

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра теоретичних основ радіотехніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Федір ДУБРОВКА

«__» _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

**на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою
«Радіосистемна інженерія»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Радіофотонна система живлення антенної решітки »**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РС-гб1-1

Кравчук Ярослав Олександрович _____

Керівник:

Ст. викладач

Мартинюк Сергій Євстафійович _____

Консультант з охорони праці:

К.б.н., доцент

Гусєв Аркадій Миколайович _____

Рецензент:

К.т.н., доцент

Турєєва Ольга Володимирівна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра теоретичних основ радіотехніки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіосистемна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Федір ДУБРОВКА

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кравчуку Ярославу Олександровичу

1. Тема проєкту «Радіофотонна система живлення для антенної решітки», керівник проєкту Мартинюк Сергій Євстафійович, доцент, затверджені наказом по університету від « ___ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту 5 червня _____

3. Вихідні дані до проєкту 4-елементна передавальна радіофотонна антенна решітка, центральна частота 10 ГГц, робоча смуга частот 4 ГГц

4. Зміст пояснювальної записки 1 Оглядова частина; 2 Теоретична частина; 3 Моделювання радіофотонного тракту; 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація із результатами радіофотонного тракту антенної решітки

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гусєв А.М., к.б.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 16 квітня 2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз ТЗ та методів реалізації	16.04.2020-23.04.2020	
2	Аналіз технологій реалізованих з застосуванням радіофотоніки	24.04.2020-1.05.2020	
3	Вибір послідовності елементів для для радіофотонного тракту	2.05.2020-9.05.2020	
4	Аналіз вибраних елементів на ринку, підбір по характеристикам	10.05.2020-17.05.2020	
5	Модельовання спроектованого радіотракту у ПО та оцінка показників	18.05.2020-25.05.2020	
6	Техніка безпеки та охорона праці при виготовленні виробу	25.05.2020-31.05.2020	
7	Висновки про викання ТЗ	1.06.2020-5.06.2020	

Студент

Ярослав КРАВЧУК

Керівник

Сергій МАРТИНЮК

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Радіофотонна система живлення антенної ре-
шітки»

Київ – 2020 року

АНОТАЦІЯ

Ключові слова - радіофотоніка, антенна решітка, оптичне волокно;

Метою даної роботи є проектування радіофотонного тракту живлення антенної решітки для вирішення проблем, які існують у класичному радіотракті таких як: завадостійкість, фазова стабільність, висока роздільна здатність, стійкість до радіоелектронної боротьби.

У першому розділі розглянуто проблеми класичних радіотехнічних засобів при сучасних вимогах до передачі даних за допомогою електромагнітних хвиль та аналіз радіофотонних систем до сучасних вимог. У другому розділі було послідовно розглянуто складові радіофотонного тракту для антенної решітки. Третій розділ містить в собі моделювання радіофотонного тракту і його аналіз. Отримані характеристики при моделюванні радіофотонного тракту мають задовільні результати.

ANNOTATION

Key words - radio photonics, antenna array, optical fiber;

The purpose of this research is to design a radio photonic power path of the antenna array to solve problems that exist in the classical radio path such as noise immunity, phase stability, high resolution, resistance to electronic warfare.

In the first section was made a researching of problems of classical radio engineering tools, with modern conditions for data transmission with electromagnetic waves, and analysis of radio photon systems to modern requirements. In the second section, the components of the radio photon path for the antenna array were investigated sequentially. The third section contains modeling of the radio photon path and its analysis. The obtained characteristics in the modeling of the radio photon path have satisfactory results. For the auxiliary electromagnets, and the analysis of radio systems before the current . In another storehouse, warehouses of the radio path for the antenna array were examined one after another. Third part contain modelling of the radio photon path and analysis. The characteristics which were recieved after investigation of the model of the radio photon path give successful results.

Зміст

Перелік скорочень.....	11
ВСТУП.....	12
1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	14
1.1 Недоліки та обмеження при застосуванні класичних аналогових трактів РЛС.....	17
1.1.2 Частотна залежність при скануванні променем ФАР.....	18
1.2 Радіофотоніка.....	21
2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	26
2.1 Оптична лінія	26
2.2 Оптичне джерело сигналу	31
2.3 Оптичні підсилювачі.....	34
2.4 Е/О перетворення і модуляція	36
2.5 Фотодетектор.....	39
2.6 Структура і основні характеристики АВОЛЗ.....	40
3 МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОФОТОННОГО ТРАКТУ	43
3.1 Модулюючий сигнал	44
3.2 Несучий оптичний сигнал.....	47
3.3 Модулятор Маха – Цендера (MZ-модулятор).....	47
3.4 Фотодетектор.....	50
3.5 Втрати при поширенні сигналу у вільному середовищі.....	52
3.6 Втрати у атмосфері.....	52
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	54
4.1 Визначення потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників.....	54

					РС61.464412.001 ПЗ		
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Кравчук Я.О.			Літ.	Лист	Листів
Перевірів		Мартинюк С.Є.				8	53
Н. Контр.					КПІ РТФ		
Затвердив							

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії	54
4.2.1 Організація робочих місць користувачів.....	54
4.2.2 Освітлення робочого місця користувача	56
4.2.3. Виробничий шум	57
4.2.4 Мікроклімат робочої зони.....	58
4.3 Електромагнітне випромінювання НВЧ	59
.5 Електробезпека	59
4.6 Пожежна безпека.....	60
Висновки	62
Список використаної літератури.....	63

					РС61.464412.001 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		10

Перелік скорочень

РЛС – радіолокаційні системи

НВЧ – надвисокі частоти

ККД – коефіцієнт корисної дії

НКІ – над короткі імпульси

АФАР – активна фазована антенна решітка

ФАР – фазована антенна решітка

АЦП – аналоговий-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ЕМІ – електромагнітні імпульси

ВОЛЗ – волокно-оптичні лінії зв'язку

RIN – relative intensity noise (шум інтенсивності)

РЧ – радіо частота

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

ВСТУП

Темою даної роботи є дослідження можливості створення радіофотонної системи живлення для антенної решітки. У зв'язку з тим, останнім часом у Радіолокаційних системах зросли вимоги до ефективності виявлення цілей виготовлених за технологією «стелс» та малогабаритних літальних апаратів у тому числі і безпілотних літальних апаратів. У зв'язку з цим стало актуальним застосування радіо фотонних систем які перевершують уже нам звичні традиційні по усіх ключових технічних характеристиках, в тому числі і стійкості до електромагнітних імпульсів, зменшенню габаритів, підвищеній фазо стабільності, значне підвищення ККД.

Актуальність теми засвідчує перший у світі повністю оптично керованого наземного радіолокатора огляду повітряного простору з конформною фазованою антенною решіткою НКІ дециметрового діапазону, створеною фірмою Hughes Research Laboratories (HRL) у 1995 році по контракту.

Застосування фотоніки забезпечило сканування по азимуту у межах 120° без погіршення якості діаграми направленості і ефективну роботу практично у всій смузі (більше 50% (приблизно 550 МГц) замість 3-5% як зазвичай (до 8-10 МГц) дециметрового діапазону. Завдяки цьому забезпечується робота радару одночасно по цілям у широкому діапазоні висот і дальностей, а широка миттєва смуга дає змогу знизити помітність роботи і вірогідність ураження цілі антирадарними ракетами противника, виявляти та проводити миттєву ідентифікацію практично усіх цілей з анти поглинаючим покриттям.

Двомірна (2 - D) решітка АФАР СКІ оглядового типу складається із 96 ширококутних випромінювачів, згрупованих у 24 колонки по 4 випромінювача у кожній колонці, керована 11-бітовими ЛЗ. Решітка L- діапазону (850-1400 МГц) здатна до передачі і прийому при кутах сканування більше ніж ± 60 градусів по азимуту.

Ціль мого дослідження є створення теоретичної бази для побудови оптичної системи живлення антенної решітки.

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		12

Задачею даного дослідження є аналіз сучасної області дослідження та передумов для створення для створення якісної оптичної системи живлення антенної решітки.

Об'єктом дослідження є наукові статті та досягнення науки і техніки в області радіофотоніки (нанофотоніки).

Предметом дослідження є теоретична і математична моделі НВЧ тракту з застосуванням елементів нанофотоніки.

Методи у даній роботі є теоретичний аналіз, огляд наукових статей та використання пакету програм OptiSystem.

Практичне значення отриманих результатів обумовлені тим, що вони направлені на створення радіофотонних антенних решіток нового покоління для застосування у різноманітних галузях, таких як: радари різного типу базування: повітряних, морських, космічних, наземних тощо. Застосування радіофотоніки також може покращити технічні характеристики існуючих антенних решіток шляхом заміни НВЧ трактів на оптичні компоненти.

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		13

1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

У ХХ столітті світ пережив дві масштабних війни, що породило промислову революцію та особливості технічного прогресу ХХ століття, холодну війну та гонку озброєнь. Це посприяло швидкому розвитку радіолокації та змінило уявлення людини про спостереження за рухомими та нерухомими цілями. Через появу необхідності виявлення рухомих, в тому числі і літаючих об'єктів та створенням перших РЛС, розвиток радіотехніки стрімко пішов у гору. Після того як радар визнали ефективним інструментом для виявлення авіації, почалась розробка технічних засобів, які могли б вивести з ладу ефективну роботу радару та оператора, який з ним працює. Внаслідок чого, щоб зробити радіолокаційні системи стійкими до контр-мір необхідно вдосконалення існуючих у цей час систем. Цей процес продовжується і по сьогоднішній день. З моменту створення першої, радіолокаційної системи збільшилась швидкість літаків, ракет, з'явилися нові види ракет, нові технології боротьби з радіолокаційними системами, в наслідок чого очікувано до РЛС почали ставити більш жорсткі вимоги, по усіх параметрах (наприклад збільшення дальності, точності вимірювання координат і швидкості цілі, завадостійкості), що привело до створення систем з електронним керуванням ДН антени (ФАР, АФАР)[1]. Модернізація РЛС вимагала компромісних рішень до інженерної складності таких параметрів як (мобільності, масо габаритні характеристики, потужність передавачів станцій, вартості систем). З ростом радіотехнічної бази РЕА і обчислювальної техніки у радіолокації почала інтенсивно застосовуватись цифрова обробка сигналів. Саме завдяки розвитку цифрової техніки, появою високошвидкісних АЦП і ЦАП, виникли принципово нові можливості для створення цифрових та адаптивних решіток, здатних прийняти та обробити всю інформацію, що міститься у структурі просторово часових електромагнітних полів у розкритті решітки, та майже без втрат перетворити її у дані про наявність та параметрах об'єктів[2].

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		14

Радіолокаційні станції нового покоління являють собою програмно-адаптивну систему, яка суміщає у собі такі функції як радіолокація та багатоканальний зв'язок, які реалізуються на одній платформі. Перед РЛС ставлять такі задачі як :

- Одночасне сканування декількох секторів простору
- Викриття скритих цілей
- Широкопasmугова передача даних
- Відстеження рухомих цілей у зоні видимості
- Та інші див. Рис 1

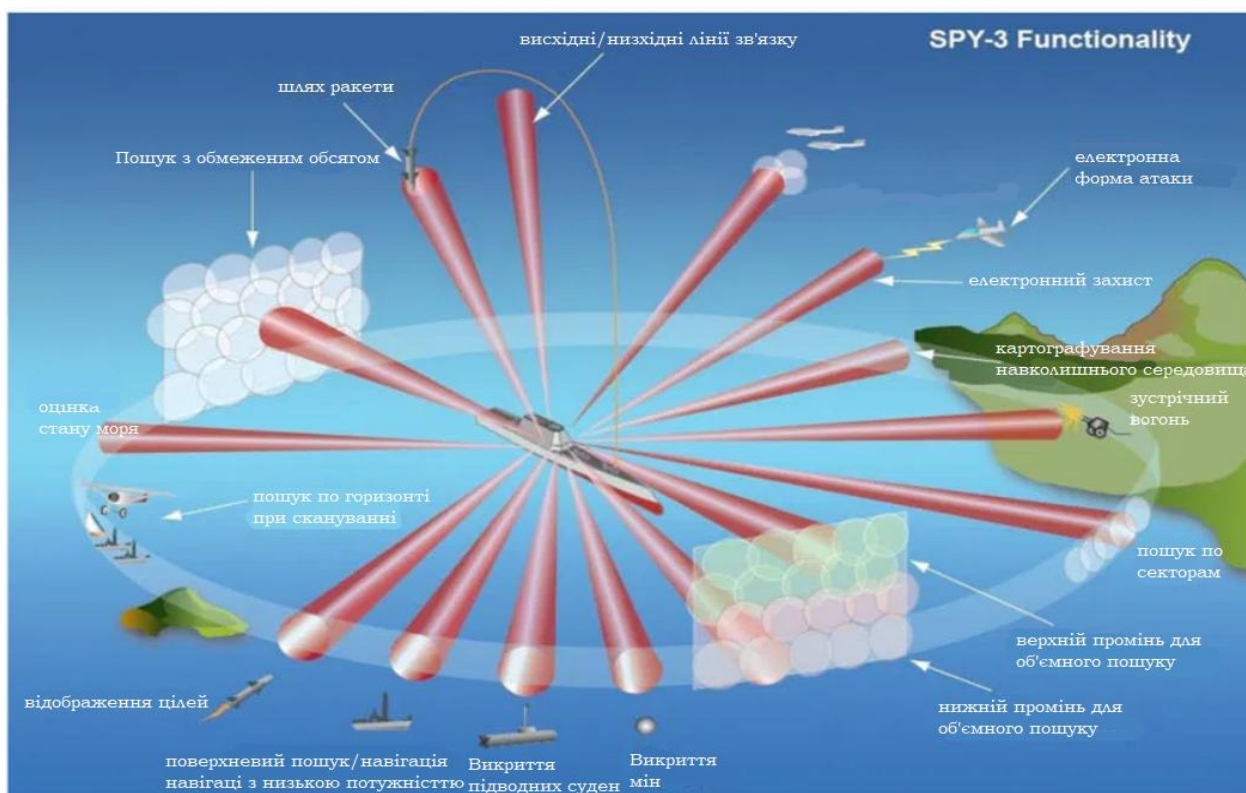


Рис. 1 Мультизадачна РЛС

Вимоги до РЛС нового покоління, та спосіб їх рішення за допомогою класичної радіотехніки:

1. Висока роздільна здатність для виявлення цілей

Рішення: Висока несуча частота сигналу та широка смуга пропускання сигналу

2. Проникна здатність для цілей які приховані за перешкодами такими як: будівлі, під землею, за рослинністю .

