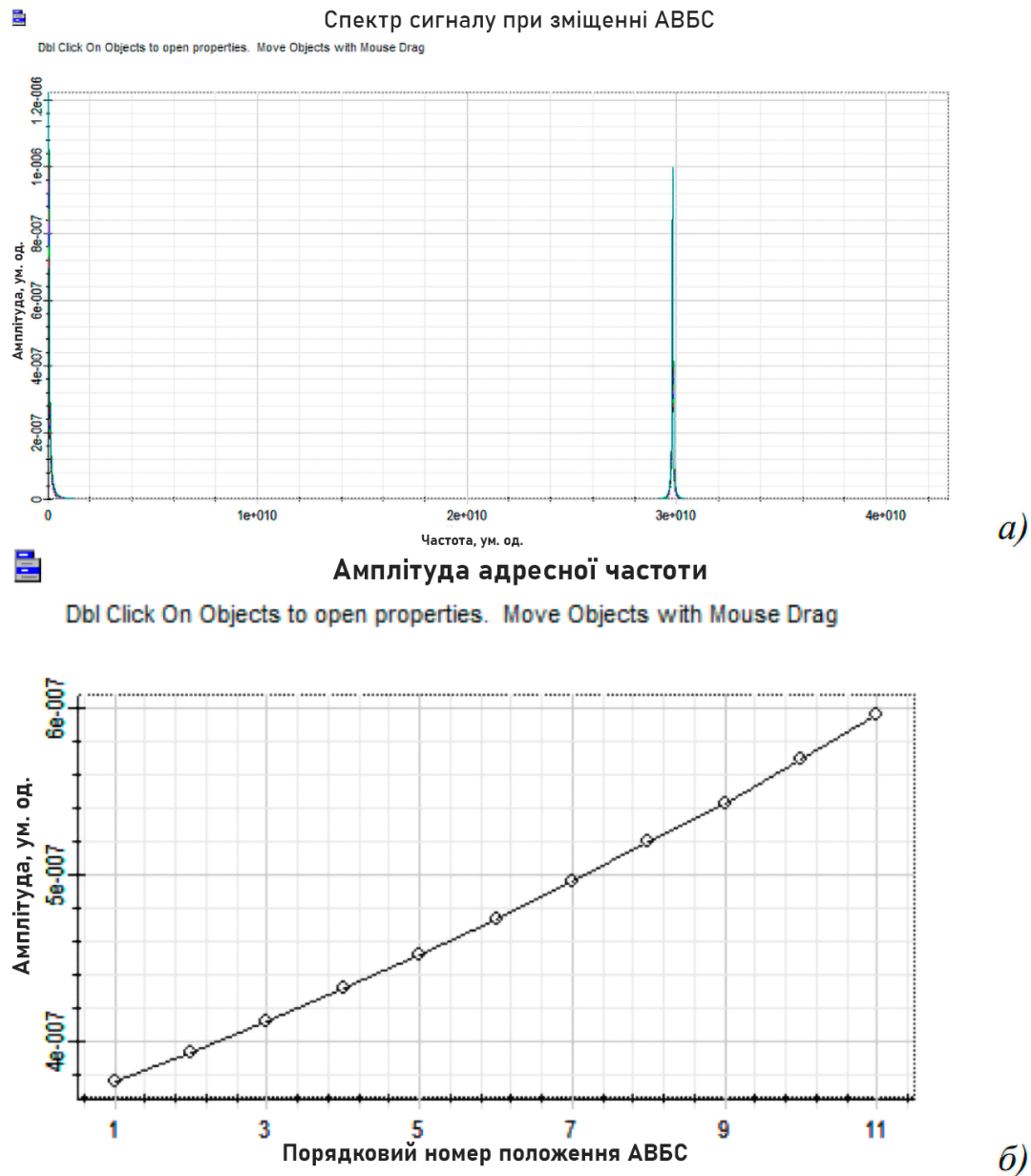


Рисунок 3.6 — Спектр сигналу, що приймається на фотоприймачі - а); амплітуда адресної частоти - б) для зсувів положення адресному 2π -ВБР структури в діапазоні від 1549.75 до 1550.00 нм з дискретним кроком 0.025 нм

Як це видно на рисунку 3.6,а, адресна частота 2π -ВБР структури не змінюється при зсуві її центральної довжини хвилі. Амплітуда коливань на

адресному частоті зростає разом із зсувом центральної довжини хвилі - рисунок 3.6,б. З ростом амплітуд частотних складових адресної 2π -ВБР структури при зміщенні її центральної довжини хвилі вліво, очікувано і збільшується амплітуда коливань на адресній частоті 2π -ВБР структури. Більш того, отримана залежність (рисунок 3.6,б) близька до квадратичної залежності. Цей факт цілком зрозумілий тим, що амплітуда коливань на адресній частоті, є результатом подвоєного добутку амплітуд адресних частот. В умовах використання лінійного похилого фільтра з параметром u - кута нахилу лінійного похилого фільтра, амплітуди лівої і правої складових пов'язані лінійною залежністю: $B = A + u \times \Omega$, де Ω - адресна частота АВБС. Отже, амплітуда коливань на адресній частоті D пропорційна квадрату амплітуди лівої частотної гармоніки $D \sim A \times (A + u \times \Omega)$, що і пояснює отриману на рисунку 3.6,б квадратичну залежність.

Результат комп'ютерного моделювання схеми опитування одиночної адресної 2π -ВБР структури повністю збігається з прогнозами теоретичної моделі і може бути реалізований як РФСС опитування АВБС датчиків.

3.1.2 Опитування адресної 2π -ВБР структури (відображення сигналу)

Функціональна схема і модель оптико-електронної схеми опитування 2π -ВБР структури, наведена вище, заснована на аналізі оптичного сигналу, що пройшов через 2π -ВБР. Це не завжди може бути зручно, оскільки виключає можливість використання кінцевого (або тупикового) волоконного датчика, який не передбачає наявності вихідного оптичного волокна.

Розглянемо функціональну оптико-електронну схему опитування 2π -ВБР структури, засновану на відображенні оптичного сигналу і наведену на рисунку 5.7. Безперервне лазерне випромінювання з джерела лазерного випромінювання - 1 надходить через циркулятор - 3 на адресні волоконні ґрати з двома фазовими π -зрушеннями 2π -ВБР - 2, відбивається від дзеркала - 4 зі сто відсотковим коефіцієнтом відображення і потрапляє на лінійний похилий фільтр - 5, після чого приймається на фотоприймачі і обробляється. Використання адресної 2π -ВБР

структури зі стовідсотковим коефіцієнтом відображення в схемі, наведеній на рисунку 3.7, неможливо. Оскільки, після циркулятора - 3, відбитий від 2 π -ВБР - 2 оптичний сигнал, сумується з сигналом, який пройшов через 2 π -ВБР і відбився від дзеркала - 4, в результаті чого виходить вихідне лазерне випромінювання, яке було на вході до циркулятора - 3.

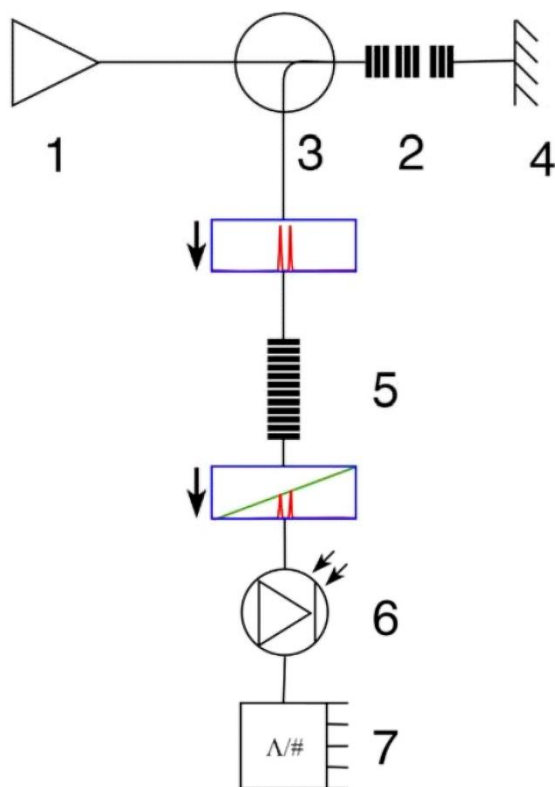


Рисунок 3.7 — Функціональна оптико-електронна схема опитування 2 π -ВБР структури (відображення сигналу)

Щоб уникнути повного відновлення сигналу і забезпечити отримання адресного випромінювання від 2 π -ВБР використовуємо три технічних прийому. Перший, використовуємо адресну 2 π -ВБР структуру – 2 (рисунку 3.7) з малим коефіцієнтом відбиття. Другий, як дзеркало – 4 (рисунку 3.7) застосуємо сильно відбиваючу вузьку волоконну бреггівську решітку, яка відображає тільки ту частину спектра, потрапляючого на нього, випромінювання, яка відповідає пікам фазових зрушень 2 π -ВБР структури. Третій, забезпечимо синхронний вплив фізичного параметра на адресну 2 π -ВБР структуру і дзеркало, для чого розташуємо обидва ці елементи оптико-електронної схеми на чутливому елементі датчика. У

цьому випадку, на дзеркало і на вимірювальну адресну 2π -ВБР структуру виявляється однаковий вплив зміни вимірюваного фізичного параметра, і зміщення центральної довжини хвилі адресної 2π -ВБР структури та дзеркала відбувається синхронно. Адресним волоконним датчиком, в цьому випадку, є здвоєний сенсор (чутливий елемент), що складається з адресної 2π -ВБР структури і вузькосмугового ВБР дзеркала.

Покажемо на основі математичного моделювання, що наведена вище функціональна оптико-електронна схема забезпечує можливість проведення вимірювань і задовольняє всім необхідним вимогам методу адресного радіофотонного опитування 2π -ВБР структури.

При комп'ютерному моделюванні в цьому була використана попередньо створена модель адресної 2π -ВБР структури з параметрами: кількість однорідних сегментів ВБР, складових адресної 2π -ВБР структури, - три; довжина першого і третього сегментів 554.775639076657 мкм, коефіцієнт зв'язку мод 0.0004, аподизація кривої Гауса з параметром 0.9; довжина другого (середнього) сегмента 1500.00765651298 мкм, аподизація кривої Гауса з параметром 0.1 і коефіцієнтом зв'язку мод 0.0001. Число ділянок в кожному однорідному сегменті ВБР – 100. Між однорідними сегментами ВБР розташовані два фазових зсуву з величиною $\pi/2$. Спектральна характеристика отриманої адресному 2π -ВБР структури, з коефіцієнтом відображення приблизно рівним 0.2 та адресної частотою 44.3 ГГц, наведена на рисунку 3.8.

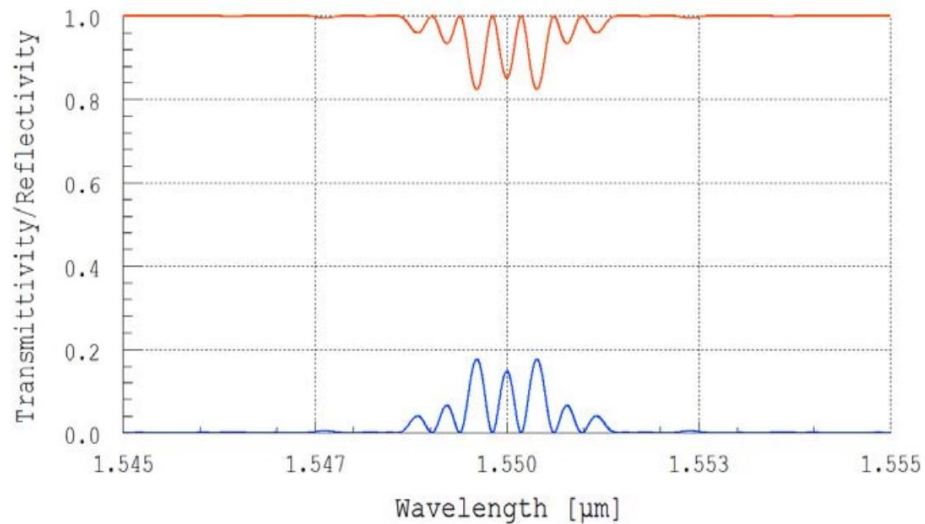


Рисунок 3.8 — Спектральна характеристика моделі слабковідбиваючої адресної 2π -ВБР структури: червона лінія – коефіцієнт пропускання, синя лінія – коефіцієнт відображення

Модель оптико-електронної схеми опитування адресної 2π -ВБР структури, заснована на відображенні сигналу, відповідна функціональній оптико-електронній схемі (рисунок 3.7) наведена на рисунку 3.9.