Рішення : Широкосмугові багато-діапазонні передавачі та приймачі з низьким рівнем фазових шумів.

3. Завадостійкість для зменшення вірогідності виявлення хибної цілі.

Рішення: Складні широкосмугові сигнали в поєднанні з низьким рівнем шуму і високим динамічним діапазоном.

4. Невеликі габарити та вага низький рівень енергоспоживання тепло-виділення для спрощення транспортування та обслуговування і зменшення вартості виготовлення систем.

Рішення: Мініатюризація, використання фідерних трактів з малим рівнем втрат.

5. Висока мобільність і рівень реконфігурації для багатофункціональності і створення можливості швидкої розгортки на місцевості.

Рішення: Застосування цифрових та адаптивних антенних решіток

6. Протидія радіоелектронній боротьбі для роботи РЛС при наявності активних завад та сприянню для прихованої роботи.

Рішення: Надширока смуга пропускання сигналу, використання шумодавів, адаптивна фільтрація.

Як ми бачимо з вимог до сучасних РЛС, які наведені вище, основна вимога зводиться до широкої робочої смуги частот. Але технічна реалізація її на класичних аналогових трактах має певні обмеження які ми розглянемо далі.

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		16

1.1 Недоліки та обмеження при застосуванні класичних аналогових трактів РЛС

1.1.1 Втрати у фідерному тракті

Основні вимоги до фідеру зводяться до його електрогерметичності, що розуміє під собою відсутність випромінювання енергії з фідера і малі теплові втрати. У вже традиційних коаксіальних фідерних трактах є не досить хороша електрогерметичність. Втрати зумовлено нагрівом провідника і діелектричними втратами.

Відомо, що діелектричні втрати у тракті зворотно пропорційні характеристичному опору кабелю і пропорційно зростають зі збільшенням частоти. Це виникає в наслідок дії змінного струму на діелектрик у ньому, також проявляються механізми перетворення електричної енергії у теплову, пропорційну напруженості електричного поля. Діелектричні втрати також залежать від характеристичного опору середовища і пропорційно збільшуються зі збільшенням частоти

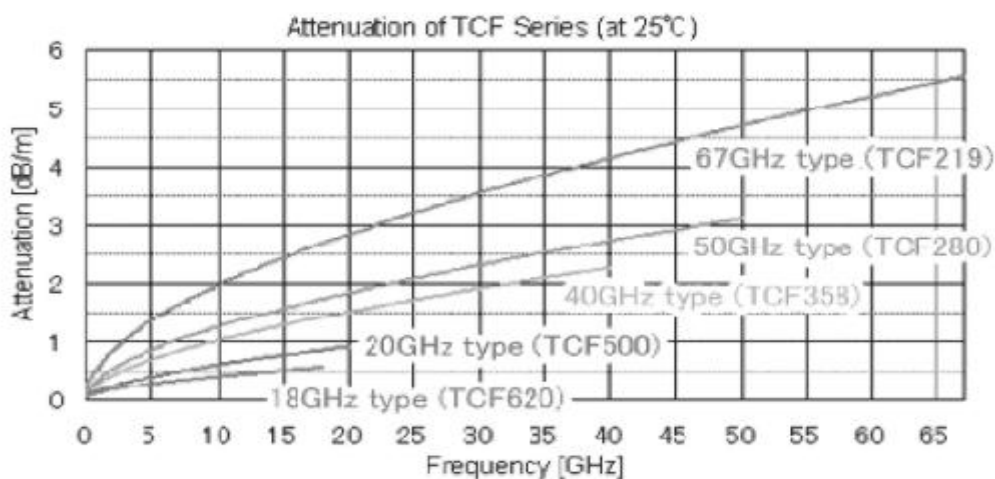


Рис.2 Втрати у коаксіальних лініях

На Рис. 2 показані втрати у дуже якісних надвисокочастотних коаксіальних лініях зв'язку. Як ми можемо бачити по графіку втрати у типових для РЛС НВЧ діапазонах складає від 1 до 5 дБ на метр, залежно від частоти. Наслідком цих

втрат є зменшення сигнал/шум на виході фідерного тракту. Для зниження втрат фідерних ліній, у РЛС використовують максимально близьке розташування джерела сигналу до випромінювача антенної решітки. Якщо ж неможливо скоротити дистанцію між генератором і випромінювачем тоді виникає необхідність у збільшенні потужності генератора або у більшому коефіцієнті підсилення.

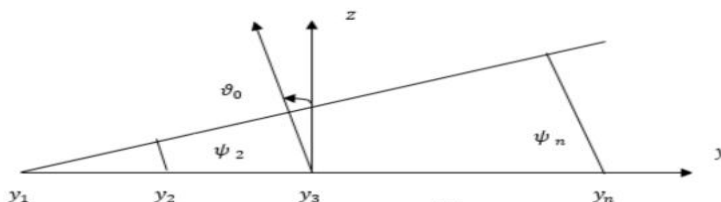
1.1.2 Частотна залежність при скануванні променем ФАР

Висока швидкість переміщення об'єктів, за якими ведеться спостереження створює необхідність використовувати РЛС з електронним способом керування діаграмою направленості, при якому сумування сигналів від окремих випромінювачів доповнюється фазовим або амплітудно-фазовим керуванням (ФАР, АФАР). В залежності від способу керування у скануючих антен розрізняють частотне, фазове і комутаційне сканування [3].

На практиці частіше за все застосовується фазове сканування. Обмеження, які накладаються вищеперерахованими методами керування променем практично ідентичні. Розглянемо метод сканування променем ДН за допомогою електричного керування фазовим розподілом полів на випромінювачах за допомогою фазообертачів. Максимум головної пелюстки ДН, перпендикулярно до фазового фронту, направлений під кутом ϑ_0 .

$$\vartheta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{y} \frac{\psi}{2\pi} \right), (1)$$

Де y – координата випромінювача решітки, λ – довжина хвилі, ψ – фаза сиг-



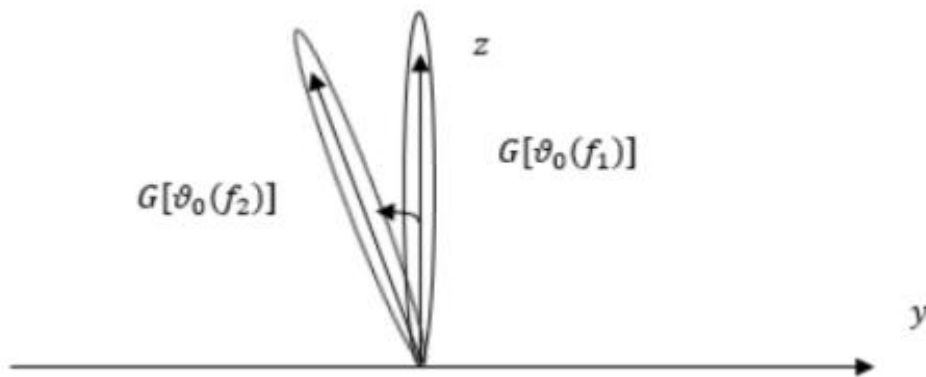
налу на випромінювачі решітки y .

Рис. 3 Напрямок головної пелюстки ДН під час сканування

Відповідно для отримання фіксованого кута сканування променю ϑ_0 фазові набіги ψ повинні бути пропорційні положенню елементу у антенній решітці (рис.3) При заданому куті сканування ϑ_0 , фаза збуджуючого сигналу елемента у має бути рівною ψ .

$$\psi = 2\pi \frac{y}{\lambda} \sin \vartheta_0 \quad (2)$$

Рівняння (2) описує реалізацію необхідних фазових зсувів для керування променем на практиці допоки сигнал можна вважати квазімонохромним, точніше тільки у тому випадку коли ширина смуги сигналу займає менше 1 – 5% від його несучої частоти. У випадку, якщо маєм справу з широкосмуговими сигналами, неможливо підтримувати пропорційність набігів для усіх спектральних складових. В залежності від довжин хвиль напрямки випромінювання будуть відрізнятись, а ДН решітки набуде частото-залежний « розкид» , що приводить до лінійних спотворень сигналу. Так, низько-частотні або ж високо-частотні спектральні компоненти сигналу, прийняти з напрямку ϑ_0 послаблюються через попадання в область слабшого підсилення ДН ан-



тени $G[\vartheta_0(f)]$ (рис.4).

Рис. 5 Частотна залежність фазового сканування

Підставимо у рівняння (2) замість довжини хвилі частоту.

$$\psi = 2\pi \frac{y}{c} f \sin \vartheta_0 = \frac{\omega y}{c} \sin \vartheta_0 \quad (3)$$

Для побудови ширококугової решітки фазові набіги на елементах повинні бути пропорційні частоті, що неможливо реалізувати при застосуванні фазового методу сканування.

Щоб обрахувати девіацію частоти, що необхідно для відхилення головної пелюстки ДН від цілі, запишемо рівняння залежності кутового напрямку променя від частоти (при умові, що відхилення променя відбувається при куті ϑ_{OT}), тоді:

$$\frac{\sin \vartheta_{OT}}{\lambda_2} = \frac{\sin \vartheta_0}{\lambda_1} \quad (4)$$

Відхилення променя можна показати як:

$$\vartheta_{o.n.} = \vartheta_{OT} - \vartheta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{f_1}{f_2} \sin \vartheta_0 \right) - \vartheta_0 \quad (5)$$

Використаємо рівняння для апроксимації ширини головного пелюстка ДН антенної решітки по рівню -3 дБ.

$$\theta_{3дБ} = \frac{102}{N} \quad (6)$$

N- кількість елементів у решітці. Підставивши у рівняння ширину головної пелюстки по рівню -3дБ як величину відхилення променя у (5):

$$f_2 = \frac{f_1 \sin \vartheta_0}{\sin \left(\vartheta_0 \pm \frac{102}{N} \right)} \quad (7)$$

З рівняння (7) нескладно визначити на яких частотах нижче і вище f_1 промінь відхилиться від цілі на ширину смуги 3дБ. Також з цього рівняння можна визначити вплив ефекту частотної залежності на систему при скануванні та спосіб усунення цього дефекту.

Хотілось би відмітити, що ефект частотної залежності променя в антенних решітках використовується для частотного сканування, коли керування променем відбувається за рахунок зміни частоти передавача. Цей спосіб сканування відносно легко реалізувати. Недоліком є те, що частота сигналу використовується для керування променем і її не можливо використати для збільшеного спектру сигналу або ж детектування рухомих цілей за допо-

										Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата						20

могою доплерівського ефекту. Тому і антенні решітки з частотним скануванням майже не використовуються у сучасних системах.

Для вирішення проблеми ширококутового сканування, замість фазових набігів між елементами використовують часову затримку. Тоді кожна частотна компонента сигналу буде випромінюватись у одному і тому ж напрямі, а від дожини хвилі залежатиме тільки ширина пелюсток ДН, а не кут сканування. Наприклад у деяких сучасних радарх із синтезованою апертурою використовують ширину смуги пропускання 1-2 ГГц для отримання високої роздільної здатності радіолокаційного зображення. У випадку застосування фазообертачів імпульси ширококутового сигналу опромінюють і сусідні сектори, через що розмивається зображення.

1.2 Радіофотоніка

В наслідок вище описаних вимог до сучасних РЛС та систем зв'язку, по суті наближення до граничних режимів роботи компонентів радіотракту, виникла мотивація вчених та інженерів до пошуку іншого шляху вирішення проблем. Було запропоновано розглянути оптичні лінії зв'язку для заміни НВЧ трактів систем зв'язку і РЛС. З'явилась нова галузь техніки – радіофотоніка.

У найпростішому вигляді оптична лінія (Рис. 6) являє собою лінію затримки, що включає в себе :

- Електро-оптичний (Е/О) перетворювач Для перенесення НВЧ сигналу у оптичний діапазон
- Оптичний передавальний носій
- Оптично-електричний (О/Е) перетворювач

					РС61.464412.001 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		21

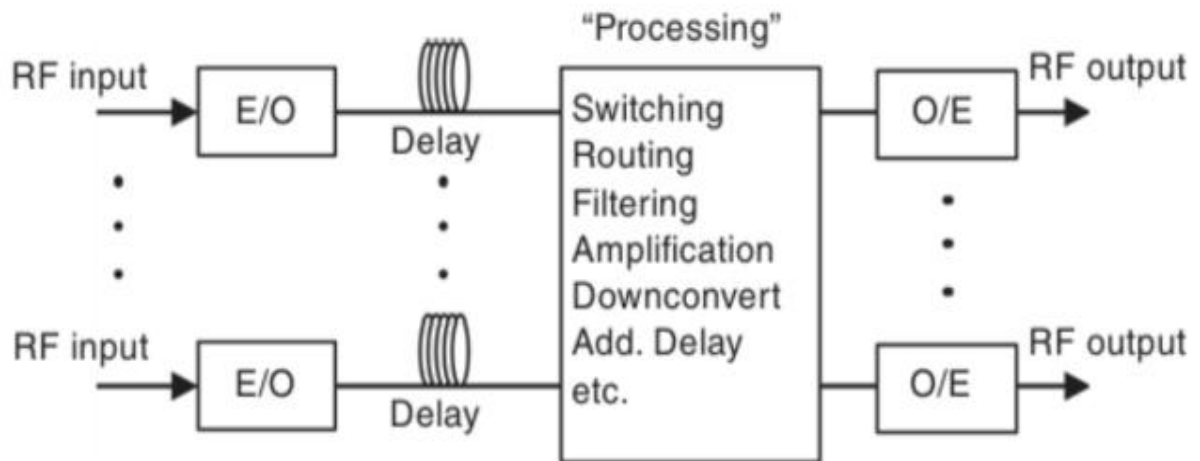


Рис. 6 Блок-схема багатоканальної оптичної лінії

Один або ж декілька сигналів переносяться у оптичний діапазон за допомогою E/O перетворювачів, де може до них застосовуватись різного роду оптична обробка, після чого передаються на O/E перетворювач, де відбувається демодуляція оптичного сигналу у електричний радіочастотний сигнал. Оптична обробка сигналу може бути різноманітною, в тому числі: комутація, маршрутизацію, фільтрація, перетворення частоти, підсилення і тому подібне.