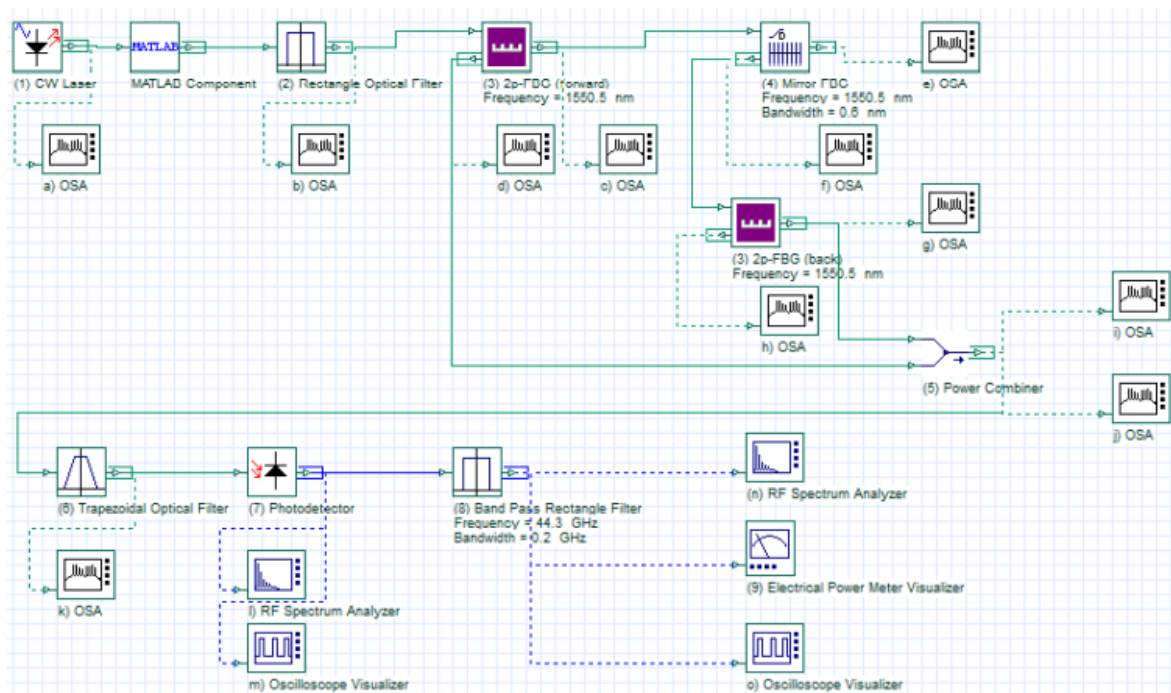


Рисунок 3.9 — Модель оптико-електронної схеми опитування адресної 2π -ВБР структури (відображення сигналу)

Безперервне широкосмугове лазерне випромінювання з лазерного джерела - (1) CWLaser (рисунок 3.9) проходить через прямокутний частотний фільтр - (2) Rectangle Optical Filter і формує прямокутне випромінювання з шириною еквівалентною ширині діапазону вимірювань. Випромінювання заданої спектральної ширини потрапляє на адресну 2π -ВБР - (3) 2p-FBG (forward), визначену параметрами моделювання (рисунок 3.8), що моделює прямий прохід і відображення випромінювання. Пройшовши через - (3) 2p-FBG (forward) випромінювання відбивається від дзеркала - (4) Mirror FBG, волоконну бреггівськими ґрати з такою ж центральною довжиною хвилі і шириною, захоплюючої обидві спектральні лінії фазових зрушень 2π -ВБР. Відбите від дзеркала - (4) Mirror FBG випромінювання знову проходить через 2π -ВБР, зворотний прохід випромінювання моделюється компонентом - (3) 2p-FBG (back).

Після чого, пройшовши крізь - (3) 2p-FBG 265 (back) і відбите від - (3) 2p-FBG (forward) випромінювання об'єднується за допомогою об'єднувача потужності випромінювання - (5) Power Combiner. На виході з - (5) Power Combiner (рисунок 3.9) отримуємо сигнал, який є результатом проходження вихідного випромінювання крізь адресну 2π -ВБР структуру - 2 і відбилася від пов'язаного з нею оптичного дзеркала - 4 (рисунок 3.7).

Відбите від 2π -ВБР і пройшовши крізь нього випромінювання направляється на лінійний похилий фільтр, в якості якого використовується лівий схил трапецеидального фільтра - (6) Trapezoidal Optical Filter. Результируюче випромінювання приймається на фотоприймачі - (7) Photodetector. Для виділення адресної частоти з електричного сигналу, отриманого після фотоприймача, використаний частотний фільтр - (8) Band Pass Rectangle Filter, з шириною пропускання 0.2 ГГц. Результируюча амплітуда коливань на адресному частоті вимірюється компонентом - (9) Electrical Power Meter Visualizer.

На рисунку 3.10,а наведено спектр пройшов через - (3) 2p-FBG (forward) (рисунок 3.9) і відбитого від нього рисунок 3.10,б випромінювання. На рисунку 3.10,в наведено спектр відбитого від дзеркала - (4) Mirror FBG (рисунок 3.9) випромінювання, а на рисунку 3.10,г зображений спектр випромінювання, що є

результатом проходження і відображення оптичного сигналу через адресну 2π -ВБР структуру і узгодженого з ним відображає вузького дзеркала.

На лінійному похилому фільтрі - (6) Trapezoidal Optical Filter (рисунок 3.9) вноситься амплітудна асиметрія в результуючий сигнал. Спектр асиметричного сигналу, після проходження лінійного похилого фільтра, наведено на рисунку 3.11,а. Ситуаційне становище спектра при його зміщенні в заданому діапазоні (вкрай ліве - червона лінія, середнє - зелена лінія і вкрай праве - фіолетова лінія, положення) наведено на рисунку 3.11,б.

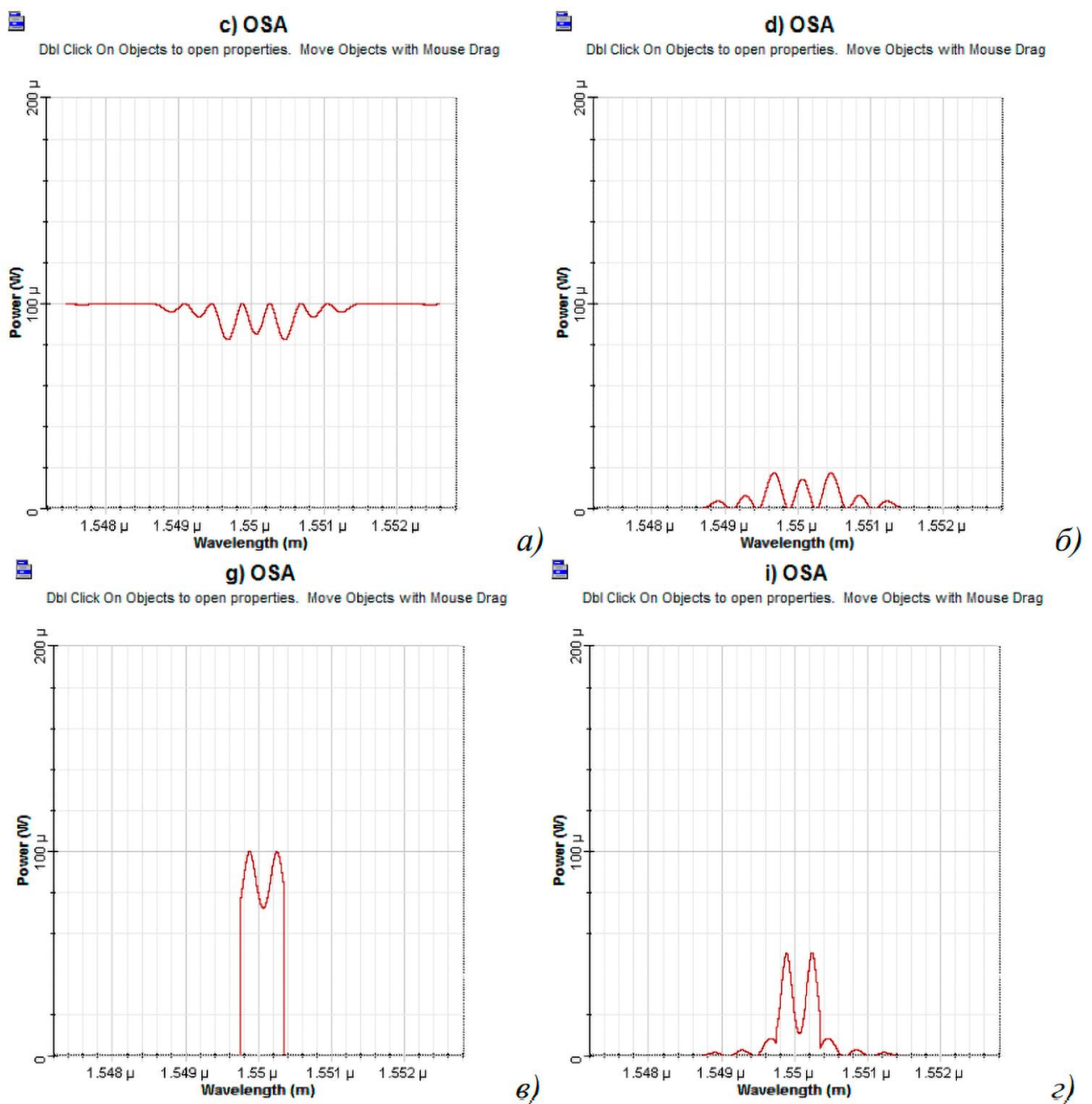


Рисунок 3.10 — Спектральні характеристики проходження сигналу

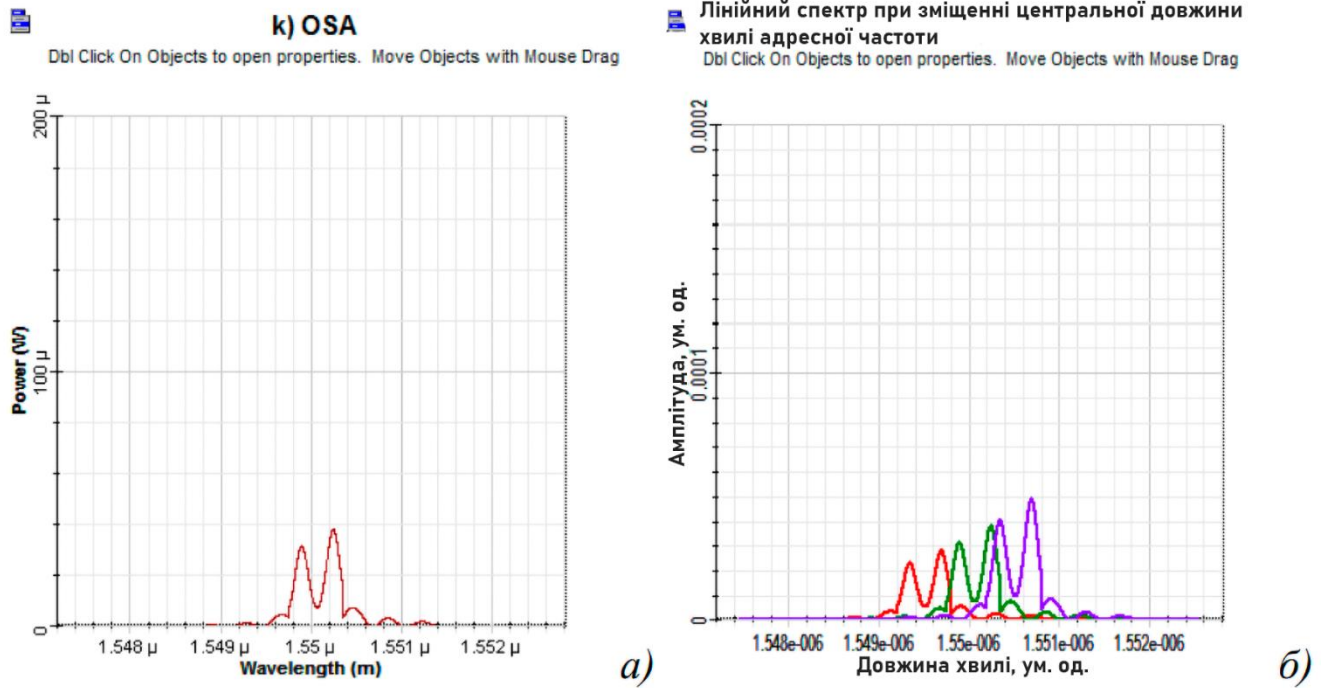


Рисунок 3.11 — Спектральна характеристика після лінійного похилого фільтра

Спектральна характеристика двохчастотного оптичного сигналу після фотоприймача і осцилограма цього сигналу приведена на рисунках 3.12, а і 3.12, б, відповідно. На рисунках 3.12, в і 3.12, г наведено спектр і осцилограма електричного сигналу, після його адресному частотної фільтрації на частоті 44.3 ГГц.

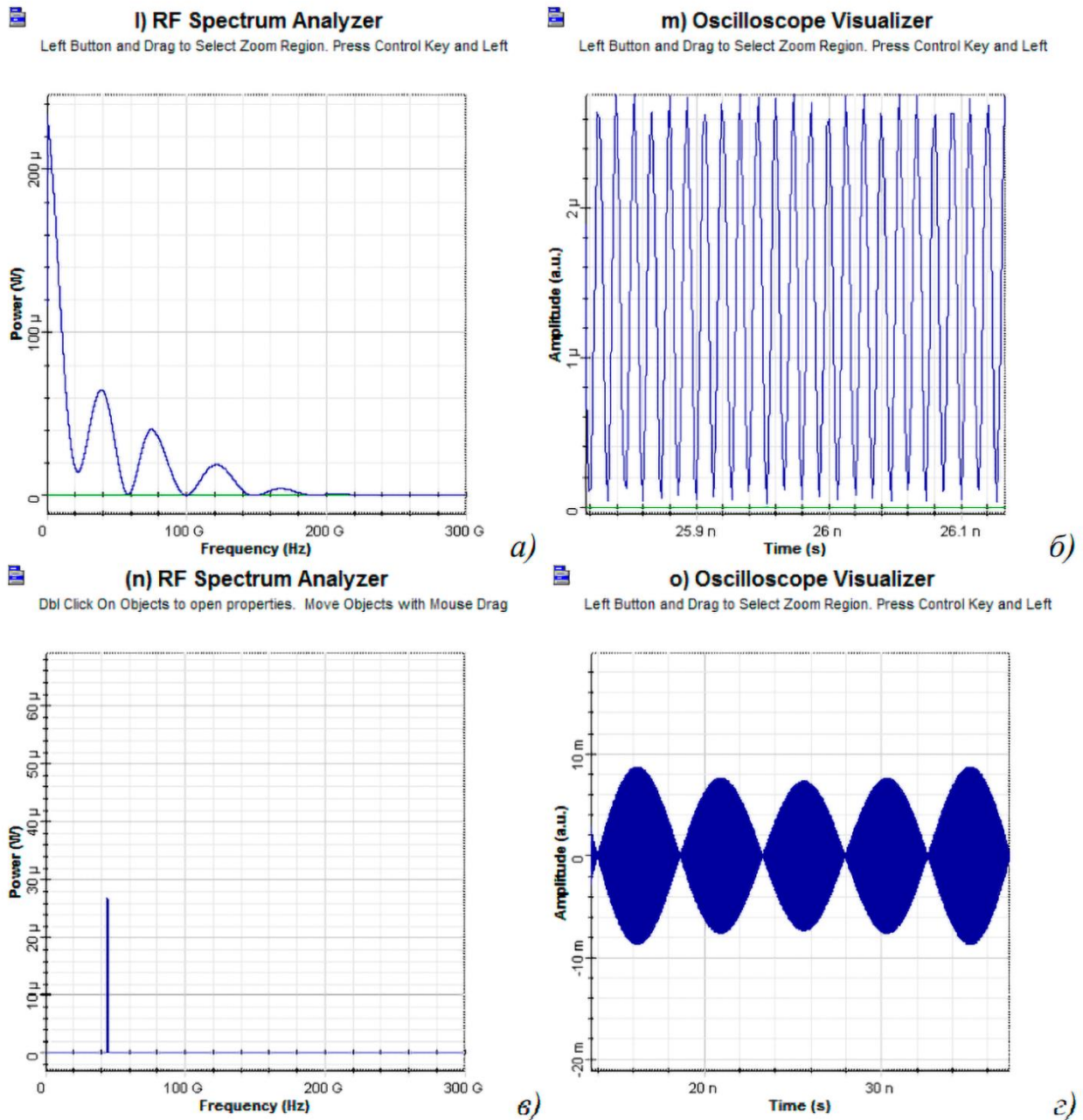


Рисунок 3.12 — Спектральна характеристика і його осцилограма: а) і б) - до; і в) і г) - після фотоприймача

Для того щоб оцінити вплив зміщення центральної довжини хвилі адресному 2π -ВБР структури на результати вимірювання, емулюючи синхронне зміщення центральної довжини хвилі адресної 2π -ВБР структури і відображає вузьке дзеркала в діапазоні від 1549.5 до 1550.50 нм з дискретним кроком 0.05 нм. Отримаємо результати вимірювань частоти і амплітуди для опитування 2π -ВБР на

адресному частоті для 21 послідовного положення центральної довжини хвилі адресному 2π -ВБР структури.

На рисунку 3.13 наведена амплітуда коливань на адресному частоті 44.3 ГГц в залежності від зміщення центральної довжини хвилі адресного 2π -ВБР датчика (адресна 2π -ВБР структура і вузькосмугове ВБР дзеркало) в діапазоні від 1549.5 до 1550.50 нм з кроком 0.05 нм. Порядковому номеру 1 відповідає крайнє ліве положення центральної довжини хвилі адресного 2π -ВБР датчика, а порядковому номеру 21 - крайнє праве положення центральної довжини хвилі адресного 2π -ВБР датчика.



Рисунок 3.13 — Амплітуда коливань на адресній частоті при синхронному зсуві центральної довжини хвилі адресному 2π -ВБР структури і вузькосмугового дзеркала в діапазоні від 1549.5 до 1550.50 нм з кроком 0.05 нм.

Аналізуючи результати математичного моделювання оптико-електронної схеми опитування адресного 2π -ВБР датчика, можна зробити висновок про те, що

запропонована функціональна оптико-електронна схема відображає якісні характеристики працездатності системи, є коректною і може бути застосовна для побудови вимірювальних систем на основі адресних 2π -ВБР датчиків.

3.1.3 Опитування адресної 2λ -ВБР структури (відображення сигналу)

Розглянемо модель адресної 2λ -ВБР структури з двома спектральними складовими в оптичному діапазоні. Довжини хвиль частотних складових, що утворюють адреса, після моделювання вийшли рівними 1549.88 і 1550.12 нм, відповідно. Різниця довжин хвиль між фазовими зрушеннями склала 240 пм, що відповідає адресному частоті 2λ -ВБР структури в 30 ГГц, ширина спектральних ліній, які формують адреса - 1.5 ГГц. Спектральна характеристика моделі адресному 2λ -ВБР структури наведена на рисунку 3.14.

Модель оптико-електронної схеми наведена на рисунку 3.15. Безперервне широкосмугове лазерне випромінювання з лазерного джерела - (1) CWLaser (рисунк 3.15) проходить через прямокутний частотний фільтр - (2) MATLAB і формує прямокутне широкосмугове випромінювання з шириною еквівалентної діапазону вимірювань. Випромінювання потрапляє на адресну 2λ -ВБР структуру - (3) 2λ -FBG, яка формує двунаправленне випромінювання світлового потоку - пройшло через 2λ -ВБР структуру і відбите від неї.

Відбите від адресного 2λ -ВБР структури - (3) 2λ -FBG випромінювання проходить через лінійний похилий фільтр, в якості якого використовується лівий схил трапецеидального фільтра - (4) Trapezoidal Optical Filter, і потрапляє на фотоприймач - (5) Photodetector PIN. Після фотоприймача встановлений електричний вузькосмуговий фільтр на адресну частоту 30 ГГц - (7) Band Pass Gaussian Filter. На компоненті - (8) Electrical Power Meter Visualizer вимірюється амплітуда коливань на адресному частоті 2λ -FBG структури. Двочастотних 270 випромінювання, потрапляючи на фотоприймач - (5) Photodetector PIN, формує на ньому низкочастотне биття складових адресного лазерного випромінювання на частоті 30 ГГц (рисунк 3.17,а).

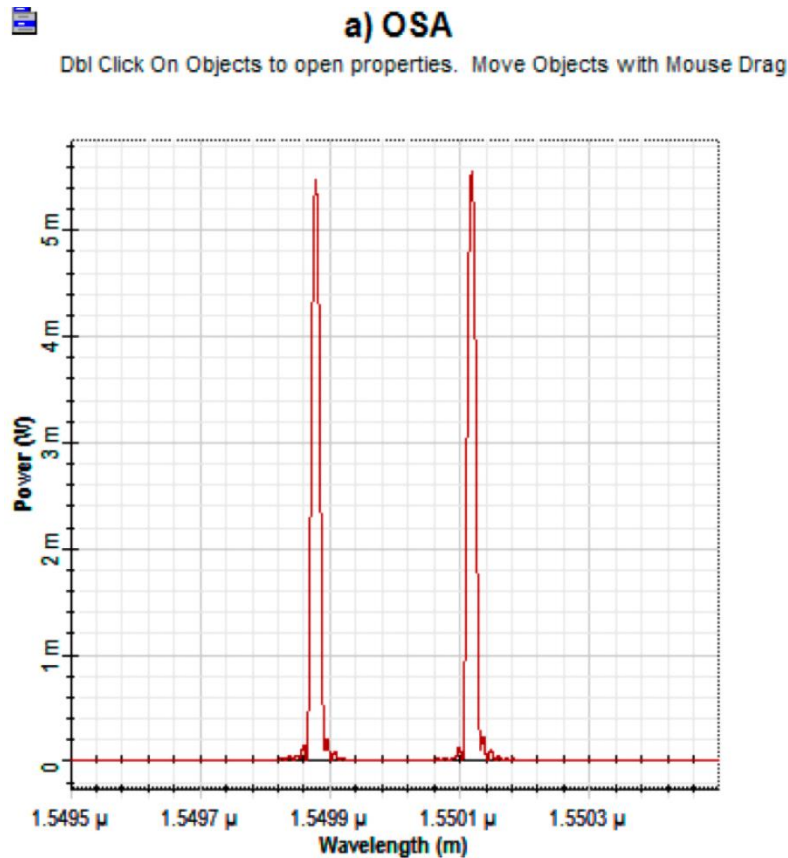


Рисунок 3.14 — Спектральна характеристика моделі адресної 2λ-ВБР структури з адресною частотою 30 ГГц

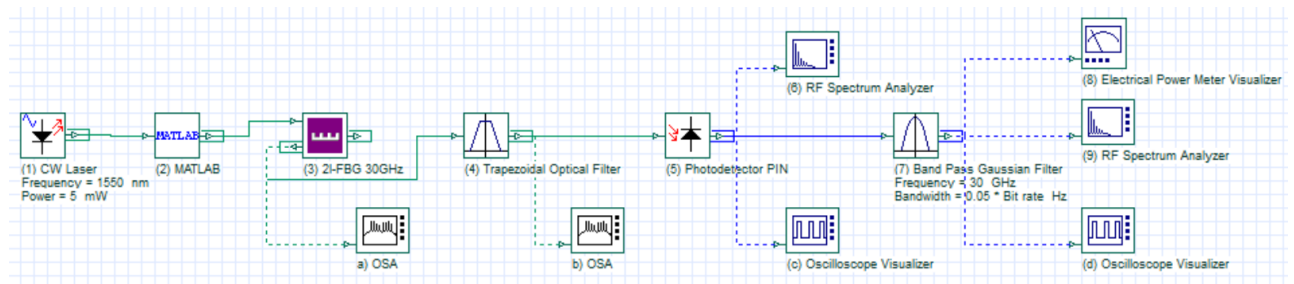


Рисунок 3.15 — Модель оптико-електронної схеми опитування 2λ-ВБР (відображення сигналу)

На рисунку 3.16,а наведено спектр відбиття від адресного 2λ-ВБР контуру. А на рисунку 3.16,б спектр відображення, що пройшов через лінійний похилий фільтр - (4) Trapezoidal Optical Filter. А на рисунку 3.17,б приведена осцилограма коливання потужності вихідного струму на фотоприймачі.

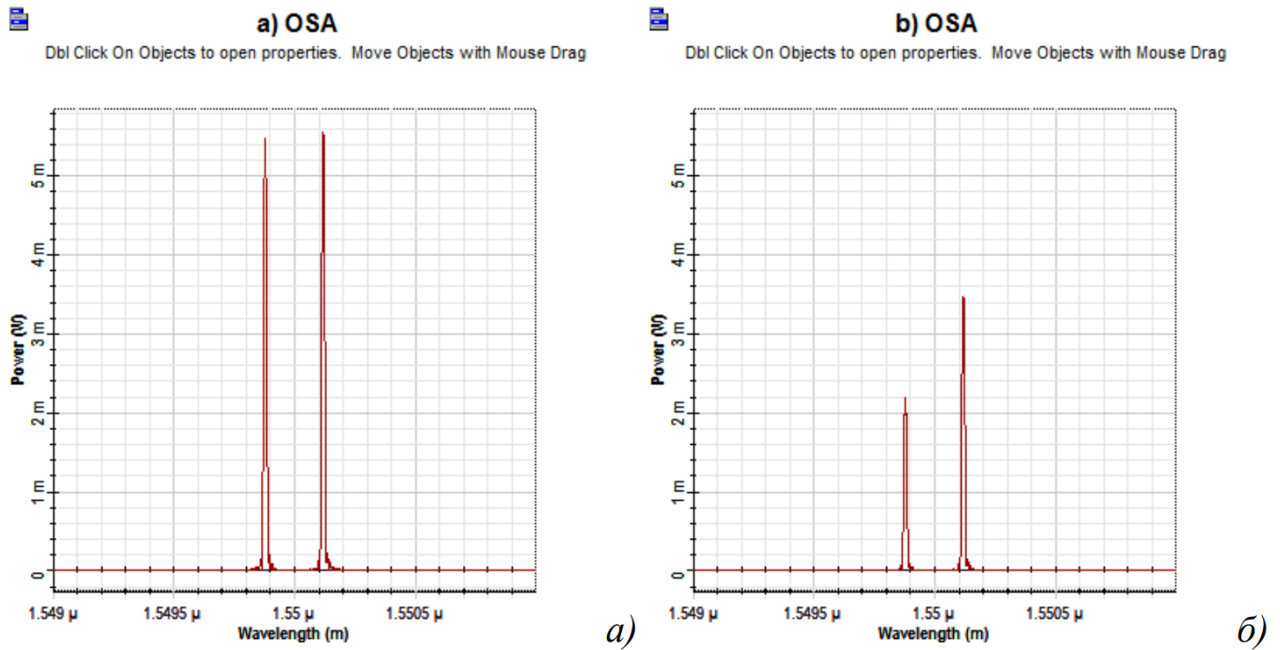


Рисунок 3.16 — Спектральна характеристика відбиття від 2λ -ВБР: а) - до похилого фільтра; б) - після похилого фільтра

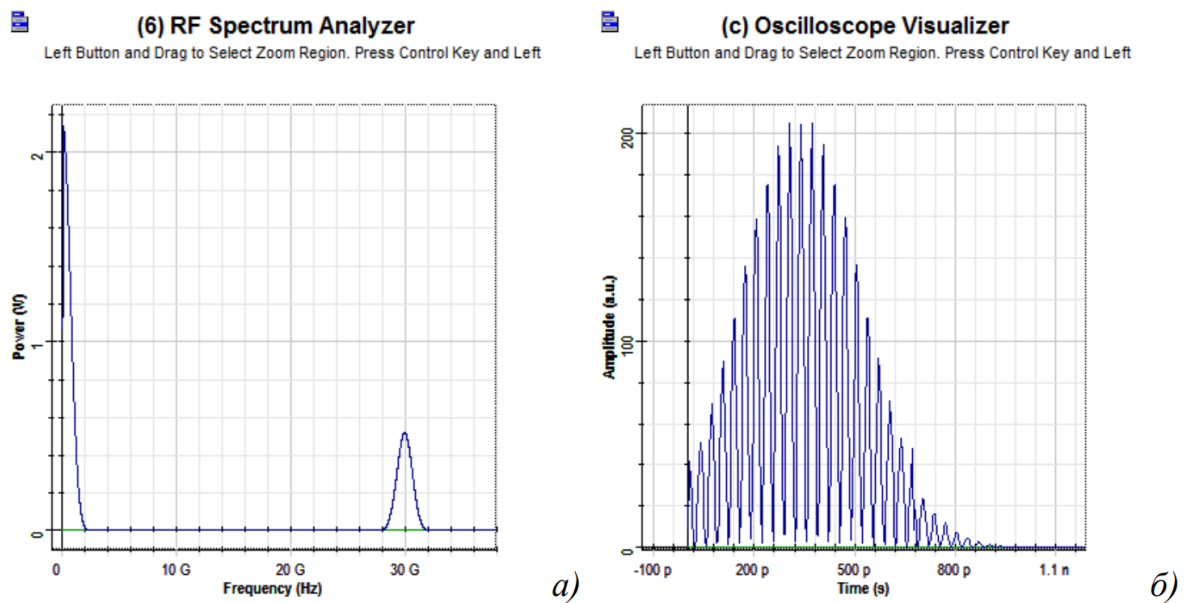


Рисунок 3.17 — Сигнал на фотоприймачі: а) - спектр результуючого сигналу; б) - осцилограма сигналу

Оцінимо вплив зміщення центральної довжини хвилі адресної 2λ -ВБР структури на результати вимірювання. Для чого, змодельюємо зміщення центральної довжини хвилі адресному 2λ -ВБР структури в діапазоні від 1549.5 до

1550.5 нм з дискретним кроком 0.1 нм, отримаємо результати вимірювань частоти і амплітуди для опитування на адресному частоті 30 ГГц для 11 послідовних різних положень 2λ -ВБР структури. На рисунку 3.18 різним кольором наведено одинадцять різних положень спектральних характеристик адресної 2λ -ВБР структури після проходження випромінювання через лінійний похилий фільтр. Частотні складові, що утворюють адресну пару позначені на рисунку 3.18 однаковим кольором.