Не зважаючи, що поки що оптичні компоненти мають доволі високу вартість, це не завадило їм стати одним з невід'ємних та головних компонентів обладнання не тільки сучасних та перспективних зразків повітряно-космічних, морських та наземних носіїв, але і базових станцій космічної мережі, інтернет та мобільного зв'язку.

Апаратуру сучасних АФАР виготовляють на основі твердотільних інтегральних НВЧ аналогових та швидкодієвих цифрових інтегральних схемах, технологія виробництва яких постійно вдосконалюється.

Також у зв'язку з тим, що в останні роки широко розпочали використовувати технологію «стелс», зменшення розмірів літальних апаратів що найбільш актуально для крилатих ракет, керованих ракет та безпілотних літаючих апаратів (далі - БПЛА), та розвитком доволі ефективних систем радіопротидії і електромагнітного придушення. В наслідок цього стала акту-

альною вимога до підвищення ефективності виявлення цілей які виконані за технологією «стелс», автоматичного розпізнавання цілей у реальному часі, багатофункціональності та скритності роботи і водночас підвищені загальної надійності зі значним зменшенням енергоспоживанням і масо-габаритних показників.

У той же час у комерційній області (особливо у мобільному та інтернет зв'язку) також зросли вимоги до завадостійкості та швидкості передачі даних через відчутне зростання завад у мегаполісах, що зв'язано з високим насиченням засобами зв'язку населення та різноманітних організацій, збільшенням потоку інформації, та значного підвищення вимог до якості зв'язку.

Одночасне виконання усіх вимог які необхідні для забезпечення вищеперерахованих задач виявилось практично неможливим для сучасних АР на основі традиційної радіоелектронної апаратури. Причиною цього є той факт, що традиційна РА в силу присутніх в ній обмежень не може забезпечити повноцінне функціонування широкосмугових, а тим більше надширокосмугових сканованих антенних решіток через свою відносно вузьку смугу пропускання, значну інерційність, дисперсійність, високих частотно-залежних втрат та незадовільної стабільності, а також проблеми з внутрішньою електромагнітною сумісністю та стійкістю до електромагнітних імпульсів. Перетворення прийнятих аналогових сигналів у цифрову форму для подальшої обробки, рівно як і прямі і зворотні перетворення Фур'є, вимагають при розширенні робочої смуги спектра сигналів все більших часових енергетичних та апаратурних затрат. Обчислюваними і керуючими центрами РЛС з ФАР (АФАР), побудованими на основі комплексного застосування аналогової фотоніки, являються аналогові оптичні процесори, які завдяки бешерній інерційності фотонів і паралельному перетворенню сигналів, замість послідовних обрахунків, при вирішенні задач обробки складних сигналів, розпізнавання об'єктів і радіобачення, а також керування антенною решіткою, можуть мати на декілька порядків більшу швидкодію порівняно з

					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		23

найбільш потужними цифровими комп'ютерами. Комплексне застосування аналогової фотоніки у апаратурі СШП АФАР СКІ одночасно можуть дати наступні можливості :

1. Радіобачення у реальному часі, точніше, на практиці розпізнавання і спостереження при будь-якій погоді об'єктів у реальному відрізку часу на значних відстанях, завдяки використанню широкосмугових сигналів і обробці великого об'єму інформації про цілі.

2. Практично повну завадо захищеність, так як дозволяє майже миттєво придушувати будь яку заваду на декілька порядків завдяки режиму багато частотній широкосмуговій адаптації у реальному часі .

3. Якісне (до порядку і більше) покращення точності і роздільної здатністю визначення координат і швидкості об'єктів, як наслідок роботи АФАР з СШП СКІ.

4. Значне розширення можливостей радіолокації перш за все, надійне виявлення об'єктів з радіо-поглинаючим покриттям (технологія «стелс») малогабаритними БПЛА, боеголовкам ракет і снарядів, радіолокаційне бачення підземних та інших прихованих об'єктів за рахунок над широкої миттєвої робочої смуги частот, багатократно перекриваюча поглинаючу смугу частот радіопоглинаючих покриттів, застосованих в технології «стелс»

5. Одночасне супроводження великої кількості цілей (до тисячі і більше) за рахунок синтезу багатопелюсткової ДН у реальному відрізку часу, високої швидкості сканування і обробки інформації

6. Нові принципи побудови РЛС, які дозволяють розширити області і якісно змінювати методи і способи застосування радіолокації (наприклад, метод багаточастотної СШП адаптації у реальному масштабі часу «BEAM-TAR», радіо-оптичні антенні фазовані решітки РОФАР і т.д.)

7. Зниження маси і габаритів у сотні разів за рахунок якісно зменшення металоємності і мікромініатюризації основних пристроїв, як наслідок переведення процесу обробки і розподілення сигналу у оптичний діапазон хвиль.

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24

8. Зменшення вартості у десятки разів, завдяки тому, що основним матеріалом для апаратури таких АФАР, замість традиційних кольорових і дорогоцінних металів служить кварц.

9. Якісне (у сотні раз) підвищення стійкості до електромагнітних імпульсів (ЕМП) і грозових розрядів за рахунок зменшення до повного виключення металів з конструкції самих апаратури, застосування фотонної апаратури і багатократного зменшення довжини електричних провідників, до повного їх виключення у колах електроживлення.

10. Забезпечення високого ступеня скритності роботи, завдяки реалізації роботи в надширокій смузі (малої спектральної щільності випромінюваних сигналів) і практично повній відсутності радіовипромінювань у режимі очікування.

Для вирішення проблеми створення ефективних надширокосмугових антенних решіток, як для стаціонарних та і для динамічних та бортових АФАР застосування аналогової фотоніки стає безальтернативним. Варто також відмітити, що використання розробок по аналоговій фотоніці і в інших областях техніки, до прикладу у високошвидкісному і мобільному зв'язку можуть привести до революційному результату і дати великий економічний ефект. Вищезгадані області застосування радіофотоніки – лише частина із багатьох, кількість яких стрімко зростає, охоплюючи військові, промислові та комерційні сектори.[4]

У даній роботі ж буде розглянуто переваги використання радіофотоніки для побудови фазованих антенних решіток. В тому числі модуляції оптичного сигналу радіосигналом і детектування, передача оптичного сигналу по оптоволокну, формування ДН антенної решітки з допомогою часової затримки.

2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Оптична лінія

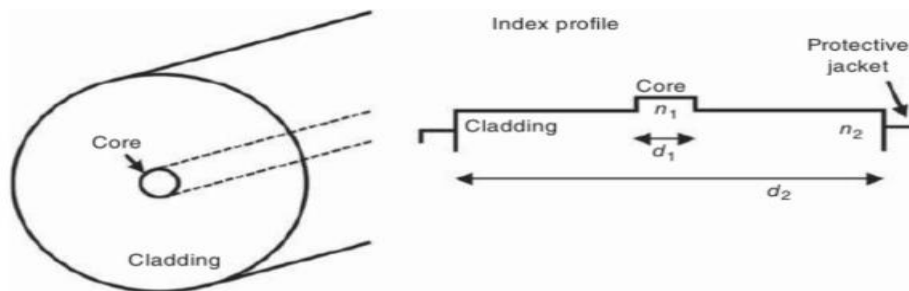
Основні складові АВОЛЗ – модульоване радіочастотним сигналом джерело оптичного випромінювання, середовище направлено поширення оптичного сигналу (оптичне волокно або оптичний хвилевід) і фотоприймач для зворотного перетворення оптичного модульованого сигналу у електричний.

Якісний рівень АВОЛЗ характеризується сукупністю більш ніж десяти основними параметрами. Вимоги до АВОЛЗ, які застосовуються у антенно-фідерних системах (АФС) апаратури сучасних антенних решіток наступні:

- Високий коефіцієнт передачі РЧ сигналу
- Широкий динамічний діапазон
- Використання не тільки у якості ліній передачі малопотужних сигналів але і для високих рівнів потужності
- Високий рівень фазової стабільності
- Багатоканальність при строгій ідентичності параметрів
- Відносно короткі дистанції
- Високий КПД
- Паралельна аналогова-оптична обробка складних сигналів, спектральний аналіз
- Змінна частота, тривалість і форма сигналів

					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		26

Отже як було відмічено у попередньому розділі, мікрохвильова фотоні-



ка розвивалась у більшій своїй частині завдяки зростанню потреби у якості і швидкості сигналів. Але до розвитку галузі нанофотоніки було необхідно декілька важливих технічних проривів, в числі яких і було виготовлення оптичних ліній з малими втратами. Нижче на Рис.7 зображено схематично вигляд такої лінії.

Рис.7 Оптична лінія

Серцевина виготовлена зі скла або ж пластику з коефіцієнтом заломлення n_1 та діаметром d_1 оточена оболонкою з нижчими показниками заломлення n_2 і діаметром d_2 . Електричні поля хвиль, що поширюються у серцевині експоненціально затухають у області оболонки. За часту використовували діаметр оболонки від 8 до 50 мкм, а серцевини від 60 до 125 мкм. Діаметр серцевини і різниця у індексах заломлення серцевини і оболонки визначають кількість мод конкретної довжини хвилі. Нормалізована частота має наступний вигляд:

$$V = \frac{\pi d_1}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (8)$$

Якщо $V < 2.405$ тоді лінія працюватиме у одно хвильовому режимі, якщо ж $V > 2.405$ кількість мод можна оцінити як $V^2/2$ Рис.8.

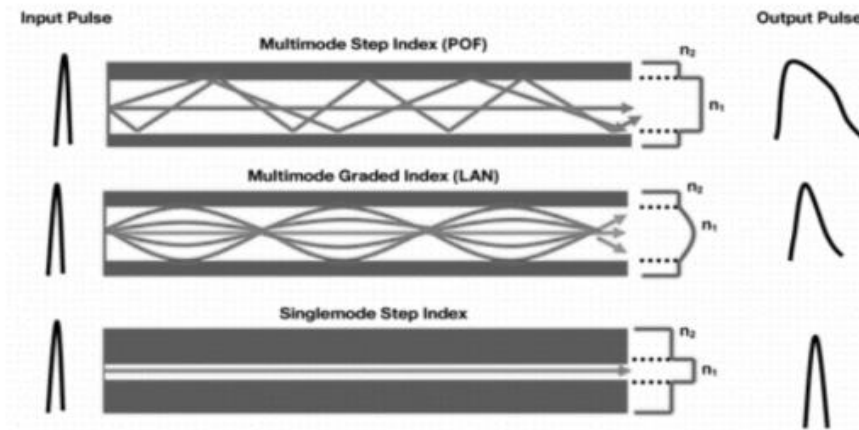
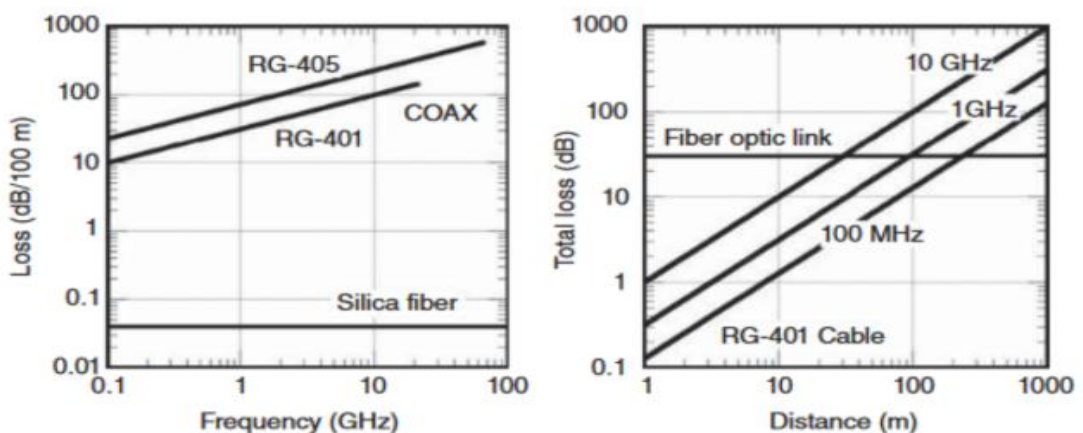


Рис.8 Багато хвильова і однохвильова оптичні лінії

Типовий одномодовий оптичний кабель на робочій довжині хвилі 1550 нм має серцевину діаметром 10мкм, з різницею індексів заломлення меншою ніж 0.006. У радіофотонних лініях частіше використовують одномодові волокна, так як вони майже виключають завмирання потужності, які часто спостерігаються у багатомодових оптичних лініях через модальну дисперсію.

Низькі втрати у оптичних лініях – це вагома їх перевага за умови, що Е/О і О/Е перетворення можуть бути реалізовані на потрібному діапазоні частот.

На Рис.9 приведено порівняння залежності втрат радіосигналу від частоти при поширенні у 2 коаксіальних кабелях RG-401 і RG-405 в порівнянні з



оптичною лінією.

Рис. 9

а)

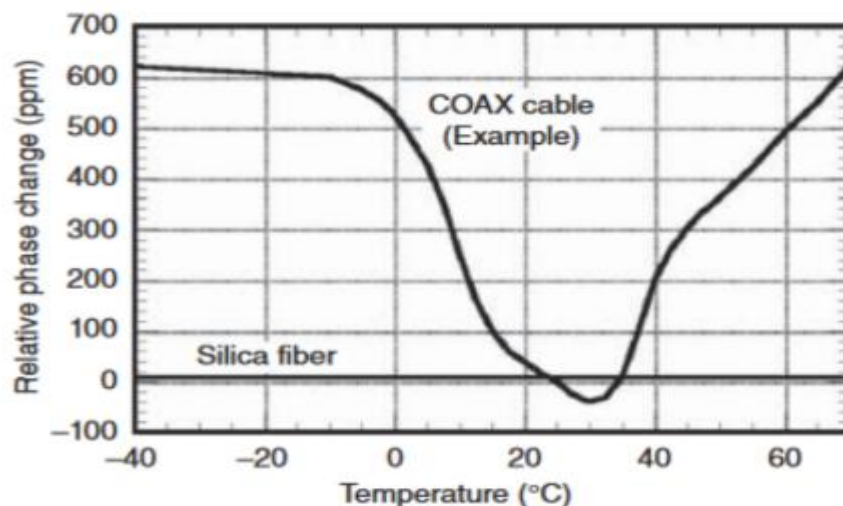
б)

а) Втрати у коаксіальних кабелях RG-401 і RG-405 та оптичному кабелі як функція частоти

б) Втрати RG-401 на 3-х частотах і втрати у оптичному кабелі з урахуванням 30дБ фіксованих втрат на Е/О і О/Е перетвореннях.