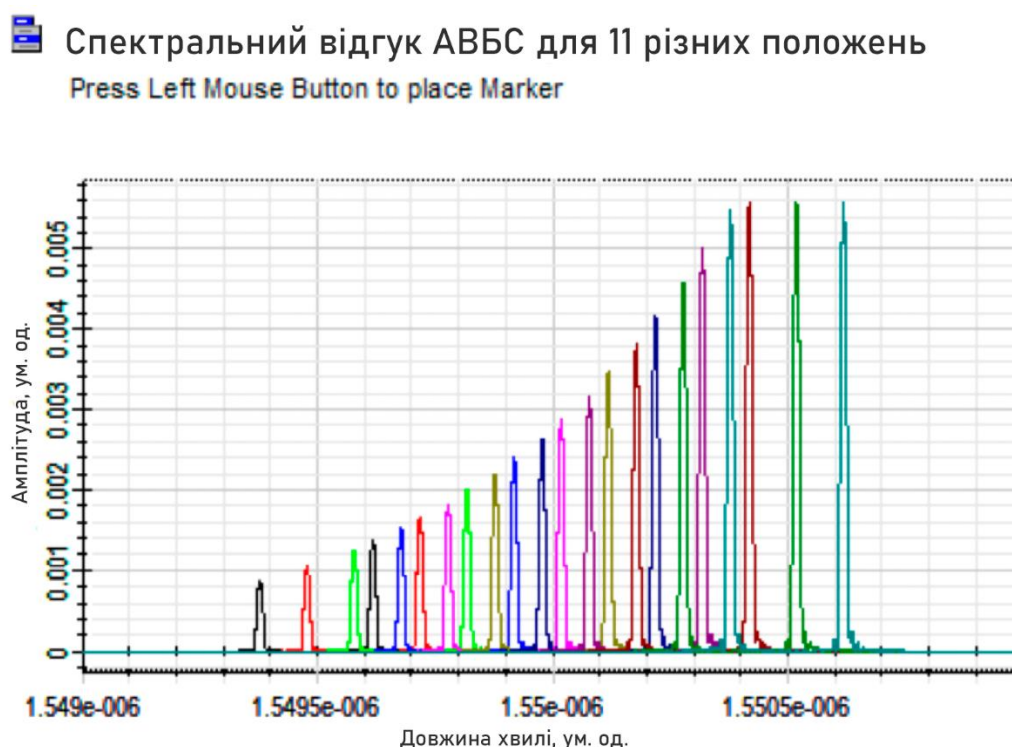


Рисунок 3.18 — Спектральні відгуки адресної 2λ -ВБР структури при зміщенні її центральної довжини хвилі. Однаковий колір ліній позначає ліву і праву частотну складову, формуючу адресу

На рисунку 3.19,а наведено спектр сигналу, що приймається на фотоприймачі (5) Photodetector PIN, а на рисунку 3.19,б приведена амплітуда адресної частоти для всіх 11 випадків положення адресної 2π -ВБР структури в діапазоні від 1549.5 до 1550.5 нм з дискретним кроком 0.1 нм .

Як це видно на рисунку 3.19,а, адресна частота 2λ -ВБР структури не змінюється при зсуві її центральної довжини хвилі, в той же час, амплітуда коливань на адресному частоті очікувано зростає (рисунок 3.19,б). З ростом амплітуд частотних складових адресному 2λ -ВБР структури при зміщенні її центральної довжини хвилі вліво, і збільшується амплітуда коливань на адресному частоті 2λ -ВБР структури. Залежність ця близька до квадратичної залежності, що було пояснено в попередньому параграфі.

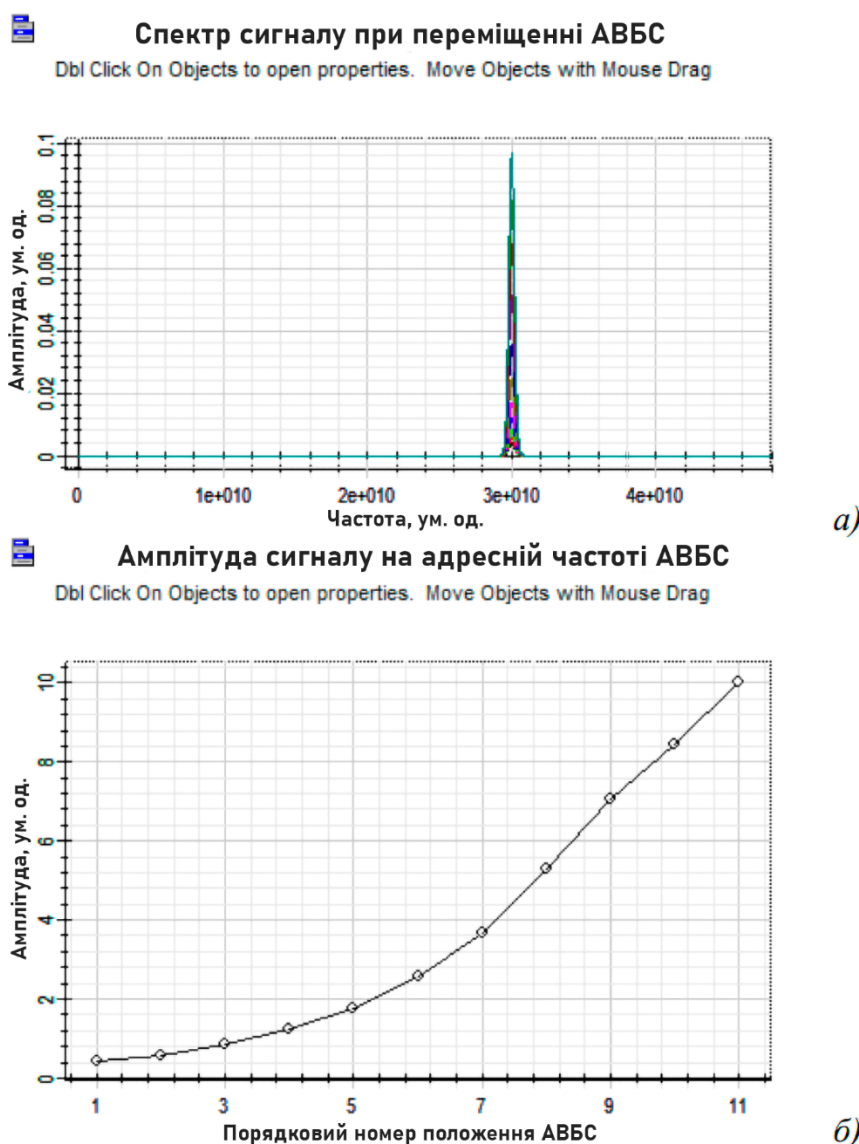


Рисунок 3.19 — Сигнал на фотоприймачі : а) - спектр сигналу ; б) - амплітуда адресному частоти ; для всіх 11 випадків положення адресному 2λ -ВБР структури в діапазоні від 1549.5 до 1550.5 нм з дискретним кроком 0.1 нм

Результат комп'ютерного моделювання схеми опитування одиночній адресному 2λ -ВБР структури повністю збігається з прогнозами теоретичної моделі і може бути реалізований у вигляді РФСС опитування АВБС датчиків при використанні адресних 2λ -ВБР структур.

3.2 Багатосенсорні вимірювальні системи на основі адресних структур

3.2.1 Опитування масиву 2π -ВБР структури (проходження сигналу)

У цьому параграфі пропонується найпростіша функціональна оптико-електронна схема опитування масиву з п'яти 2π -ВБР структур, побудована на аналізі оптичного сигналу, об'єднаного після паралельного проходження оптичного сигналу через кожен 2π -ВБР структуру, минулого через похилий фільтр і прийнятий на фотоприймач.

Попередньо, для проведення комп'ютерного моделювання були змодельовані п'ять адресних 2π -ВБРі ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) структур, з однаковою центральною довжиною хвилі і з різними адресними частотами в 20, 25, 30, 35 і 40 ГГц, відповідно. Спектральні характеристики побудованих адресних 2π -ВБР структур аналогічні спектральній характеристиці одиночній адресному 2π -ВБР структури, наведеної на рисунку 3.1. В спектрі пропускання кожної адресному 2π -ВБР структури, в її центрі знаходяться дві частотні компоненти, що утворюють її адресу. Ліві і праві спектральні складові адресних 2π -ВБР структур не входять в область розгляду, для виключення їх з аналізу результуючого сигналу використовується частотний смуговий фільтр.

На рисунку 3.20 наведена модель оптико електронної схеми опитування масиву адресних 2π -ВБР структур. Випромінювання від лазерного джерела - (1) CWLaser з центральною довжиною хвилі 1550 нм, спектр якого наведено на рисунку 3.21, а, проходить через частотний прямокутний фільтр - (3) Rectangle Optical Filter з шириною пропускання 2 нм, який звужує спектр випромінювання до необхідної його спектральної ширини - рисунок 3.21,б. Оптичне випромінювання з виходу

частотного фільтра (3) Rectangle Optical Filter потрапляє на розгалужувач - (4) Power Splitter, який розділяє світловий потік на п'ять адресних 2π -ВБРі структур - 5.1-5.5 2π -ВБР, рисунок 3.20.

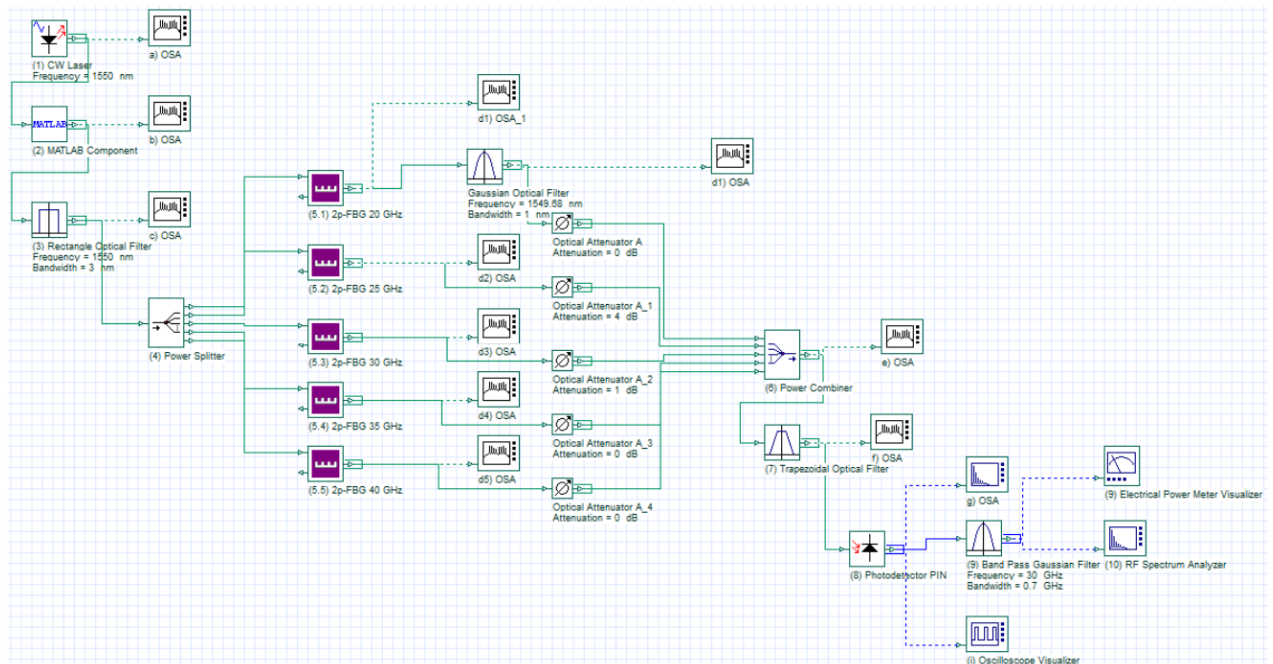


Рисунок 3.20 — Модель оптико електронної схеми опитування масиву 2π -ВБР структур (проходження сигналу)

Спектральна характеристика вихідного випромінювання після проходження масиву з п'яти 2π -ВБРі приведена на рисунку 3.21,в, де добре видно все десять частотних складових оптичного сигналу, сформовані адресними частотами 2π -ВБР структур. В якості лінійного похилого фільтра використовувався лівий схил трапецеидального фільтра - (7) Trapezoidal Optical Filter. Після проходження лінійного похилого фільтра - (7) Trapezoidal Optical Filter, амплітуди частотних складових 2π -ВБРі асиметрично змінюються - рисунок 5.21,г. Результоване оптичне випромінювання приймається на фотоприймачі - (8) Photodetector PIN. Перед аналізом складного сигналу виробляється частотна фільтрація на адресному частоті 2π -ВБРі структури. В роботі для якісної оцінки працездатності системи була обрана адресна частота, відповідна частоті 30 ГГц для 2π -ВБР3. Отриманий після фільтрації сигнал надходить на аналізатор спектру електричного сигналу - (10) RF Spectrum Analyzer.

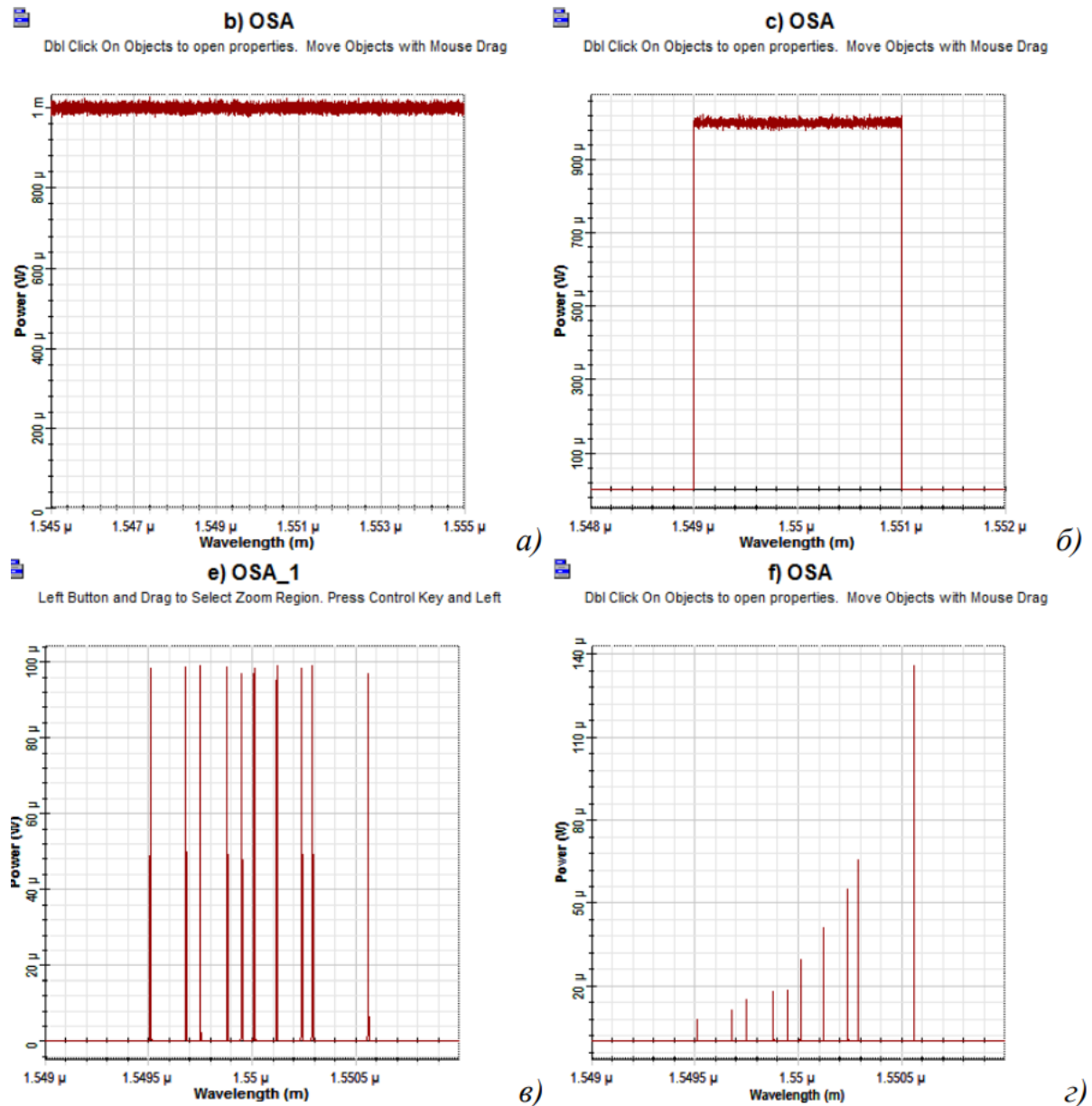


Рисунок 3.21 — Спектральні характеристики проходження сигналу через оптико електронну схему: а) - після лазерного джерела ; б) - після смугового фільтра ; в) - після масиву 2 -ВБР; г) - після лінійного похилого фільтра

Оцінимо вплив зміщення центральної довжини хвилі адресному 2π -ВБР3 структури з адресною частотою 30 ГГц на результати вимірювання. Для чого, змодельюємо зміщення центральної довжини хвилі адресної 2π -ВБР3 структури в діапазоні від 1550.00 до 1550.50 нм з дискретним кроком 0.05 нм. Проаналізуємо отримані результати вимірювань частоти і амплітуди опитування на адресному частоті 30 ГГц для 11 послідовних різних положень 2π -ВБР3 структури щодо

інших. На рисунку 3.22 представлені різними кольорами спектральні характеристики масиву з п'яти адресних 2π -ВБР структур для 11 окремих приватних випадків положення 2π -ВБР3. Ітерації 1 на рисунку 3.22 відповідає положення 2π -ВБР3 структури з центральною довжиною хвилі 1550 нм, а ітерації 11 з центральною довжиною хвилі в 1550.5 нм. Ітерації на рисунку 3.22 відзначені різними кольорами.

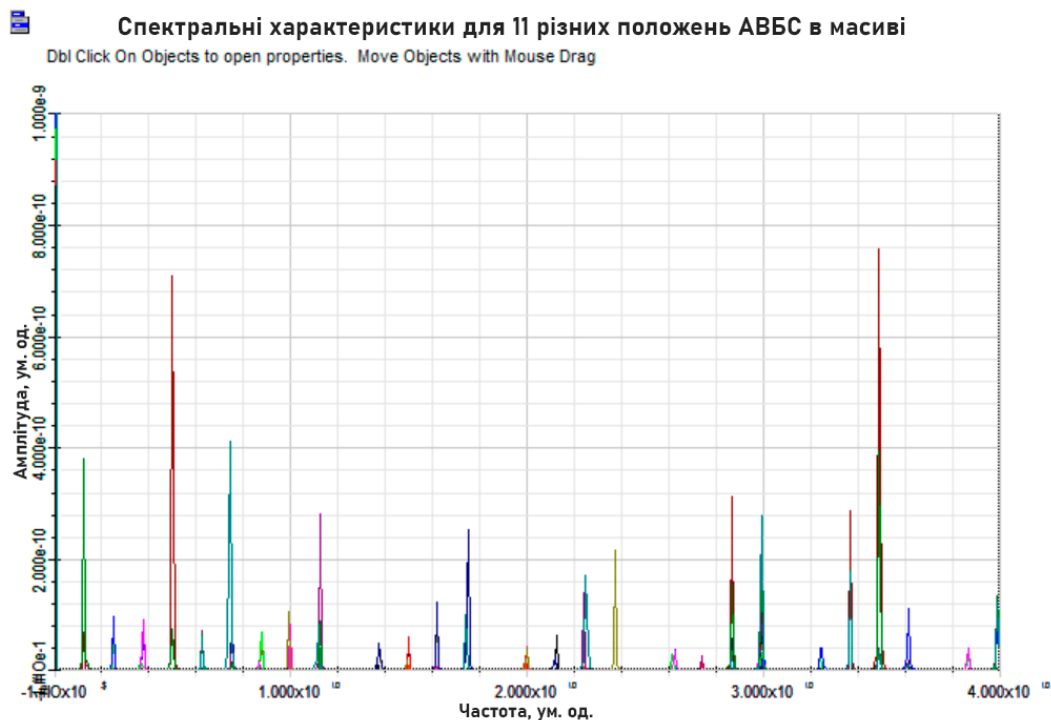


Рисунок 3.22 — Спектральні характеристики після фотоприймача . Кольором виділені 11 окремих випадків положення адресної 2π -ВБР структури з частотою 30 ГГц

На рисунку 3.23 представлена амплітуда на адресному частоті 30 ГГц адресному 2π -ВБР3. Як можна помітити, для ситуаційного положення адресному 2π -ВБР3 структури в масиві, при центральній довжині хвилі 1550.15 нм, спостерігається різкий сплеск амплітуди коливань на її адресною частоті в 30 ГГц. Це пов'язано з тим, що при такому взаємному розташуванні 2π -ВБРі структур в масиві виникає ситуація виникнення в радіофотонної сенсорної системі вимірювань масиву 2π -ВБРі структур частот перехресного биття на адресній

частоті обраної 2π -ВБРЗ структури . На рисунку 3.24 показана низькочастотна спектральна характеристика результуючих коливань потужності після фотоприймача для трьох положень адресної 2π -ВБРЗ. Рисунок 3.24, а - положення центральної довжини хвилі 2π -ВБРЗ 1550.10 нм, 278 ітерація 4; рисунок 3.24, б - положення центральної довжини хвилі 2π -ВБРЗ 1550.15 нм, ітерація 5; і рисунок 3.24, в - положення центральної довжини хвилі 2π -ВБРЗ 1550.20 нм, ітерація 6.

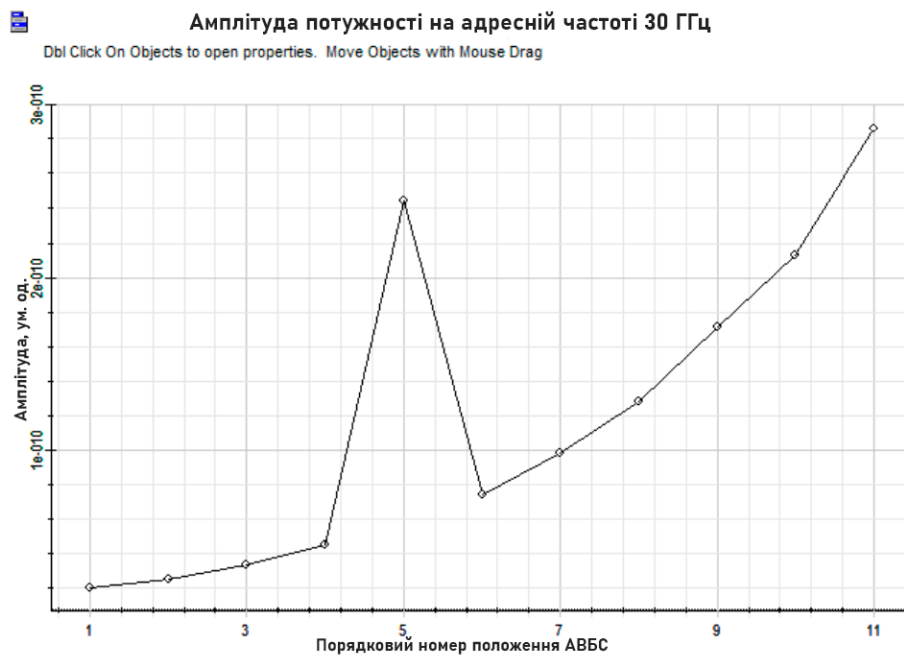


Рисунок 3.23 — Амплітуда радіочастотного сигналу після фільтрації його на адресній частоті в 30 ГГц третього датчика

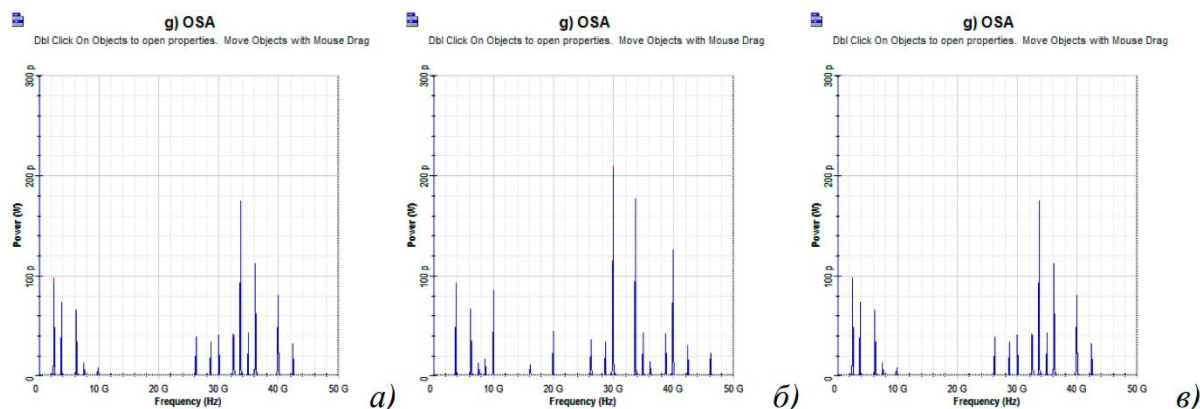


Рисунок 3.24 — Ситуаційні радіочастотні спектри опитування масиву 2π -ВБР структур: а) - положення центральної довжини хвилі 2π -ВБР3 1550.10 нм, ітерація 4; б) - положення центральної довжини хвилі 2π -ВБР3 1550.15 нм, ітерація 5; в) - положення центральної довжини хвилі 2π -ВБР3 1550.20 нм, ітерація 6

Як можна помітити, порівнюючи рисунки 3.24,а, 3.24,б, 3.24,в, спостерігається сплеск амплітуди адресних коливань при її центральній довжині хвилі 2π -ВБР3 рівній 1550.15 нм, рисунок 3.24,б. Таке поводження амплітуди коливань на адресному частоті добре узгоджується з принципами математичної моделі, і являє собою один з приватних випадків взаємного розташування адресних АВБС структур в масиві.

Загальний же характер кривої на рисунку 3.23 справедливо описує зростання амплітуди зі зміщенням центральної довжини хвилі в бік збільшення довжини хвилі обраної адресної 2π -ВБР3 структури, оскільки, при накладеному похилому фільтрі з ростом в цю ж сторону ростуть і амплітуди адресних несучих компонент в оптичному діапазоні.

3.2.2 Опитування масиву 2λ -ВБР структур (відображення сигналу)

Розглянемо модель масиву адресних 2λ -ВБР структур з двома спектральними складовими в оптичному діапазоні. Адресні частоти, що формують масив адресних 2λ -ВБРі ($i = 1, 2, 3$) структур, були обрані рівними (20, 30 і 40 ГГц), при ширині спектральних ліній формують адреса ~ 1.5 ГГц. Центральні довжини хвиль 2λ -ВБРі в початковому стані обрані рівними 1549.70, 1550.30, 1550.00 нм, відповідно для

2 λ -ВБР1, 2 λ -ВБР2, 2 λ -ВБР3. Спектр відображення масиву адресних 2 λ -ВБР структур наведено на малюнку 3.14. Пара лівих частот представляють собою 2 λ -ВБР2 з адресною частотою 30 ГГц, пара центральних частотних гармонік - 2 λ -ВБР3 з частотою 40 ГГц, пара правих - 2 λ -ВБР1 з частотою 20 ГГц.