Як ми бачимо з рис.9а втрати у коаксіальних кабелях не тільки у рази більші аніж в оптиці але і мають деяку частотну залежність. Ця особливість оптичних ліній і є однією із головних переваг фотоніки. Але з врахуванням втрат у перетворювачах Е/О та О/Е, різниця може бути не так яскраво виражена як на Рис.9а. Повні втрати у оптоволоконній лінії зв'язку з врахуванням фіксованих втрат у перетворювачах і при розповсюдженні у RG-401 на трьох різних частотах показано на Рис.11б як функції довжини лінії.

Зрозуміло, якщо брати до уваги лише втрати то оптичні лінії використовувались би тільки для ліній передач великої протяжності. Але варто враховувати і інші фактори які дають переваги для волоконної оптики навіть для коротких з'єднань, такі як: шумові характеристики, фазова стабільність, розмір, стійкість до електромагнітних завад в основному ЕМІ. На Рис.10 показана зміна після проходження сигналу по оптичному волокну і по коаксі-



льному кабелю в залежності від температури.

Рис.10 Нестабільність фази в залежності від зміни температури

Як видно із рисунку різниця помітна. Така різниця у зв'язку з тим, що коаксіальні лінії зв'язку складаються з декількох матеріалів – метали, діелектрики які мають свої власні коефіцієнти теплового розширення. І це призводить до того, що групова швидкість розповсюдження хвиль коаксіального кабелю може бути складеною функцією температури. У той же час оптичне волокно майже завжди виготовляється з оксиду кремнію, у якому зміни в затримках розповсюдження при умові відсутності механічного кріплення до матеріалів з високими температурними коефіцієнтами порядку 8×10^{-6} на одиницю довжини на градус температури. Ця властивість буде дуже цінною і корисною у системах де фазова стійкість і прогнозованість фази у лінії є одним з головних вимог. Коаксіальні фазо стабільні кабелі, які через старіння діелектрика

ізоляції, не забезпечують стабільної фази протягом багатолітньої експлуатації. Тому оптичні кабелі де середовище для розповсюдження сигналу є довговічний кварц можуть вирішити проблему довготривалої фазової стабільності. наприклад, мінімальне напрацювання вітчизняних оптичних кабелів складає 215 000 годин, коли у напівжорсткого коаксіального фазо стабільного кабелю РК-50-2-25-с ресурс складає 15 000 годин, що є до 15 разів менше.

Як показали теоретичні та експериментальні досліді, сумарна фазова помилка (нестабільність) на виході каналу аналогової ВОЛЗ складається з наступних основних складових:

$$\Delta\varphi_i = \sqrt{(\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_2^2 + \Delta\varphi_3^2 + \Delta\varphi_4^2 + \Delta\varphi_5^2 + \Delta\varphi_6^2 + \Delta\varphi_7^2)} \quad (9)$$

Де $\Delta\varphi_1^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок зміни температури оптичного волокна,

$\Delta\varphi_2^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок зміни механічного аксіального навантаження оптичного волокна,

$\Delta\varphi_3^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок зміни температури лазера,

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		30

$\Delta\varphi_4^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок зміни λ лазера,

$\Delta\varphi_5^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок поляризаційної чутливості одномодового ОВ,

$\Delta\varphi_6^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок фазових нестабільностей електронних компонент,

$\Delta\varphi_7^2$ - середньоквадратичне значення нестабільності за рахунок фазових флуктуацій (шуму) на виході ВОЛЗ.

Інші важливі переваги оптоволоконних лінії відносно коаксіальних ліній зв'язку:

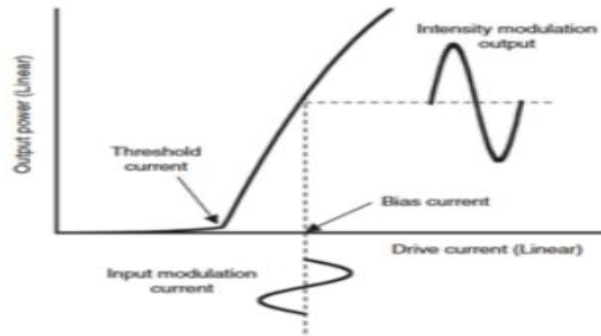
- Ширина смуги частот аж до сотень ГГц
- Невеликі розміри і мала вага ВОЛЗ
- Електрична ізоляція між передавачем і приймачем сигналу за рахунок неметаловмісних матеріалів кабелю
- Висока гнучкість, та неперемінливість до середовищ роботи аж до можливості роботи у рідкому азоті

2.2 Оптичне джерело сигналу

Наявність джерела несучого оптичного сигналу має вирішальне значення для нанофотоніки. Джерело оптичного монохроматичного когерентного випромінювання яке використовується для радіофотоніки – лазер (light amplification by stimulated emission of radiation). Існує безліч типів лазерів, які можуть бути прикладені у використанні для радіофотоніки.

Під час становлення ВОЛЗ функцію перетворення електричних сигналів у оптичні виконував діодний лазер. На Рис.11 показано його передаточна функція. Після певного порогового значення зміщення вихідна потужність лазера квазілінійно зростає разом із модулюючим струмом інжекції. При цифровій же модуляції лазер переходить з практично відсутньою потужності виходу для цифрового нуля і деяким високим значенням

					РС61.464412.001 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		31



вихідної потужності для цифрової одиниці.

Рис.11 Передавальна характеристика діодного лазера з прямою модуляцією

Але однією з проблем діодних лазерів є лінійність, так як по мірі збільшення струму збудження багато діодних лазерів видають нижчу квантову ефективність, при якій інкрементна зміна струму при високому струмові збудження дає малу зміну потужності відносно малого струму збудження, проявляється у вигляді невеликої кривизни ВАХ, що видно на Рис.11.

Ще одна важлива характеристика для діодних лазерів з прямою модуляцією є максимальна швидкість зміни модулюючого струму і відповідна ширина смуги модуляції зв'язана з частотою релаксаційних коливань резонатора лазера (11).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A\rho_0}{\tau_p}} \quad (10)$$

Де A – коефіцієнт підсилення, ρ_0 - щільність фотонів, τ_p – час життя фотонів

Недоліком лазерних діодів з прямою модуляцією є зв'язок власних шумових властивостей з шумами джерела сигналу. Виходячи з цього варто відмітити, що максимальна амплітуда релаксаційних коливань лазерного резонатора повинна бути рівною або ж вищою за максимальну амплітуду робочої частоти сигналу. Шуми модулюючого сигналу які нижче за цю частоту, проявляються у вигляді шуму інтенсивності (RIN) лазера [5]. Таким чином, існує зв'язок між робочою смугою пропускання ВОЛЗ з прямою модуляцією і лазерним шумом. В той же час зовнішня модуляція дає можливість розділи-

ти ці два фактори.					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		32

Напівпровідникові лазери мають безліч матеріалів, таких як GaN, GaAs, InAlAs, InGaAsP і широко використовувались у ранніх аналогових фотонних трактах прямої модуляції, в подальшому як джерела неперервних хвиль, а на даному етапі є основними джерелами оптичної несучої в оптичних лініях зв'язку. Напівпровідникові лазери використовуються у широкому діапазоні хвиль від 0.4 до 1.6 мкм накачуються тільки постійним струмом.

При зовнішній модуляції безперебійне джерело випромінювання лазера модулюється за допомогою окремого пристрою. Цей пристрій являє собою модулятор по певній характеристиці (фаза, поляризація, інтенсивність). Найбільшим попитом користується модулятор який використовує електрооптичний ефект. Електрооптичний ефект – зміна показника заломлення матеріалу за рахунок зміни прикладеного до нього електричного поля, часто цей ефект спостерігається у кристалах певних матеріалів.

Альтернативою для напівпровідникового лазера став твердотільний лазер на основі активних іонів у середовищі з речовиною, яка знаходиться у твердому кристалічному стані. Твердотільні лазери мають значно більш повільну динаміку підсилення, аніж напівпровідникові лазери, що веде до меншої відносної інтенсивності шуму. Це дозволяє використовувати більш вузьку ширину ліній. Вузька ширина оптичної лінії лазера приводить до більш низького рівня фазового шуму, що доволі важливо при когерентній або ж кутовій модуляції.

Вимоги до лазера не залежно від типу лазерного джерела ставлять одну – це поєднувати високий рівень оптичної потужності з низьким рівнем шуму і флуктуацій інтенсивності випромінювань (так як від цього напряму залежить якість детектування сигналу фотоприймачем). Таким чином RIN лазера являється головною проблемою джерел оптичного сигналу для радіофотонних ліній. Інтенсивність шумів оптичного сигналу детектованого фотоприймачем, в результаті призводять до шумів у радіосигналі, тому флуктуації інтенсивності лазера мають першочергове значення для радіофотоніки. З ростом максимальної допустимої потужності фотодіодів, росте і попит на ніж-

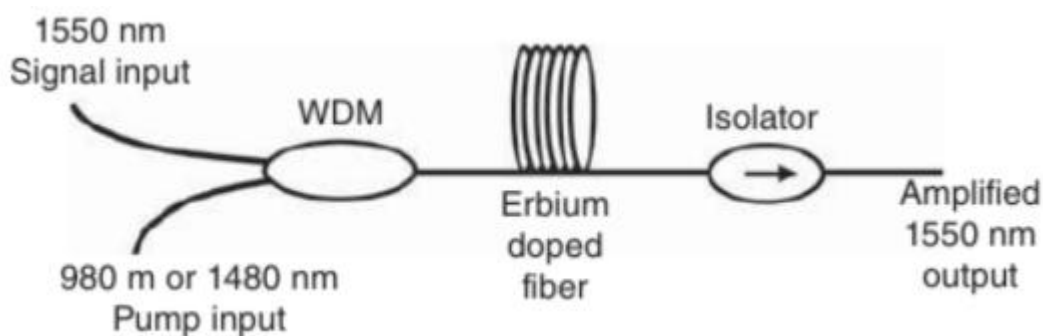
									Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	PC61.464412.001 ПЗ				33

чий рівень шуму джерел лазерного випромінювання. Отже тоді зрозуміло, що при використанні лазера як оптичного джерела сигналу у радіофотоніці необхідно детально описувати лазерний шум для кожної окремої архітектури.

2.3 Оптичні підсилювачі

Оптичні підсилювачі використовуються у мікрохвильових оптичних трактах як у коротких так і довгих для підтримки потужності оптичного сигналу, компенсації втрат при поширенні у лінії. Розташовуватись оптичний підсилювач може безпосередньо перед фотодетектором для підвищення вихідного рівня сигналу та оптимізації динамічного діапазону. Не залежно від застосування, оптичний підсилювач завжди вносить певний шум у сигнал.

Найбільш поширеними оптичними підсилювачами є волокно-оптичні підсилювачі на оптичному волокні, легованому іонами ербію Er^{3+} (EDFA). EDFA швидко лягли у основу сучасних телекомунікаційних систем через практично точну відповідність робочого діапазону ербієвих підсилювачів області мінімальних втрат оптичних ліній на основі кварцового скла, відносно низького рівня шуму і простоти під'єднання у волоконно-оптичну систему. Але однією з проблем EDFA на основі кремнію – достатньо сильна залеж-



ність коефіцієнта підсилення від довжини хвилі. Схема EDFA приведене на Рис. 12

Рис.12 Схема EDFA

Сигнал з довжиною хвилі 1.55мкм подається разом з променем накачування в ербієвий легований шар (EDF) використовуючи мультиплексор з розділенням по ширині хвилі (WDM). Вхідний оптичний сигнал накачування стимулює випромінювання, що призводить до когерентного підсилення сигналу.

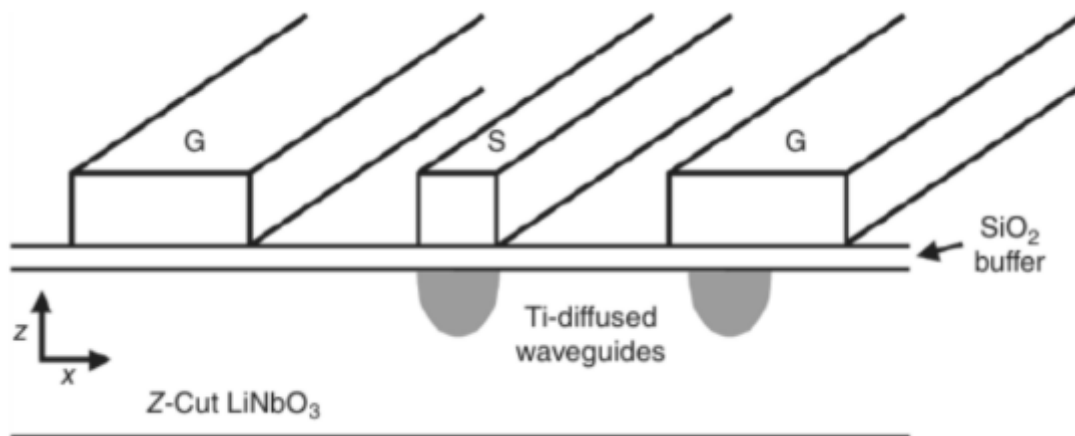
Напівпровідникові оптичні підсилювачі (SOA), на відміну від підсилювачів розглянутих вище використовують у якості активного середовища підсилення напівпровідникові матеріали. Аналогічно напівпровідниковим лазерам, такі матеріали можуть використовуватись для досягнення оптичного підсилення в області 1500 нм хвиль.

Існує 2 типи SOA: підсилювач Фабрі-Перо і підсилювач біжучої хвилі. У підсилювачі на схемі Фабрі-Перо використовуються напівпрозорі резонансні оптичні конструкції стоячої хвилі, як правило чутливі до температури та інших умов навколишньої середовища.