Побудуємо схему опитування масиву адресних 2 λ -ВБР структур, засновану на відображенні оптичного сигналу від масиву.

На рисунку 3.26 представлена модель оптико електронної схеми опитування масиву адресних 2 λ -ВБР структур, заснована на відображенні оптичного сигналу від масиву датчиків.

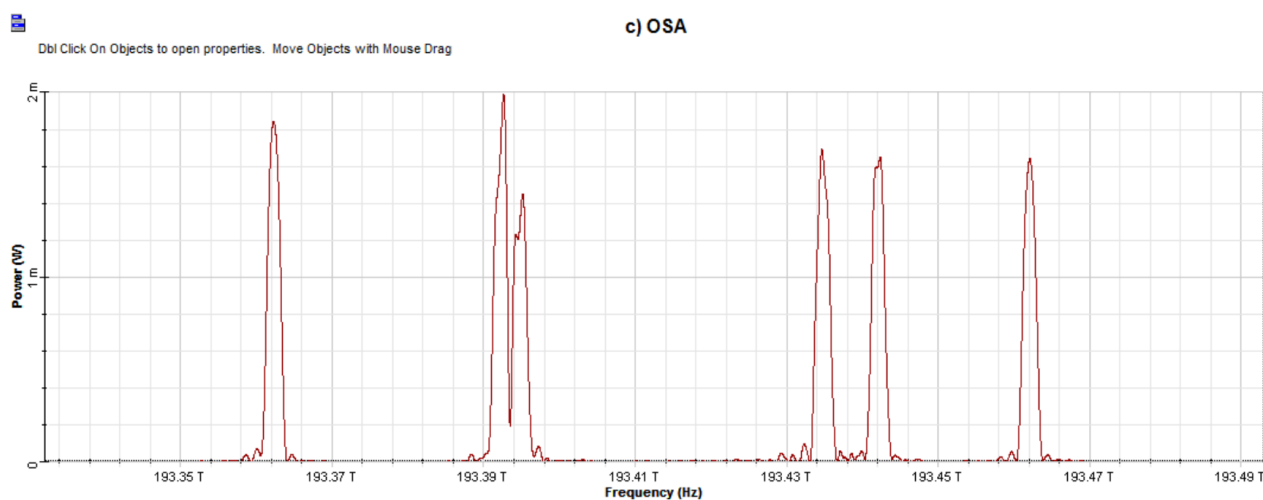


Рисунок 3.25 — Спектральні характеристики адресних 2 λ -ВБР структур, що входять в масив

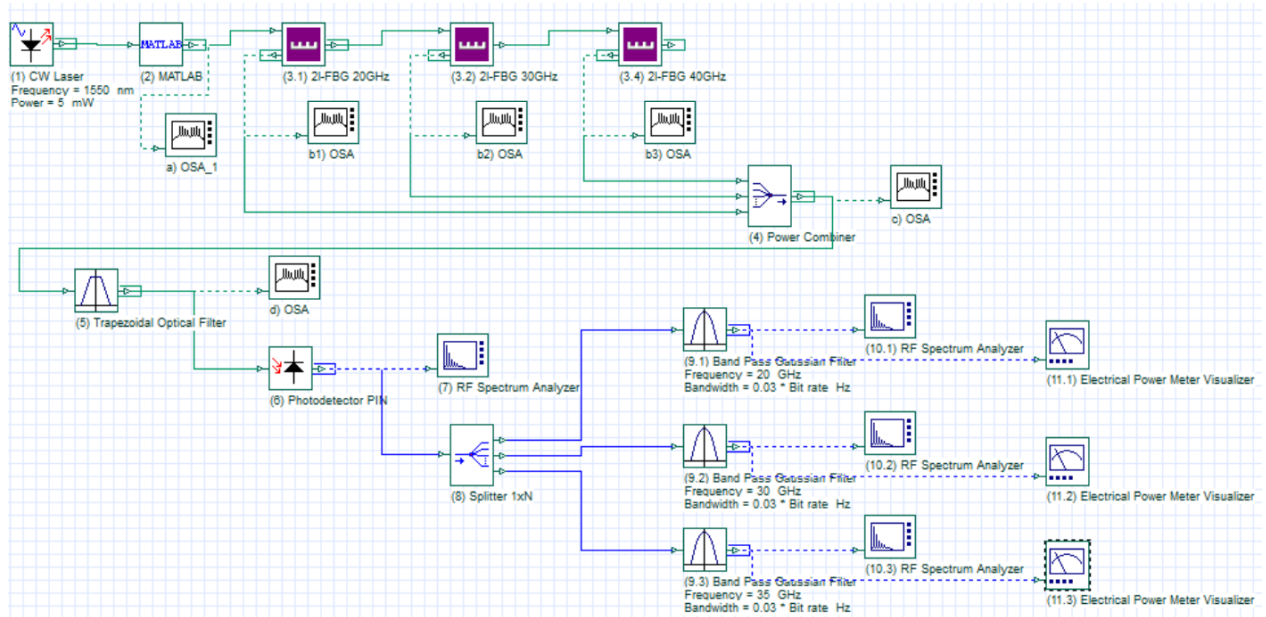


Рисунок 3.26 — Модель оптико електронної схеми опитування адресних 2λ -ВБР структур, заснована на аналізі відбитого сигналу

Безперервне широкопasmовe лазерне випромінювання з лазерного джерела - (1) CWLaser проходить через прямокутний частотний фільтр - (2) MATLAB і формує прямокутне широкопasmовe випромінювання з шириною еквівалентної діапазону вимірювань. Випромінювання потрапляє на масив адресних 2λ -ВБРі ($i = 1, 2, 3$) структур і відбивається від нього. Сумарне відображення оптичного сигналу від масиву датчиків моделюється об'єднувачем потужності оптичного сигналу - (4) Power Combiner. Після чого загальний відбитий сигнал проходить через лінійний похилий фільтр - (5) Trapezoidal Optical Filter лівий схил якого моделює асиметричне зміна амплітуд оптичного сигналу. Результуючий сигнал приймається на фотоприймачі - (6) Photodetector PIN, вихід якого через - (8) Splitter 1xN розділяється на три частотних електричних фільтра - (9.i) Band Pass Gaussian Filter ($i = 1, 2, 3$). Амплітуда потужності коливань на адресних частотах вимірюється на відповідних - (11.i) Electrical Power Meter Visualizer ($i = 1, 2, 3$) вимірі потужності.

Спектр відбитого від масиву адресних 2λ -ВБРі структур показаний на рисунку 3.27,а, спектр після лінійного похилого фільтра на рисунку 3.27, б.

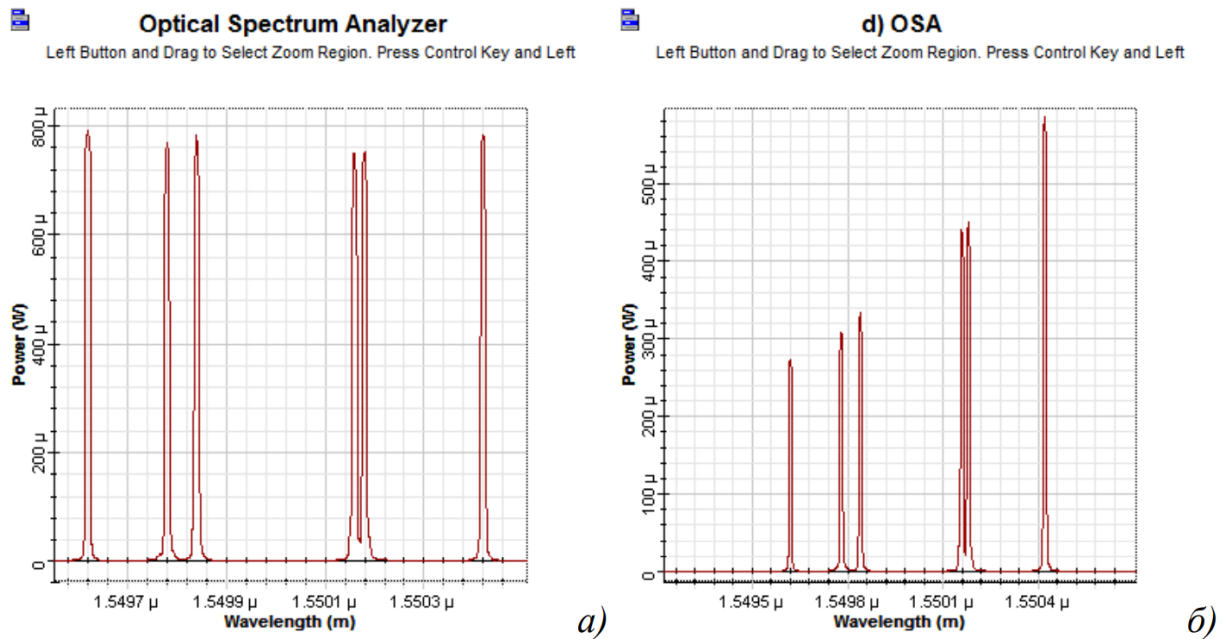


Рисунок 3.27 — Спектральні характеристики, адресних 2λ -ВБР структур в масиві : а) - до проходження похилого фільтра ; б) - після похилого фільтра

Перехресне биття несучих частот масиву 2λ -ВБРі структур після фотоприймача формує безліч частот биття . У низькочастотну область до 40 ГГц з них потрапляють частоти : $\{2.35, 7.5, 20, 27.5, 30, 32.4, 40\}$ ГГц, що повністю відповідає низькочастотному спектру коливань потужності струму після фотоприймача , який для даного взаємного розташування масиву адресних 2λ - ВБРі структур наведено на рисунку 3.28.

Оцінимо вплив зміщення центральної довжини хвилі адресної 2λ -ВБР2 структури на результати вимірювання. Для чого , змодельємо зміщення центральної довжини хвилі адресної 2λ -ВБР2 структури в діапазоні від 1550.3 до 1550.80 нм з дискретним кроком 0.05 нм, отримаємо результати вимірювань частоти і амплітуди опитування на адресному частоті для 11 послідовних різних положень 2λ -ВБР2 структури.



(7) RF Spectrum Analyzer

Left Button and Drag to Select Zoom Region. Press Control Key and Left

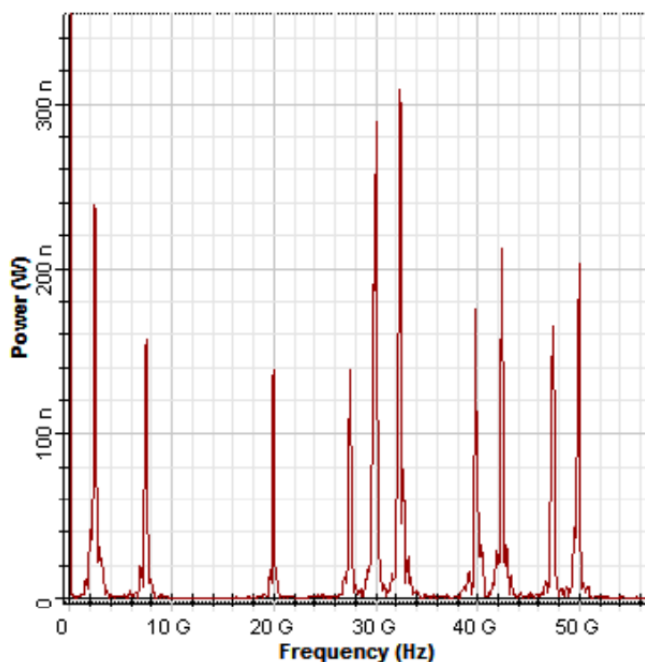


Рисунок 3.28 — Спектральна характеристика низькочастотного сигналу після фотоприймача

Вимірювання амплітуди коливань на адресних частотах 20, 30, 40 ГГц для 11 різних положень 2λ -ВБР2 наведені на рисунку 3.29. Як можна бачити, залежність величини амплітуди від зсуву центральної довжини хвилі не монотонна. У величину амплітуди надає вклад не тільки коливання на адресній частоті, але і на перехресних частотах биття, що виникають в системі. Наприклад, для ситуаційного положення під номером 3 для 2λ -ВБР2 при центральній довжині хвилі 1550.4 нм, виникають різкі максимуми амплітуд на адресних частотах 20, 30 и 40 ГГц, рисунок 3.29.