Незалежно від дизайну, існує ряд проблем застосування SOA у мікрохвильовій фотоніці. SOA працює у широкому діапазоні хвиль, охоплює від 0.4 мкм до 1.6 мкм, має низьке енергоспоживання невеликі розміри, але демонструє більш низький коефіцієнт підсилення і більш високий рівень шуму порівняно з EDFA. Також підсилювачі SOA мають поляризаційно-залежне підсилення. Найбільшим недоліком SOA у мікрохвильовій фотоніці є спотворення аналогових сигналів. Але через високий потенціал застосування у інтегральній фотоніці, галузь напівпровідникових оптичних підсилювачів продовжує розвиватись.

Застосування нанотехнологій дозволило значно покращити основні характеристики одномодових напівпровідникових оптичних підсилювачів (SOA), в тому числі їх потужність і КПД. В наслідок чого з'явився одномодовий кванторозмірний SOA з узгодженим з оптоволоконним хвилеводом типу SCOWA Рис.13 який має вихідну потужність порядку 1 Вт на $\lambda = 1.55$ мкм Рис.14 .

розповсюджених електрооптичних матеріалів, використовується у волоконно-оптичних трактах, являється ніобат літію (LiNbO_3) також використовують і інші органічні полімери.



На Рис. 15 зображено поперечний переріз LiNbO_3 – модулятора.

Рис.15 LiNbO_3 електрооптичний модулятор

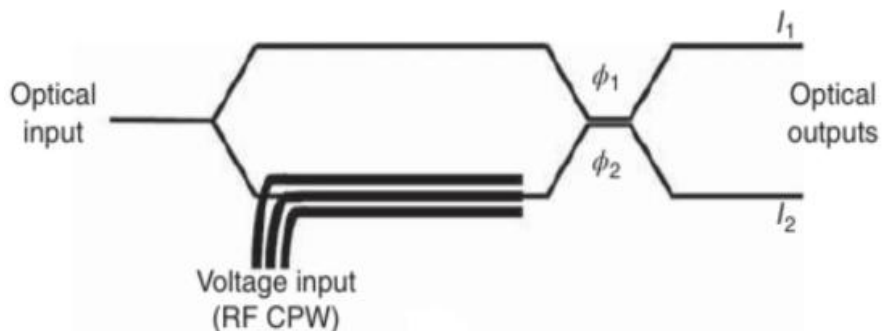
Підкладка LiNbO_3 орієнтована по z-зрізу, вісь z кристалу суміщена з лініями вхідного електрооптичного поля оптичної хвилі. LiNbO_3 має сильний електрооптичний коефіцієнт вздовж осі z і трішки більш слабший коефіцієнт вздовж осі x, в залежності від орієнтації системи координат. Титан легований в підкладку LiNbO_3 для створення оптичних хвилеводів. Після утворення буферного шару SiO_2 , металевими електродами формується НВЧ хвилевід. На Рис. 15 зображена схема компланарного хвилеводу (CWP) зі структурою земля-сигнал-земля (GSG), де один з двох оптичних хвилеводів розташовується нижче сигнального електроду, а інший нижче земляного електроду, що дозволяє для НВЧ потужності що прикладається взаємодіяти з оптичним сигналом. Прикладений НВЧ сигнал змінює показник заломлення оптичного хвилеводу і відповідно фазу оптичного сигналу яка розповсюджується по хвилеводу.

Також у багатьох оптичних лініях застосовують модуляцію інтенсивності (IMDD), для побудови простої схеми демодуляції фотодетектором. Для перетворення оптичної фазової модуляції у модуляцію інтенсивності використовують оптичний інтерферометр. Найбільш розповсюджена архітектура

Рис.15 LiNbO_3 електрооптичний модулятор					Лист
PC61.464412.001 ПЗ					37
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	

інтерферометра – модулятор Маха-Цендера (MZM). На Рис.16 зображена базова структура MZM.

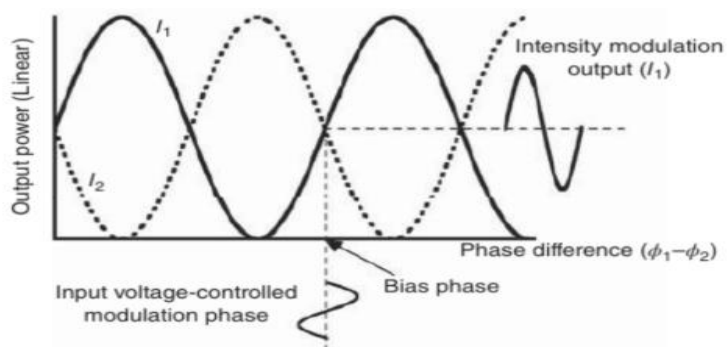
Рис.16 Базова структура MZM



Оптичний сигнал на вході потрапляє на оптичний подільник, розділяє між двома хвилеводами, щоб після інтерферувати у оптичному змішувачі. В залежності від різниці фаз між оптичними сигналами і плечах подільника ($\phi_1 - \phi_2$), оптичні сигнали у змішувачі конструктивно або деструктивно інтерферують. Лінії змішувача виготовлені з електрооптичного матеріалу, наприклад з LiNbO_3 , також використовують арсенід галію (GaAs) і кремній (Si). Прикладене до одного або до обох плечей змішувача напруга модулюючого високочастотного радіосигналу визиває зміну індексу рефракції оптичної лінії, що в

свою чергу викликає зміну фази модулюючого оптичного сигналу.

На Рис.17 показано інтенсивність оптичного сигналу на виходах в залежності від різниці фаз ($\phi_1 - \phi_2$). Видно що модулятор інтенсивності при



зміні фази оптичного сигналу у одно із плечей хвилеводу.

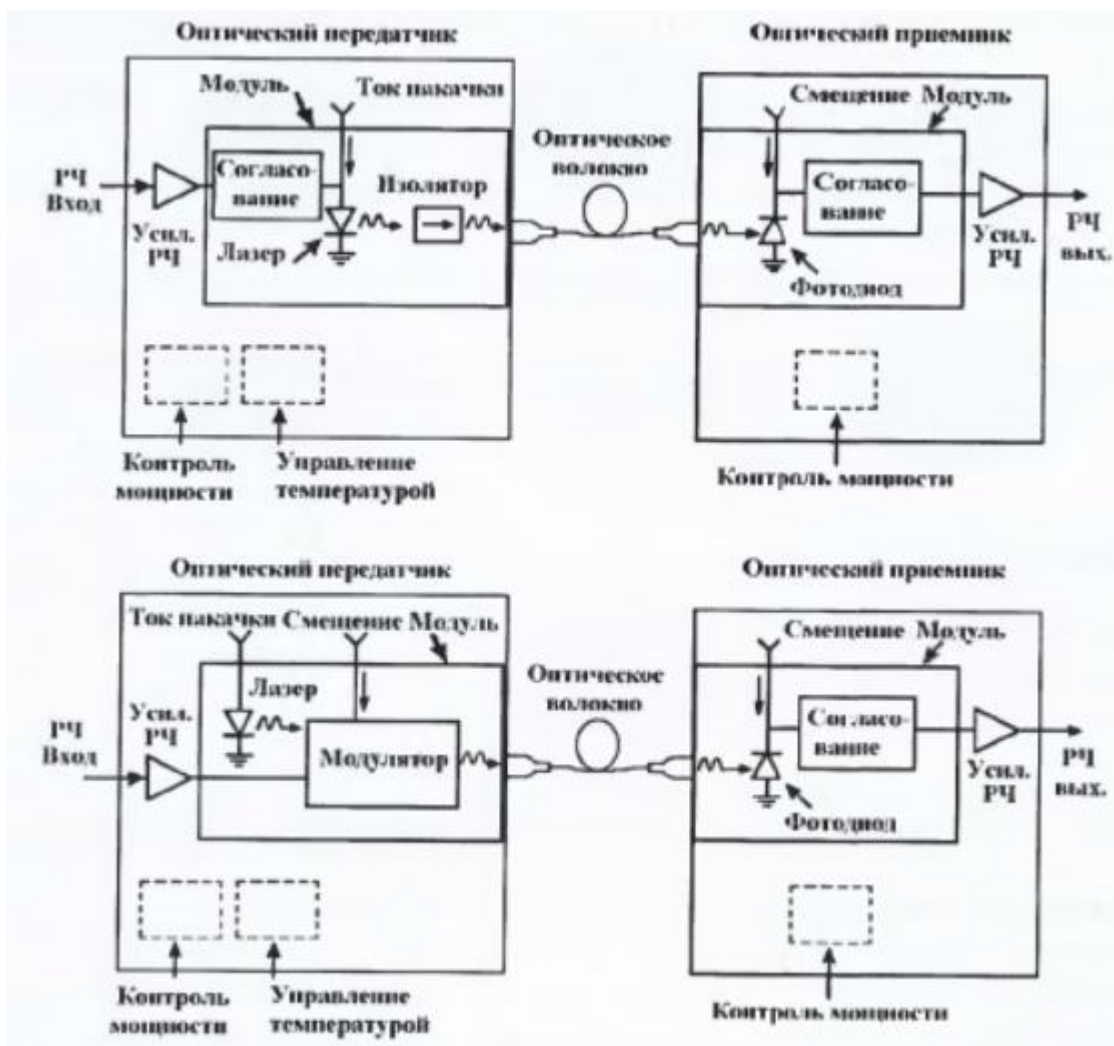
інтенсивністю у вигляді вихідного струму. Вихідна реакція такого фотодетектору з точки зору чутливості визначається у одиницях А/Вт, тобто скільки ампер струму видає фотодіод у внутрішнє коло навантаження на кожен ватт падаючої потужності світлового потоку. Р-і-n фотодіод має дуже просту еквівалентну схему (рис. 21). Фотодіод можна розглядати як джерело струму паралельно з ємністю р-n переходу (C_j) і шунтуючих опором (R_{sh}), підключеним до навантаження (R_l) через послідовний опір (R_s). Ємність переходу визначається властивостями напівпровідникових матеріалів і шириною і-області. R_s пов'язано з контактним опором і опором напівпровідників р- і n-типу. Шунтуючі опір R_{sh} виникає через витік струму і зазвичай становить близько 1 кОм. Через високий опору R_{sh} використовується зовнішній узгоджений опір, який зменшує фотогенерований вихідний струм каналу [6].

Швидкість реакції фотодетектора обмежена часом проходження, яке є часом подолання вільними зарядами ширини внутрішнього шару. Це функція напруги зворотного зміщення і фізичної ширини. Для швидких р-і-n-діодів вона коливається від 1,5 до 10 нс. Ємність також впливає на швидкість реакції пристрою, причому ємність переходу утворює ізолюючим внутрішнім шаром між електродами, освіченими р- і n-областями. У високошвидкісних фотодіодів час відповіді може досягати 10 піко секунд при ємності в кілька піко фарад з дуже маленькими площами поверхонь [68].

2.6 Структура і основні характеристики АВОЛЗ

					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		40

На Рис.19 представлені спрощені схеми структурні схема малопотуж-



них АВОЛЗ з прямою і зовнішньою модуляцією.

Рис.19 Схеми АВОЛЗ з прямою (зверху) і зовнішньою (зверху) модуляцією
Як видно із рисунку вони складаються з 3 основних елементів:

- Оптичного передавача
- Оптичного волокна та (або) оптичних хвилеводів
- Оптичного приймача

Як відомо, фазова стабільність є специфічною та основоположною вимогою для усіх систем ФАР (АФАР). Особливо жорсткі вимоги до стабільності пред'являють до систем контролю і сканування ДН антенних решіток, розводки гетеродинного і опорного сигналів і синхронізації.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

Застосування аналогових ВОЛС як складової частини аналогової фотоніки, через безсумнівні переваги оптичного волокна (малих коефіцієнтів фазової чутливості і втрат, надвисокої смуги частот, малої ваги, високої гнучкості, стійкості до ЕМІ, великого ресурсу) дає великі можливості для виведення характеристик стабільності радіолокаційної апаратури .

Необхідна амплітудна стабільність достатньо висока (порядку ± 0.5 дБ) досягається шляхом стабілізації вихідної потужності генераторів сигналу і лазерів на передавальному кінці і при необхідності системами АРУ у приймальних пристроях ВОЛЗ.

Основа сучасних ВОЛЗ – одномодове оптичне волокно, як відомо має ряд переваг, найважливішими є невеликі втрати і вага, а також практично нульова дисперсія для діапазону хвиль 1.31 мкм і 1.55 мкм, яка дає можливість передачі надкоротких імпульсів.

У РЛС метрового і дециметрового діапазону з ФАР для розводки радіочастотних сигналів зазвичай застосовуються напівтверді коаксіальні фазо стабільні кабелі, які через старіння діелектрика ізоляції, не забезпечують стабільної фази протягом багатолітньої експлуатації.

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		42

3 МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОФОТОННОГО ТРАКТУ

В данному розділі проводиться моделювання радіофотонного тракту антенної решітки.

ПО для моделювання радіофотонного тракту було обрано з наступних вимог: Можливість програмної реалізації, максимальна відповідність реальним параметрам, забезпечення оптимальну ефективність моделювання, всі ці вимоги задовольняє OptiSystem фірми Optiwave. Це програмне забезпечення дозволяє моделювати різного роду оптичні лінії зв'язку, знімати характеристики максимально близькі до реальних в залежності від безлічі параметрів.

OptiSystem дозволяє планувати, тестувати і моделювати оптичні лінії передачі сучасних оптичних мереж. Він має компоненти універсального DSP, Decision, QAM Sequence Generator і QAM Sequence Decoder. Також широкий шибір оптичних волокон таких як Erbium, легований MM Fiber, Ytterbium, легований MM Fiber, багатомодове волокно з вимірним індексом і багатомодовий волоконний підсилювач з параболічним індексом, і інші моделі волокна.

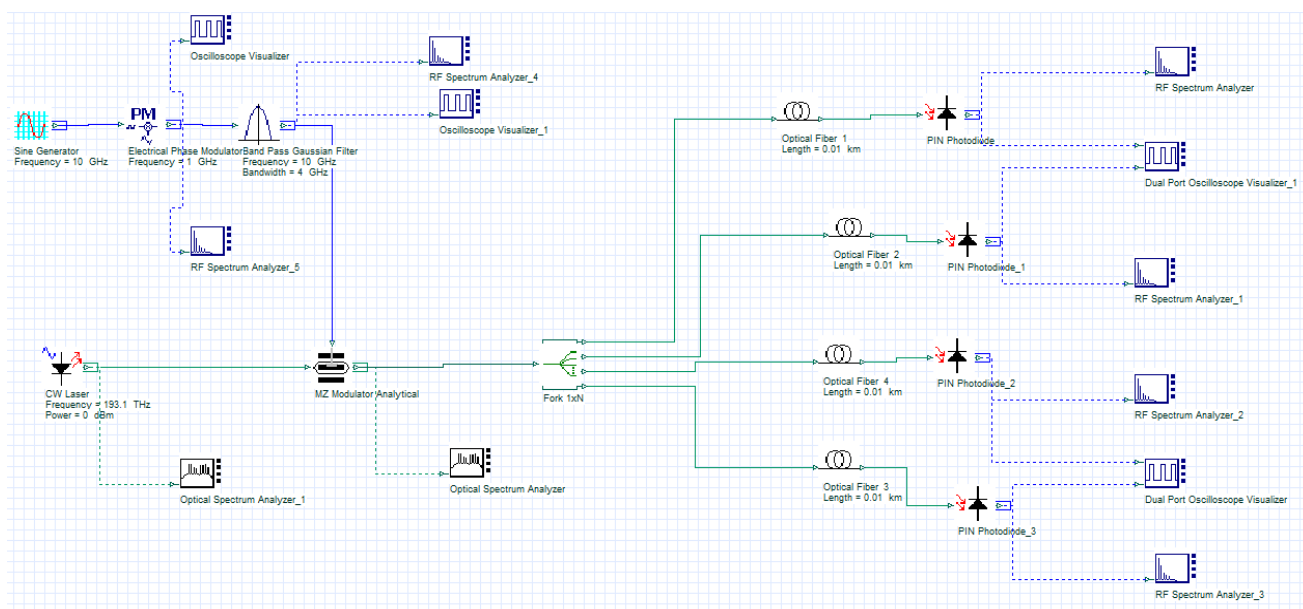
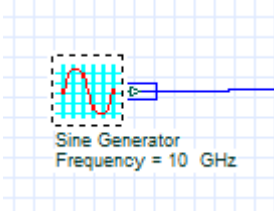
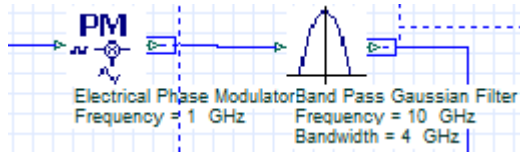
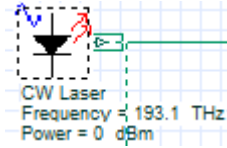
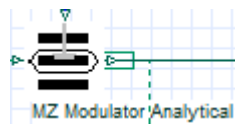
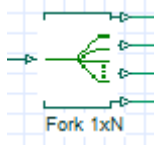
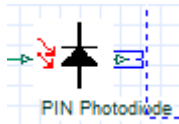


Рис. 20 Модель радіофотонного каналу у середовищі розробки OptiSystem

На рис.20 зображена модель радіофотонного каналу виконана за допомогою середовища розробки OptiSystem. Оптичний сигнал, який генерується за допомогою волоконного CW-laser. За допомогою MZ-модулятора він же модулятор Маха-Цендера модулюється РМ-сигналом і після проходження оптичної лінії переходить у радіочастотну область за допомогою *p-i-n* діоду

Складається система з таких компонент:

- 1)  - НВЧ генератор синусоїдального сигналу налаштованого на частоту 10ГГц
- 2)  - Блок фазової модуляції та смуговий фільтр
- 3)  - CW-laser
- 4)  - MZ-модулятор
- 5)  - розгалужувач на 4 канали
- 6)  - фотодетектор

3.1 Модулюючий сигнал

В якості модулюючого сигналу використовуємо НВЧ сигнал з АМ модуляцією та несучою частотою 10 ГГц отриманий за допомогою НВЧ генератора на Рис.21-22 осцилограма і спектр відповідно.

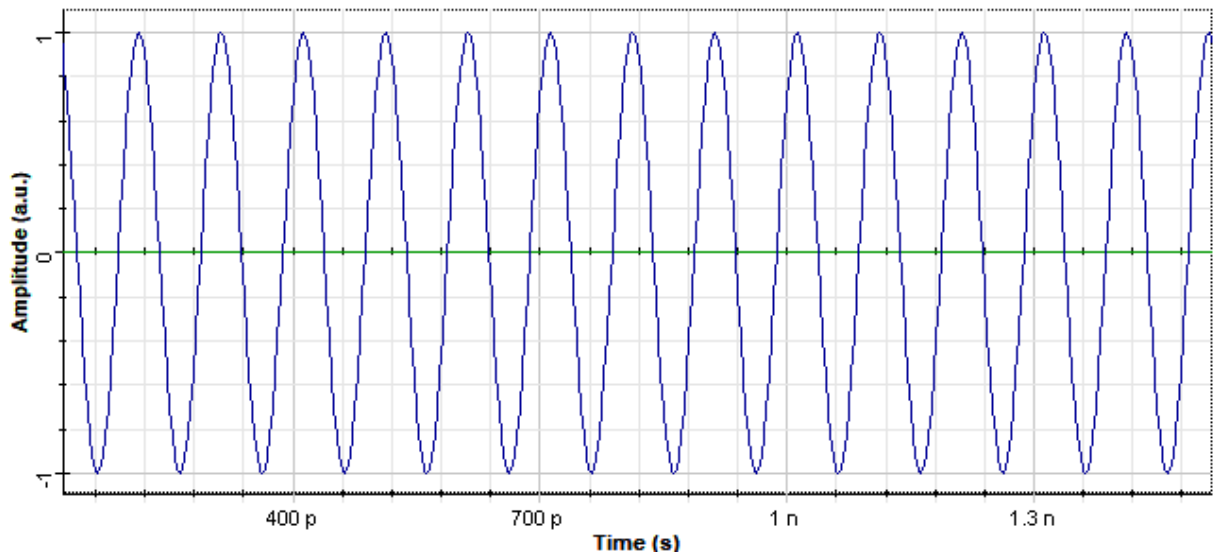


Рис.21 Осцилограма синусоїдального НВЧ сигналу з генератора

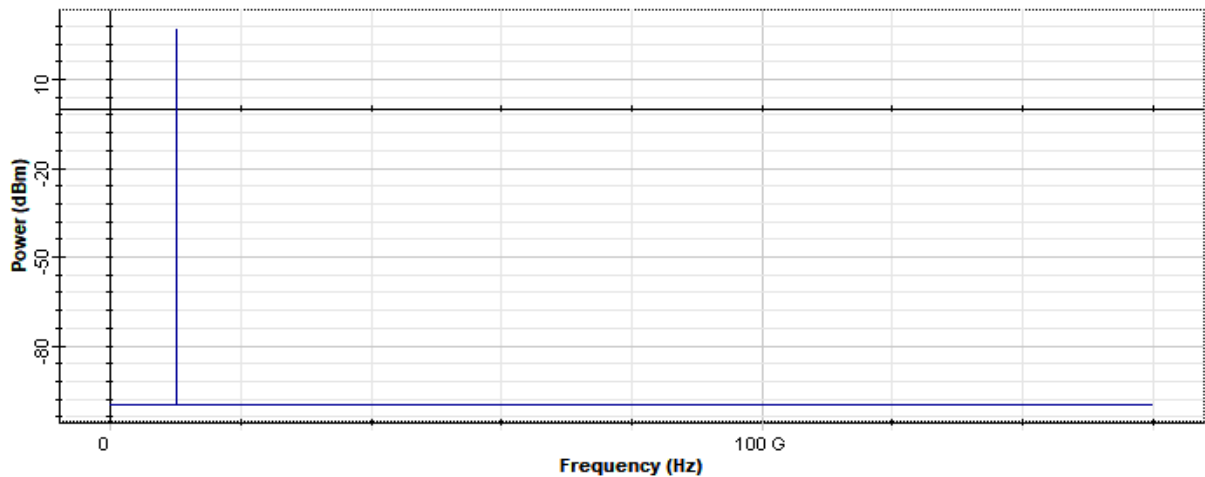


Рис.22 Спектр синусоїдального НВЧ сигналу з генератора

Далі сигнал проходить через фазовий модулятор з частотою модуляції 1 ГГц за допомогою ПО OptiSystem можна спостерігати спектр і осцилограму сигналу на Рис.23-24 відповідно.

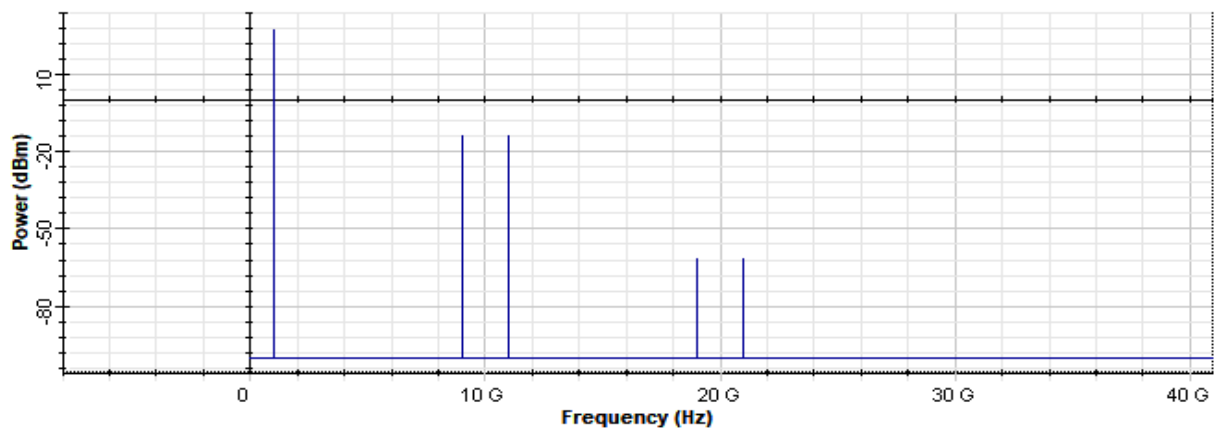


Рис.23 Спектр синусоїдального сигналу 10 ГГц після АМ 1 ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

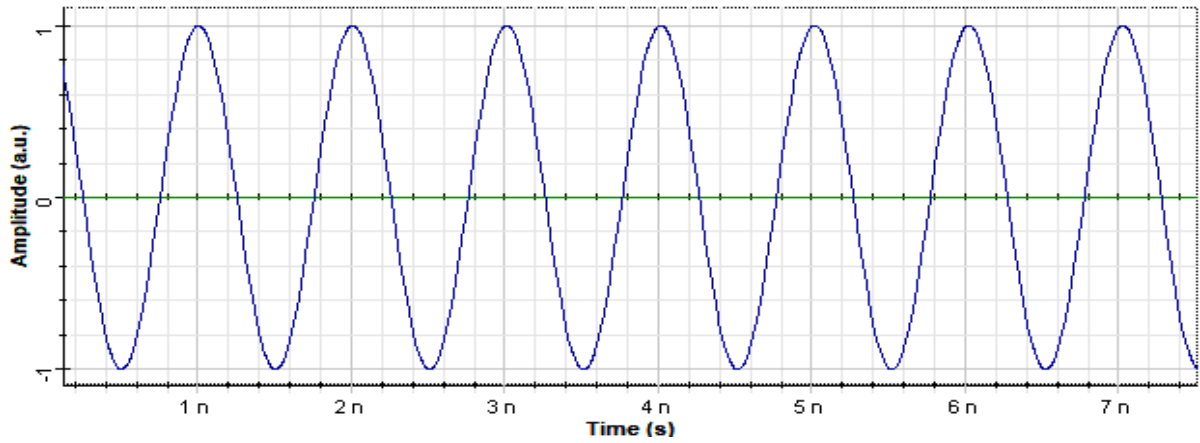


Рис.24 Осцилограма синусоїдального сигналу 1 ГГц

Після виходу з модулятора сигнал направляється у смуговий фільтр з шириною смуги пропускання 4 ГГц, осцилограма і спектр сигналу набувають вигляду Рис.25-26.