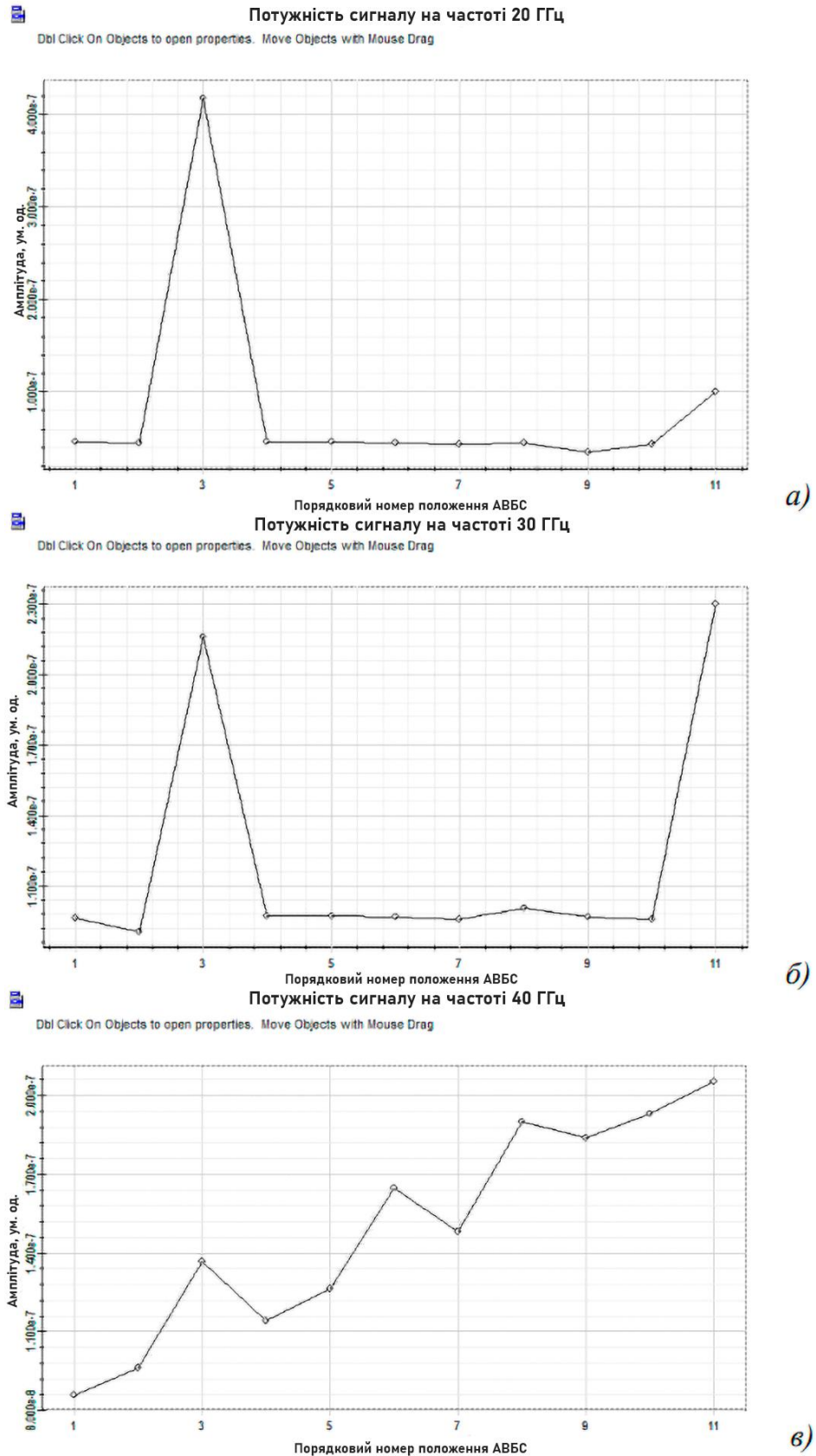


Рисунок 3.29 — Амплітуді коливання радіочастотного сигналу на адресних частотах 2λ-ВБРі при зміщенні 2λ-ВБР2 від 1550.3 до 1550.80 нм з дискретним кроком 0.05 нм: а) - адресна частота 20 ГГц; б) - 30 ГГц; в) - 40 ГГц

Це викликано тим, що для цього ситуаційного взаємного розташування виникає ситуація взаємного розташування адресних 2λ -ВБР в масиві, при яких частота 20 ГГц виникає тричі - між частотами F1 і F2, між частотами F4 і F5, між частотами F5 і F6 (рисунок 3.30). Частота в 30 ГГц виникає двічі - між частотами F1 і F3, між частотами F3 і F4 (рисунок 3.30). Частота 40 ГГц виникає теж двічі - між частотами F2 та F4, між частотами F4 и F6 (рисунок 3.30). З них тільки частоти F5 і F6 формують адресну частоту 2λ -ВБР1 в 20 ГГц, а частоти F1 і F3 формують адресну частоту 2λ -ВБР2 в 30 ГГц, а частоти F2 і F4 адресну частоту 2λ -ВБР2 в 40 ГГц. Наявність в системі додаткових перехресних биттів на співпадаючих з адресними частотами і викликають різкий стрибок амплітуд на цих частотах.

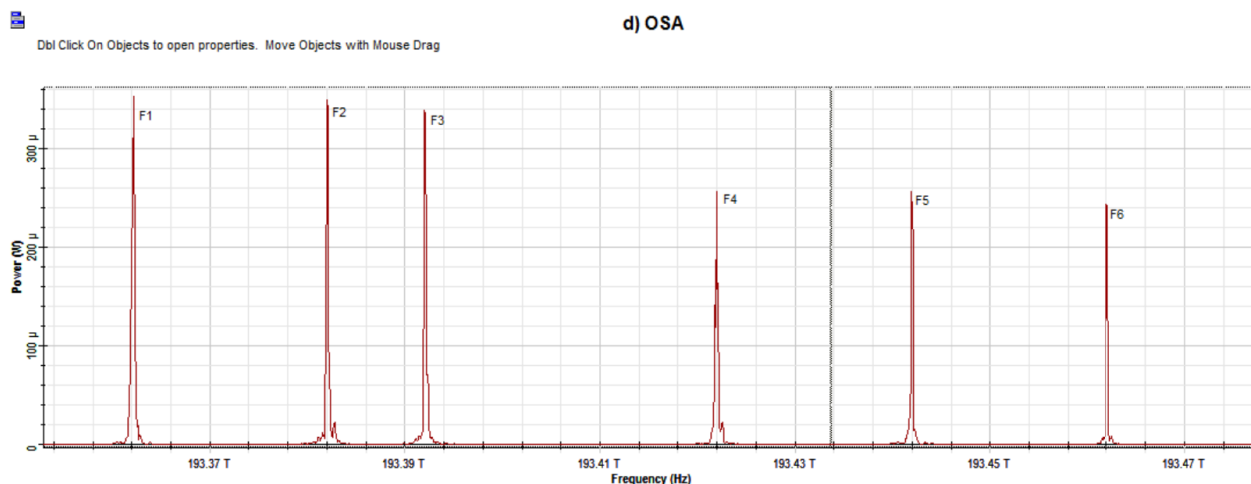


Рисунок 3.30 — Спектр в оптичному діапазоні при центральній довжині хвилі 2λ -ВБР2 рівній 1550.4 нм

Аналогічна картина спостерігається і з різким стрибком амплітуди коливання на адресній частоті 40 ГГц, при шостому та восьмому по рахунку положенні 2λ -ВБР2 рівній 1550.55 і 1550.80 нм, відповідно, - рисунок 3.29,в. Такий же різкий стрибок амплітуді з'являється при виникненні співпадаючих частотах для положення 2λ -ВБР2 рівній 1550.80 нм при одинадцятому за рахунками положенні для адресних частот 20 и 30 ГГц, малюнки 3.29,а і 3.29,б.

В результаті дослідження комп'ютерної моделі було показано, що схема опитування масиву адресних 2λ -ВБР структур повністю збігається з прогнозами

теоретичної моделі и може бути реалізована у виде радіо-фотонної сенсорної системи опитування АВБС датчиків, при використанні в якості датчиків масиву адресних 2λ -ВБР структур.

ВИСНОВОК

В результаті досліджень, проведених в роботі, запропонований і розроблений новий клас сенсорних систем - «Радіофотонні сенсорні системи на адресних волоконних бреггівських структурах», що є головним результатом роботи. Проведені дослідження включали в себе створення концепції, теорії і техніки адресних волоконних бреггівських структур, розробці принципів побудови єдиного поля комплексування волоконно-оптичних датчиків на їх основі, радіофотонних методик обробки вимірювальної інформації, отриманої з датчиків, при реалізації одно-, мало- і багатосенсорних додатків і радіофотонних полігармонічних (з непарним числом гармонік) методів дослідження характеристик зазначених структур для калібрування датчиків на їх основі. Показано, що застосування зазначених систем дозволяє вирішити, важливу науково-технічну проблему - поліпшення метрологічних та техніко-економічних характеристик, а також розширення функціональних можливостей існуючих радіофотонних сенсорних систем, що підтверджено наступними основними результатами.

1. Проведено аналіз існуючих і перспективних радіофотонних сенсорних систем на волоконних бреггівських структурах; виявлені причини, стримуючі їх широке використання, особливо в багатосенсорних додатках, і визначені резерви для поліпшення їх метрологічних і техніко-економічних характеристик, а також розширення функціональних можливостей; запропоновані концепція адресних волокон їх бреггівських структур і радіофотонних сенсорних систем на їх основі; розроблений ієрархічний класифікатор завдань проектування, виробництва і експлуатації радіофотонних сенсорних систем на адресних волоконних бреггівських структурах; сформульовані мета, основна наукова задача і напрямки наукових досліджень для їх досягнення.

2. Розроблено концепцію адресних волоконних бреггівських структур, яка полягає у формуванні в їх оптичному спектральному відгуку двох надвузькосмугових складових, рознесених на унікальну різницеву частоту, що лежить в радіочастотному діапазоні довжин хвиль, що є адресою

конкретної структури; при фотодетекторній обробці оптичного випромінювання, минулого через або відбитого від структури щодо спектральної характеристики фіксованого оптичного фільтра лінійно-похилого типу, виділяється радіочастотна огибає биття, частота якої дорівнює різницевій і є адресою структури, а її амплітудні характеристики дозволяють визначити положення оптичної центральної довжини хвилі структури в радіочастотний діапазоні. Концепція побудована на основі використання переваг як оптико-електронних волоконно-оптичних, так і полігармонічних радіофотонних сенсорних систем.

Обрано два теоретичних підходи до формування адресних волоконних бреггівських структур з інваріантним відстанню між її елементами при накладення на неї вимірюваних полів. Першим підходом є використання волоконних бреггівських решіток з двома симетричними фазовими π -зрушеннями (2 π -ВБР структура), а другим - використання двох ідентичних рознесених по довжині хвилі свержукополосних волоконних бреггівських решіток (2 λ -ВБР структура). Здійснено постановку і формалізація основних завдань управління параметрами адресному волоконній бреггівськими структури для вирішення різних завдань сенсорних систем та визначено правила їх запису з використанням безперервного даній операції, фазової маски і інтерферометрів Ллойда і Тальбота. Дано теоретичне обґрунтування метрологічних, техніко-економічних і функціональних переваг використання адресних волоконних бреггівських структур в радіофотонних сенсорних системах.

3. Отримано позитивні оцінки можливості реалізації радіофотонних сенсорних систем на адресних волоконних бреггівських структурах для рішення задач одно-, мало- і багатосенсорних додатків. Оцінки проводилися на основі комп'ютерного моделювання різних структурних і топологічних оптико-електронних схем опитування адресних датчиків, підтверджена правильність їх функціонування. Виконано натурні експерименти, результати яких повністю узгоджуються з теоретичними передбаченнями математичних моделей

результатами комп'ютерних експериментів. Досліджено загальні та окремі випадки виникнення помилкових частот.

Окремо досліджено випадок виникнення адресних або помилкових частот екстремально близьких, але не рівних іншим адресним частотам. Показана висока ефективність запропонованих методів математичної обробки сигналів биття на адресних частотах, які дозволяють визначити положення бреггівських довжин хвиль всіх адресних структур в масиві при наявності будь-яких помилкових і екстремально близьких до адресних частот.

У цій роботі використані нормативні посилання на:

1. IEEE 802.3ah - IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 3: CSMA / CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. Approved in 24.07.2004.
Status: in force. Available at: http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/2006-11_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf - 02.09.2016.
2. ITU-T G984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. Approved in 2008-03-29. Status: in force. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.984.1-200803-I!!PDFE&type=items - 02.09.2016.
3. ГОСТ 13646-68. Термометри скляні ртутні для точних вимірів.- М .: Видавництво стандартів, 1968. - 9 с.

Список скорочень, позначень і нормативних посилань

2 λ -ВБР - волоконна бреггівська решітка з подвійною спектральною характеристикою;

2 π -ВБР - волоконна бреггівська решітка з двома симетричними фазовими π -зрушеннями;

АВБР - адресна волоконна бреггівська решітка;

АВБС - адресна волоконна бреггівська структура;

ААІФ - аналізатор амплітуди і фази

АЦП - аналого-цифровий перетворювач;

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика;

БПФ - швидке перетворення Фур'є;

ВБР - волоконна бреггівська решітка;

ВБС - волоконна бреггівська структура;

БФД - балансний фотодетектор;

ВОД - волоконно-оптичний датчик;

ВОДВ - волоконно-оптичний датчик вібрації;

ВЧ - високі частоти;

ДВСП - дискретна витягнута сфероїдальна функція Слєп'яна;

ДПФ - дискретне перетворення Фур'є;

ДСДФС - два симетричних дискретних фазових зсуву;

Квод - квазі розподілений волоконно-оптичний датчик;

КП - контролер поляризації;

КПОФ - комбінований просторовий оптичний фільтр;

КПФ - комбінований просторовий фільтр;

ЛЧМ - лінійна частотна модуляція;

ММЦ - модулятор Маха-Цендера;

МСВ - мікро-структуроване волокно;

НЧ - низькі частоти;

ОАС - оптичний аналізатор спектру;

ОПРФ - оптичний смуговий радіофотонний фільтр;
 ОПФ - оптичний смуговий фільтр;
 ОСЦ - осцилограф;
 ОВФ - оптичний вузькосмуговий фільтр;
 ОП - оптичний підсилювач;
 ОЕГ - оптико-електронний генератор
 ОЕАГ - оптико-електронний автогенератор;
 РДВОД - реєстратор даних для волоконно-оптичних датчиків;
 ПЗ - показник заломлення;
 ПФ - перетворення Фур'є;
 ПЗЗ - прилад із зарядним зв'язком;
 ПЛД - перебудовуване лазерне джерело;
 ПЛД - перебудовується лазерний діод;
 Розплідник - радіофотонні сенсорні системи;
 СФФП - скануючий фільтр Фабрі-Перо;
 НВР - упорядкована хвилевідна решітка;
 УФ - ультрафіолетовий;
 ФД - фотодетектор;
 ФМ - фазовий модулятор;
 ШЛД - широкосмуговий лазерний діод;
 ЕАС - електричний аналізатор спектру;
 ЕВАС - електронний векторний аналізатор мереж;
 ЕОМ - електрооптичний модулятор;
 ЦСП - цифровий сигнальний процесор;
 AWG - мультиплексування на впорядкованих хвилевідних решітках (від англ. - arrayed waveguide gratings);
 FT - Fourier transform (перетворення Фур'є)
 OFDR - оптична рефлектометрія в частотній області (від англ. - optical frequency domain reflectometry);

OTDR - оптична рефлектометрія в тимчасовій області (від англ. - optical time domain reflectometry);

TDM - мультиплексування в тимчасовій області (від англ. - time domain multiplexing);

WDM - мультиплексування з поділом по довжині хвилі (від англ. - wavelength division multiplexing);

$\alpha = (1 / \Lambda) (\delta \Lambda / \delta T)$ - коефіцієнт термічного розширення;

β - просторова частота;

$\delta (x)$ - дельта-функція Дірака;