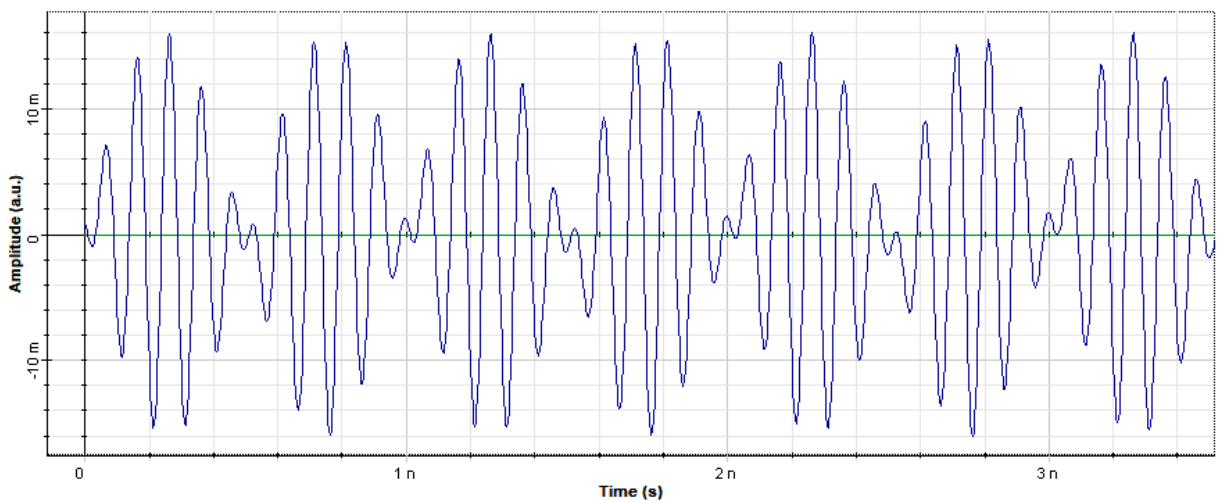


Рис. 26 Осцилограма синусоїдально ФМ-сигналу після проходження фільтру

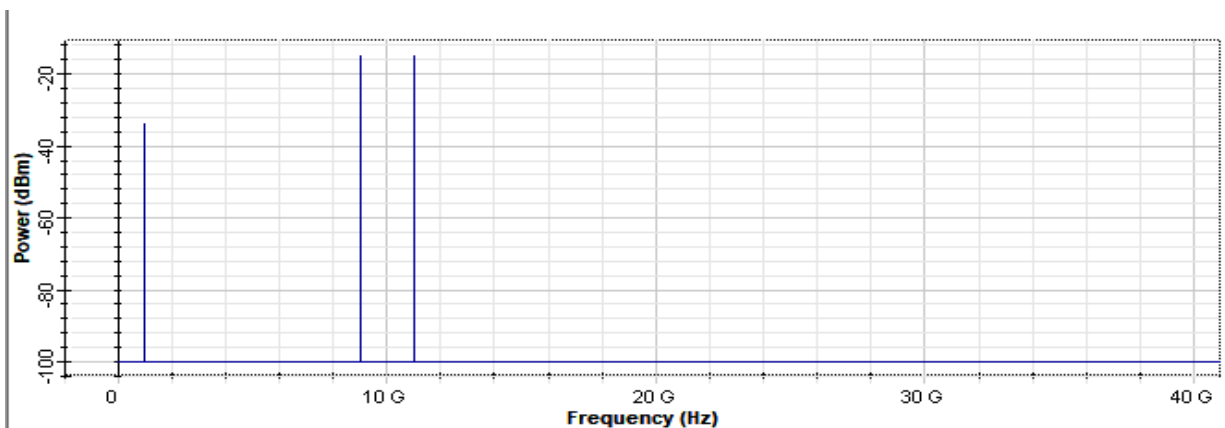


Рис.27 Спектр синусоїдального ФМ-сигналу після проходження фільтру

3.2 Несучий оптичний сигнал

У якості несучого оптичного сигналу використовується волоконний CW-laser який працює на частоті 193.1 ТГц довжина хвилі якого становить 1552.52 нм з потужністю на виході 0дБм. Його вихідний спектр зображено на

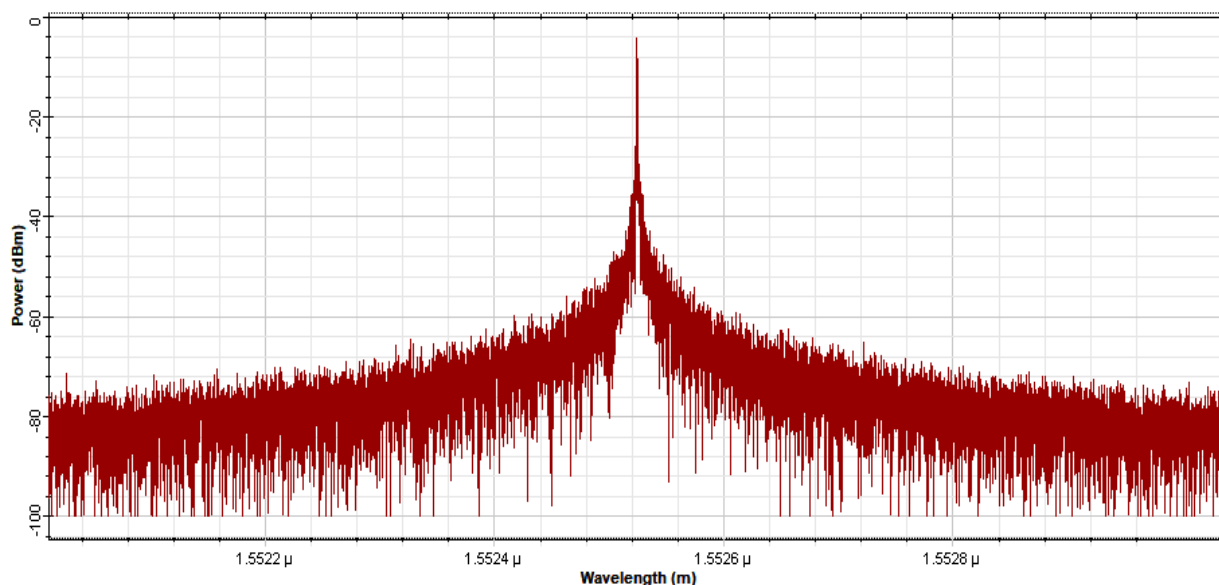


Рис.28

Рис.28 Вихідний спектр волоконного CW-лазеру

3.3 Модулятор Маха – Цендера (MZ-модулятор)

Електрооптичний модулятор на базі інтерферометра Маха-Цендера призначений для модуляції випромінювання потужного лазера. Вихідний монохроматичний світловий пучок попадає на подільник і ділиться на два однакових пучки. Ці пучки направляються у електрооптичні елементи з монокристалічного матеріалу і з лінійним електрооптичним ефектом у яких при подачі на електроди керуючої напруги відбувається зміна показника заломлення. Завдяки чому ці світлові пучки і набувають різницю фаз.[8]

У нашому ж макеті модель модулятора представляє собою модулятор інтенсивності, який працює на інтерферометричному принципі, складається з 2-х відгалужувачів з'єднаних між собою хвилеводами однакової довжини
Рис.29. Також важливий момент у електрооптичному ефекті в наслідок якого напруга модулюючого сигналу змінює показники заломлення у хвилеводах,

					PC61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		47

що призводить до інтерференції на виході, в залежності від прикладеної напруги, Модулюючи вихідну інтенсивність відповідно до інтенсивності сигналу.

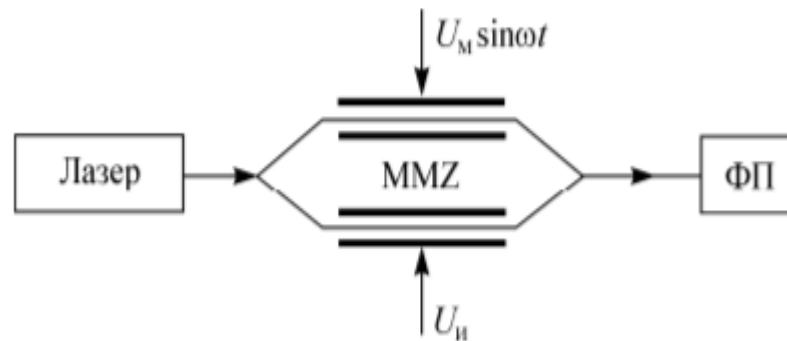


Рис.29 Модель MZ-модулятора

Наступні рівняння описують поведінку модулятора Маха-Цендера:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cos(\Delta\theta(t) \exp(j\Delta\varphi(t))) \quad (11)$$

$$\Delta\theta(t) = \frac{\pi}{2} (0.5 - ER(modulation(t) - 0.5)) \quad (12)$$

$$ER = 1 - \frac{4}{\pi} \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{extrat}}\right) \quad (13)$$

$\Delta\theta(t)$ - різниця фаз між 2 гілками модулятора, $\Delta\varphi(t)$ - зміна фази сигналу, *extrat*-відношення максимальної і мінімальної вихідної оптичної потужності, *modulation(t)*- вхідний електричний сигнал.

Було обрано наступний варіант модулятора PM-DV5-40 з характеристиками:

- Діапазон робочих оптичних хвиль 1550 нм
- Смуга частот 40 ГГц
- Втрати які вносяться в контур 4дБ
- Матеріал чіпа LiNbO3

Схема з одним MMZ має свої переваги. Не потрібно переводити робочу точку у квадратуру і компенсації її дрейфу. Вона простіша і повинна мати

більшу стабільність і надійність режиму роботи модулятора. Необхідно тільки компенсувати різниці оптичної довжини плеч модулятора.

Нижче на Рис.30 зображено кресленик MZ-модулятора PM-DV5-40

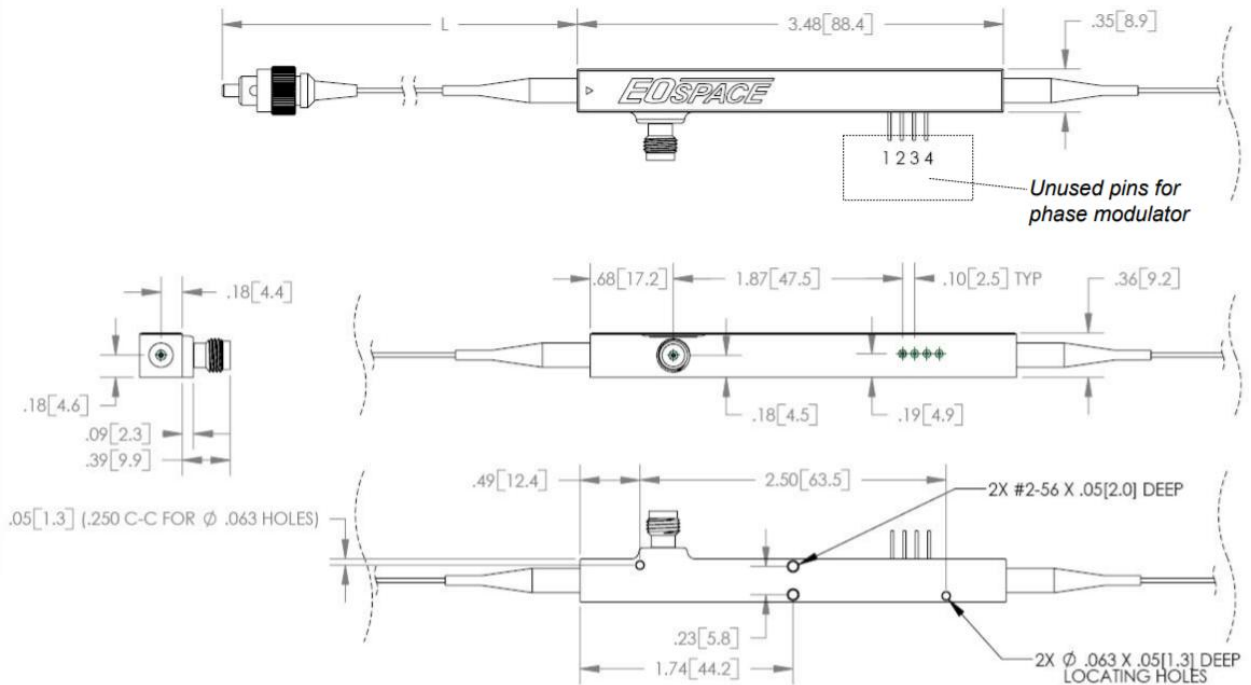


Рис.30 Кресленик MZM PM-DV5-40

У результаті роботи модулятора отримуємо промодульований оптичний сигнал спектр якого зображений на Рис.31.

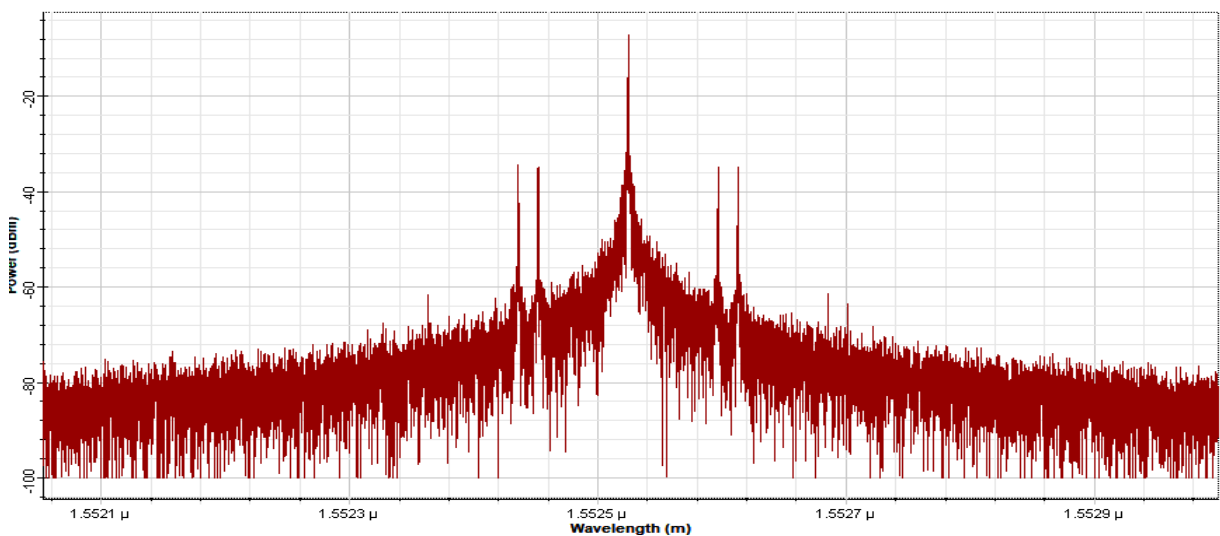


Рис.31 Оптичний спектр на виході MZ-модулятора

3.4 Фотодетектор

Для перетворення оптичного сигналу у електричний струм було обрано *p-i-n* фотодіод на арсеніді галію (InGaAs) виходячи з параметрів чутливості. Модель такого фотодетектора наведено на Рис.32

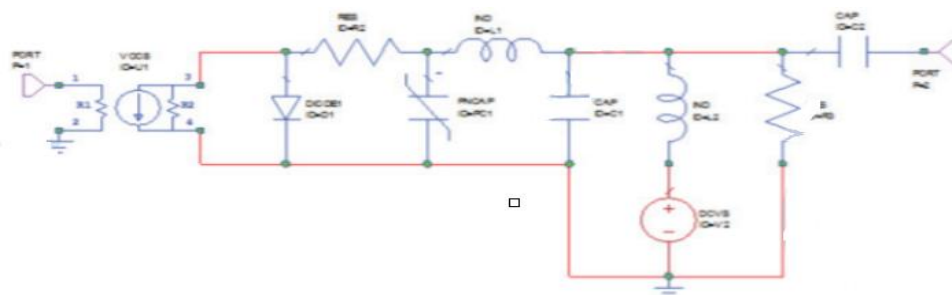
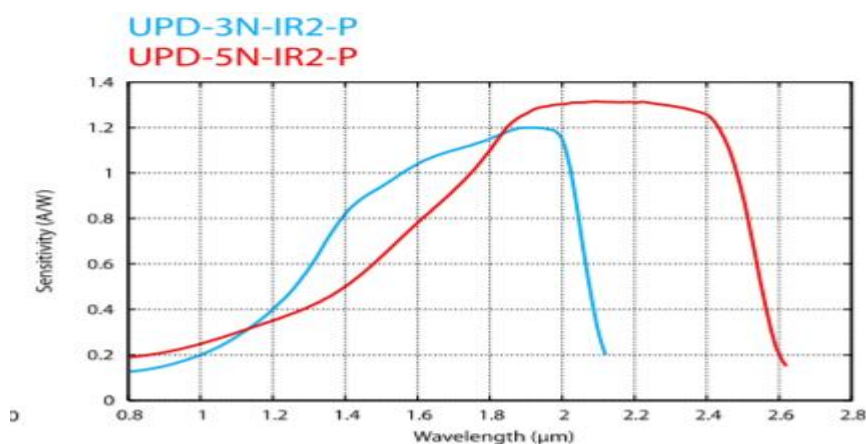


Рис.32 Модель *p-i-n* фотодіода

Проаналізувавши доступні на ринку фотодетектори було обрано надшвидкий фотодетектор UPD-3N-IR2-P який повністю задовольняв по характеристикам для даного тракту:

- Робочі довжини хвиль 800-2100 нм;
- Чутлива область $300 \text{ мкм} / 0.07 \text{ мм}^2$
- Матеріал InGaAs

Також головною характеристикою фотодетектора є чутливість. На Рис.33 зображено залежність чутливості від довжини хвилі у фотодетектора який вибраний для даного тракту UPD-3N-IR2-P і UPD-5N-IR2-P який розрахована



ний на більші довжини хвиль.