δ — повна ширина на половині висоти спектрального відгуку;

θ - фаза модуляції в ВБР;

κ - постійна поширення;

Λ - період решітки;

λ, λ_B - центральна довжина хвилі АВБС;

$\Delta \lambda$ - зміщення центральної довжини хвилі АВБС;

σ - параметр добротності резонансного контуру;

σ_n - індекс модуляції коефіцієнта заломлення;

φ - величина фазового зсуву;

ω_B - бреггівськими частота АВБС;

Ω, Ω_i — адресна частота АВБС, АВБС_i;

ω, ω_i — частота лівої складової двухчастотного відгуку АВБС, АВБС_i;

$\omega + \Omega, \omega_i + \Omega_i$ — частота лівої складової двухчастотного відгуку АВБС, АВБС_i;

ω_{Max} і ω_{Min} - максимальне і мінімальне значення діапазону частот;

A, A_i - амплітуда коливань на частоті ω, ω_i ;

B, B_i - амплітуда коливань на частоті $\omega + \Omega, \omega_i + \Omega_i$;

D, D_i - амплітуда коливань електричного сигналу на адресній частоті

АВБС - $\Omega, \text{АВБС}_i - \Omega_i$;

$DH, H D_i$ - нормоване значення амплітуди коливань електричного сигналу на адресній частоті АВБС - Ω , АВБС $_i$ – Ω_i ;

F_m - коефіцієнт ряду Фур'є;

$M(\omega), M_i(\omega)$ - коефіцієнт модуляції биття на адресній частоті Ω , Ω_i при бреггівській частоті АВБС, рівній ω ;

n_0 - ефективний коефіцієнт заломлення;

Δn_{AC} і Δn_{DC} - коефіцієнти модуляції показника заломлення;

n_{mod} - величина наведеного показника заломлення ВБР;

n_{eff} - ефективний показник заломлення серцевини волокна;

$t, \Delta t$ - час, часовий інтервал;

z - координата вздовж довжини волокна.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chao, W., Jianping, Y. Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems / W. Chao, Y. Jianping // OPTICS EXPRESS. - 2013. - Vol. 19. - No. 21. - p. 22868 - 22884.
2. Capmany, J., Novak, D. Microwave photonics combines two worlds / J. Capmany, D. Novak // Nature. Photonics - 2007. - p. 319-330.
3. Seeds, AJ Microwave photonics / AJ Seeds // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2002. - Vol. 50. - No. 3, - p 877-887.
4. Seeds, AJ, Williams, KJ Microwave photonics / AJ Seeds, KJ // Journal of Lightwave Technology. - 2006. - Vol. 24. - No. 12. - p. 4628-4641.
5. Yao, JP Microwave Photonics / JP Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2009. - Vol. 27. - No. 3. - p. 314-335.
6. Yao, JP A tutorial on microwave photonics - Part I / JP Yao // IEEE Photonics. Society. Newsletter. - 2012. - Vol. 26. - No. 2. - p. 4-12.
7. Yao, JP A tutorial on microwave photonics - Part II / JP Yao // IEEE Photonics. Society. Newsletter. - 2012. - Vol. 26. - No. 3. - p. 5-12.
8. Erdogan, T. Fiber grating spectra / T. Erdogan // Journal of Lightwave Technology. - 1997. - Vol. 15. - No. 8. - p. 1277-1294.
9. Kashyap, R. Fiber Bragg Gratings / R. Kashyap. - Academic Press, 1999. - p. 478.
10. Giles, CR Lightwave applications of fiber Bragg gratings / CR Giles // Journal of Lightwave Technology. - 1997. - Vol. 15. - No. 8. - p. 1391-1404.
11. Rao, YJ In-fiber Bragg grating sensors / YJ Rao // Measurement Science and Technology. - 1997. - Vol. 8. - No. 4. - p. 355-375.
12. Minasian, RA Photonic signal processing of high-speed signals using fiber gratings / R. A. Minasian // Optical Fiber Technology. - 2000. - Vol. 6. - No. 2. - p. 91-108.
13. Capmany, J., Pastor, D., Ortega, B., Cruz, JL, Andres, MV Applications of fiber Bragg gratings to microwave photonics / J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega, JL Cruz, MV Andres // Fiber Integrated Optics. - 2000. - Vol. 19. - No. 4. - p. 483-494.
14. Wang, C., Yao, JP Fiber Bragg gratings for microwave photonics applications / C. Wang, JP Yao // Microwave Photonics, Second Edition / CH Lee. - CRC Press, 2013.

p. 125-174.

15. Blais, S., Yao, JP Photonic true-time delay beamforming based on superstructured fiber

Bragg gratings with linearly increasing equivalent chirps / S. Blais, JP Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2009. - Vol. 27. - No. 9. - p. 1147-1154.

16. Minasian, RA Photonic signal processing of microwave signals / RA Minasian // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2006. - Vol. 54. - No. 2. - p. 832-

17. Blais, S., Yao, JP Optical single sideband modulation using an ultranarrow dualtransmission-band fiber Bragg grating / S. Blais, JP Yao // IEEE Photonics Technology Letters. - 2006. - Vol. 18. - No. 21. - p. 2230-2232.

18. Yao, JP, Zeng, F., Wang, Q. Photonic generation of Ultra-Wideband signals / JP Yao, F. Zeng, Q. Wang // Journal of Lightwave Technology. - 2007. - Vol. 25. - No. 11. - p. 3219-3235.

19. Li, W., Zhang, W., Yao, JP A wideband 360 ° photonic-assisted microwave phase shifter using a polarization modulator and a polarization-maintaining fiber Bragg grating / W. Li, W. Zhang, JP Yao // OPTICS EXPRESS. - 2012. - Vol. 20. - No. 28. - p. 29838 - 29843.

20. Li, W., Yao, JP Investigation of photonic assisted microwave frequency multiplication based on external modulation / W. Li, JP Yao // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2010. - Vol. 58. - No. 11. - p. 3259-3268.

21. Li, Z., Wang, C., Li, M., Chi, H., Zhang, X., Yao, JP Instantaneous microwave frequency measurement using a special fiber Bragg grating / Z. Li, C. Wang, M. Li, H. Chi, X. Zhang, JP Yao // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. - 2011. - Vol. 21. - No. 1. - p. 52-54.

22. Li, W., Yao, JP An optically tunable frequency-multiplying optoelectronic oscillator / W. Li, JP Yao // IEEE Photonics Technology Letters. - 2012. - Vol. 24. - No. 10. - p. 812-814.

23. JP Yao, Photonic generation of microwave arbitrary waveforms / JP Yao // Optics Communication. - 2011. - Vol. 284. - No. 15. - p. 3723-3736.

24. Нурієв, І.І. Радіофотонні Полігармонічні системи інтеррогації комплексірованніе волоконно-оптичних датчиків: дис. д-ра техн. наук: 05.11.13 / Нурієв Ильнур Ильдарович. - Казань, 2017. - 515 с.
25. Marpaung, D., Roeloffzen, C., Heideman, R., Leinse, A., Sales, S., Capmany, J. Integrated microwave photonics / D. Marpaung, C. Roeloffzen, R. Heideman, A. Leinse, S. Sales, J. Capmany // Laser and Photonics Reviews. - 2013. - Vol. 7. - No. 4. - p. 506-538.
26. Liu, YQ, Yang, JL, Yao, JP Continuous true-time-delay beamforming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line / YQ Liu, JL Yang, JP Yao // IEEE Photonics Technology Letters. - 2002. - Vol. 14. - No. 8. - p. 1172-1174.
27. Shahoei, H., Li, M., Yao, JP Continuously tunable time delay using an optically pumped linearly chirped fiber Bragg grating / H. Shahoei, M. Li, JP Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2011. - Vol. 29. - No. 10. - p. 1465-1472.
28. Feng, KM, Chai, JX, Grubsky, V., Starodubov, DS, Hayee, MI, Lee, S., Jiang, X., Willner, AE, Feinberg, J. Dynamic dispersion compensation in a 10-Gb / s optical system using a novel voltage tuned nonlinearly chirped fiber Bragg grating / KM Feng, JX Chai, V. Grubsky, DS Starodubov, MI Hayee, S. Lee, X. Jiang, AE Willner, J. Feinberg // IEEE Photonics Technology Letters. - 1999. - Vol. 11. - No. 3. - p. 373-375.
29. Matsumoto, S., Takabayashi, M., Yoshiara, K., Sugihara, T., Miyazaki, T., Kubota, F. Tunable dispersion slope compensator with a chirped fiber grating and a divided thin-film heater for 160-Gb / s RZ transmissions / S. Matsumoto, M. Takabayashi, K. Yoshiara, T. Sugihara, T. Miyazaki, F. Kubota // IEEE Photonics Technology Letters. - 2004. - Vol. 16. - No. 4. - p. 1095-1097.
30. Jablonski, M., Tanaka, Y., Yamaguchi, H., Sato, K., Higashi, N., Kikuchi, K. Entirely thin-film allpass coupled-cavity filters in a parallel configuration for adjustable dispersionslope compensation / M. Jablonski, Y. Tanaka, H. Yamaguchi, K. Sato, N. Higashi, K. Kikuchi // IEEE Photonics Technology Letters.Lett. - 2001. - Vol. 13. - p. 1188-1190.

31. LE Adams, H. Mavoori, S. Jin, and RP Espindola, Dynamic measurements of magnetically-strain tuned FBG for fast reconfigurable add / drop / LE Adams, H. Mavoori, S. Jin, and RP Espindola // in Proc. OFC'99. - San Diego, 1999. - p. 143-145.
32. Triana, A., Pastor, D. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences / A. Triana, D. Pastor // Proc. SPIE. - Vol. 10231 - 2017. - P.102310H
33. Kersey, AD, Dandridge, A., Davis, MA Low-crosstalk code-division multiplexed interferometric array / AD Kersey, A. Dandridge, MA Davis // Electronics Letters. - 1992. - Vol. 4. - No. 28. - p. 351-352.
34. Slepian, D. Prolate spheroidal wave functions, fourier analysis, and uncertainty - 5: the discrete case / D. Slepian // Bell System Technical Journal. - 1977. - Vol. 57. - No. 5. - p. 1371-1430.
35. Djordjevic, IB, Saleh, AH, Küppers, F. Design of DPSS based fiber bragg gratings and their application in alloptical encryption, OSDMA, optical steganography, and orthogonal-division multiplexing / IB Djordjevic, AH Saleh, F. Küppers // OPTICS EXPRESS. - 2014. - Vol. 22. - No. 9. - p. 10882 - 10897.
36. Pastor, D., Triana, C., Banos, R. Coherent optical en / decoding employing discrete prolate spheroidal sequences based super structured FBGS / D. Pastor, C. Triana, R. Banos // European Conference on Optical Communication (ECOC). - Valencia, 2015. - p. 805 - 808.
37. Xu, O., Zhang, J., Yao, J. High speed and high resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on microwave photonic filtering and chirped microwavepulse compression / O. Xu, J. Zhang, J. Yao // Optics Letters. - 2016. - Vol. 41. - No. 21. - p. 4859 - 4862.
38. Liu, W., Li, M., Wang, C., Yao, JP Real-time interrogation of a linearly chirped FBG sensor based on chirped pulse compression with improved resolution and signal-to-noise ratio / W. Liu, M. Li, C. Wang, JP Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2011. - Vol. 29. - No. 9. - p. 1239-1247.

39. Kong, F., Li, W., Yao, JP Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator / F. Kong, W. Li, JP Yao // Optics Letters. - 2013. - Vol. 38. - No. 14. - p. 2611-2613.
40. Ricchiuti, AL, Barrera, D., Sales, S., Thevenaz, L., Capmany, J. Long Weak FBG Sensor Interrogation Using Microwave Photonics Filtering Technique / AL Ricchiuti, D. Barrera, S. Sales, L. Thevenaz, J. Capmany, // IEEE Photonics Technology Letters. - 2014. - Vol. 26. - No. 20. - p. 2039-2042.
41. Wang, YP, Zhang, JJ, Coutinho, O., Yao, JP Interrogation of a linearly chirped FBG sensor with high resolution using a linearly chirped optical waveform / YP Wang, JJ Zhang, O. Coutinho, JP Yao // Optics Letters. - 2015. - Vol. 40. - No. 21. - p. 4923- 4926.
42. AD Kersey, TA Berkoff, WW Morey, Multiplexed FBG strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter / AD Kersey, TA Berkoff, WW Morey // Optics Letters. - 1993. - Vol. 18. - No. 16. - p. 1370-1372.
43. Yao, J. Optoelectronic Oscillators for High Speed and High Resolution Optical Sensing / J. Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2017. - Vol. 35. - No. 16. - p. 3489-3497.
44. Li, M., Li, W., Yao, JP, Azana, J. Femtometer-resolution wavelength interrogation using an optoelectronic oscillator / M. Li, W. Li, JP Yao, J. Azana // IEEE Photon. Conf. - Burlingame, CA, USA, 2012. - p. 298-299.
45. Chow, JH, M. Littler, IC, de Vine, G., McClelland, DE, Gray, MB Phase-sensitive interrogation of FBG resonators for sensing applications / JH Chow, ICM Littler, G. de Vine, DE McClelland, MB Gray // Journal of Lightwave Technology. - 2005. - Vol. 23. - No. 5. - p. +1881.
46. Li, W., Yao, JP An optically tunable optoelectronic oscillator / W. Li, JP Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2010. - Vol. 28. - No. 18. - p. 2640-2645.
47. Song, M., Yin, S., Ruffin, PB Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer / M. Song, S. Yin, PB Ruffin // Applied Optics. - 2000. - Vol. 39. - No. 7. - p. 1106-1111.
48. Kong, F., Romeira, B., Zhang, J., Li, W., Yao, JP A dual-wavelength fiber ring laser incorporating an injection-coupled optoelectronic oscillator and its application to

transverse load sensing / F. Kong, B. Romeira, J. Zhang, W. Li, JP Yao // Journal of Lightwave Technology. - 2014. - Vol. 32. - No. 9. - p. 1784-1793.

49. Jorgenson, RC, Yee, SS A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance / RC Jorgenson, SS Yee // Sensor and Actuators B: Chemical. - 1993. - Vol. 12. - No. 3. - p. 213-220.