Рис.33 Залежність чутливості фотодетектора від довжини хвилі

						Лист
						50
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	PC61.464412.001 ПЗ	

Як видно з характеристики для потрібної нам довжини хвилі 1550 нм краще підходить фотодетектор UPD-3N-IR2-P.

Результат роботи фотодетектора є вихідний демодульований електричний сигнал. Спектр і осцилограма на виході фотодетектора у даному радіофотонному тракту зображені на Рис.29 і Рис.30 відповідно.

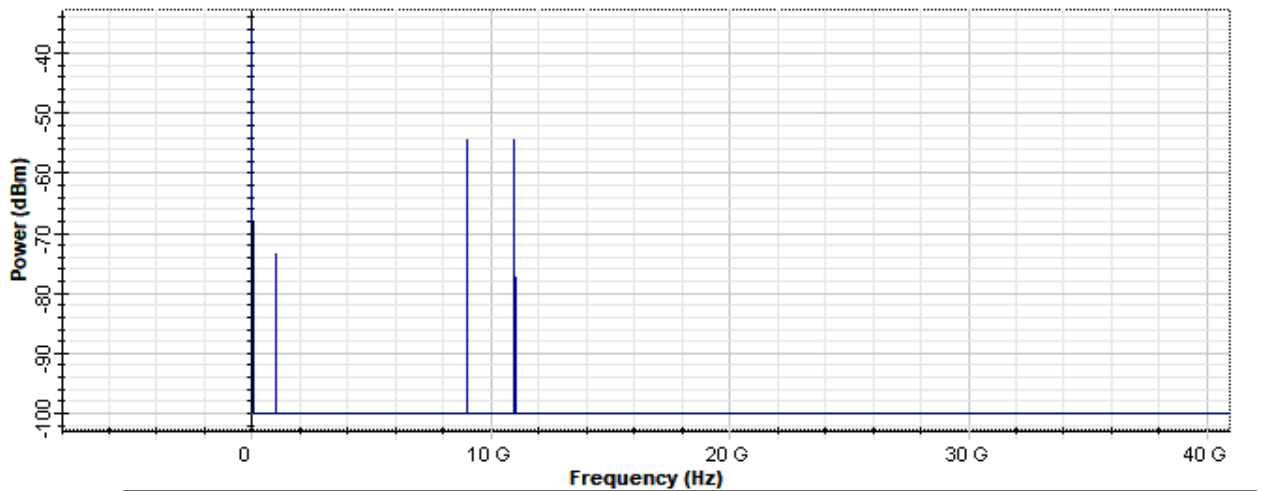


Рис.34 Спектр на виході фотодетектору

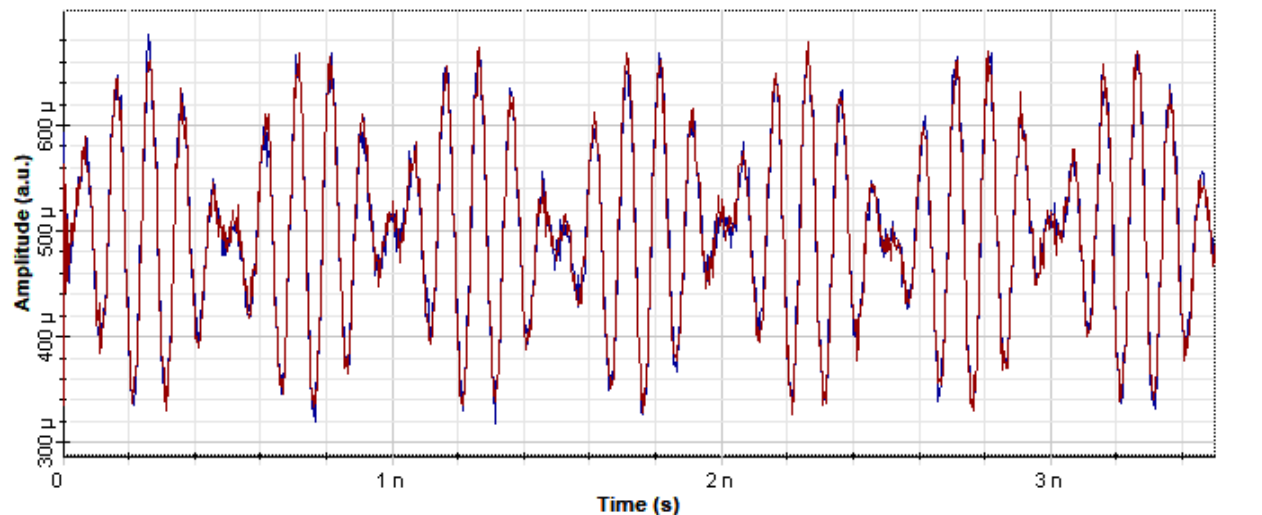


Рис.34 Осцилограма на виході фотодетектора

Отже в результаті модулювання у ПО OptiSystem отримана модель радіофотонного тракту AP

На кожному виході фотодетекторів встановлено по одному направле-
ному пірамідальному рупорі для формування направленої головної пелюст-
ки.

3.5 Втрати при поширенні сигналу у вільному середо- вищі

Втрати потужності сигналу електромагнітної хвилі, яка буде виникати в
наслідок розходження мікрохвильового сигналу на лінії прямої видимості це
і є втрати сигналу при поширенні у вільному середовищі. Рівняння для (FSPL)
включає у себе 2 ефекти: залежність від відстані і частоти (14).

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (14)$$

R- відстань до цілі; формула розрахована на те, що ціль знаходиться в даль-
ній зоні AP (в моделі відстань до цілі 6000м).

3.6 Втрати у атмосфері

Втрати у атмосфері в основному обумовлені розсіюванням електромаг-
нітних хвиль та поглинанням їх газами, що містяться у атмосфері (більше
всього киснем та водяними парами) і є складовою повних втрат у 10ГГц діа-
пазоні.

Для розрахунку втрат у атмосфері використовуємо модель у середо-
вищі MathLab яка оснований на даних Міжнародного союзу електрозв'язку [9].

Для розрахунку модель використовує наступні параметри:

- Температура навколишнього середовища (помірна) $T = 15^\circ$;
- Атмосферний тиск на рівні середнього тиску на рівні моря $P = 101300\text{кПа}$;
- Щільність водяної пари $W = 7.5 \text{ г/м}^3$
- Несуча частота 10 ГГц з робочою смугою 4 ГГц

Але при цьому вважається, що шлях сигналу пролягає у повністю од-
норідному середовищі і параметри атмосфери не змінюються по всьому шляху

ку який проходить сигнал.

									Лист
									52
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	PC61.464412.001 ПЗ				

На Рис.35 зображені графіки частотної залежності коефіцієнта підсилення широкосмугової решітки і частотної залежності втрат на поширення.

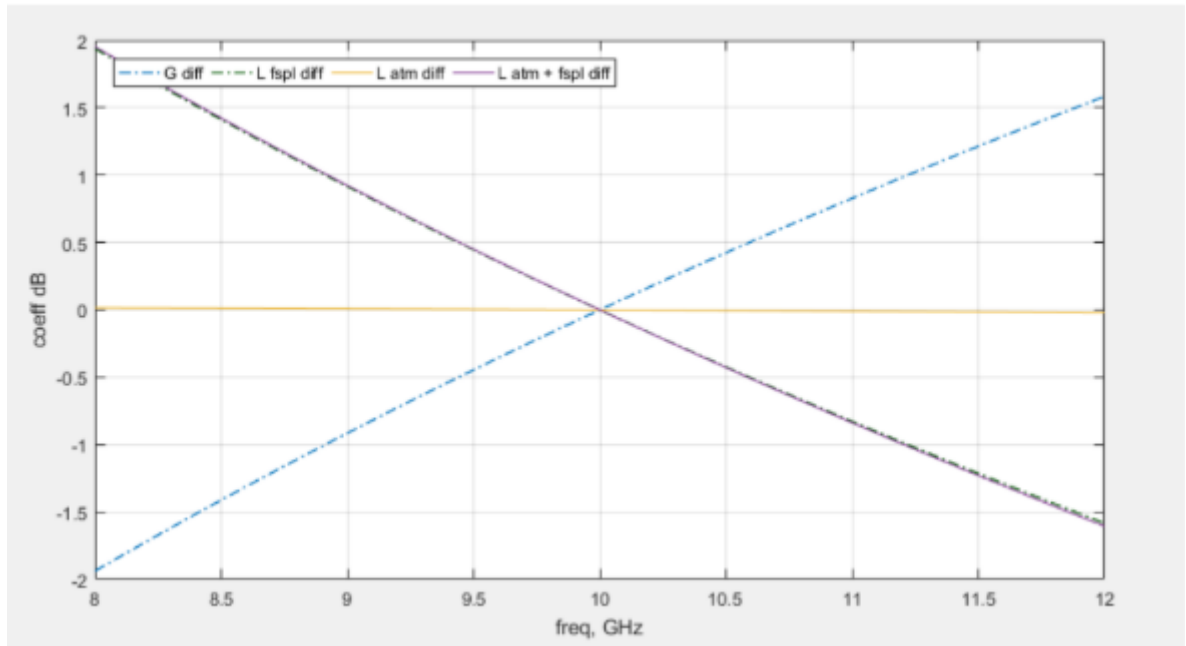


Рис. 35 Взаємна залежність коеф. Підсилення і втрат на поширення

Як видно з Рис.35 графіки підсилення і втрат квазісиметричні відносно робочої частоти.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

При виконанні даної роботи зв'язаної з розробкою системою живлення для радіофотонної решітки використовується комп'ютер для розрахунку її характеристик. Оскільки завданням на дипломну роботу передбачено проектування системи живлення АР, то передусім необхідно розробити заходи щодо захисту від електромагнітного випромінювання (ЕМВ). Крім того слід проаналізувати і інші небезпечні і шкідливі виробничі фактори, що виникають при проектуванні і експлуатації даної антени, а також розглянути методи і способи захисту від дії шкідливих факторів.

4.1 Визначення потенційно небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

До основних шкідливих і небезпечних факторів, що впливають на умови праці, відносяться:

1. ЕМВ радіочастотного діапазону (ДСНіП № 239-96)
2. Недостатня освітленість робочої зони (умови освітленості виробничих приміщень повинні відповідати нормам, зазначеним у ДБН 2.5-28-2006)
3. Небезпека ураження електричним струмом.
4. Незадовільні параметри мікроклімату робочої зони (величини показників мікроклімату у виробничих приміщеннях повинні відповідати нормам, зазначеним у ДСН 3.3.6.042-99).

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Організація робочих місць користувачів

"Державні санітарні норми і правила роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електронно-обчислювальних машин" встановлює норми щодо забезпечення охорони праці користувачів ПК. Дотримання вимог цих правил може значно знизити наслідки несприятливої дії на працівників шкідливих та небезпечних факторів, які супроводжують роботу з відео дисплейними матеріалами, зокрема можливість зорових, нервово-емоційних пережи-

					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		54

вань, серцево-судинних захворювань. Для того щоб забезпечити точне та швидке зчитування інформації в зоні найкращого бачення, площина екрана монітора виставлена перпендикулярно нормальній лінії зору. При цьому передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні. Клавіатура розміщена на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю. Кут нахилу клавіатури до столу обрано в межах від 5° до 15° так, що зап'ястя на долонях рук розташовуються горизонтально до площини столу. Таке положення клавіатури зручне для праці обома руками. Робочі місця з ПК розташовано відносно від стіни з вікнами на відстані не менше 1,5 м, від інших стін — на відстані 1 м, відстань між собою – не менше ніж 1,5 м. Причому так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски з поверхні екранів ПК передбачені сонцезахисні жалюзі. Штучне освітлення робочого місця, обладнаного ПК, здійснюється системою загального рівномірного освітлення. Як джерело штучного освітлення мають застосовуватись люмінесцентні лампи ЛБ. Вимоги до освітлення приміщень та робочих місць під час роботи з ПК:

- освітленість на робочому місці повинна відповідати характеру зорової роботи, який визначається трьома параметрами: об'єктом розрізнення
- найменшим розміром об'єкта, що розглядається на моніторі ПК; фоном, який характеризується коефіцієнтом відбиття; контрастом об'єкта і фону;
- необхідно забезпечити достатньо рівномірне розподілення яскравості на робочій поверхні монітора, а також в межах навколишнього простору;
- на робочій поверхні повинні бути відсутні різкі тіні;
- в полі зору не повинно бути відблисків (підвищеної яскравості поверхонь, які світяться та викликають осліплення);
- величина освітленості повинна бути постійною під час роботи;

					<i>PC61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		55

Тривалість регламентованих перерв під час роботи з ЕОМ становить 10 хвилин через кожну годину роботи . Для зниження нервово-емоційного напруження, втомленості зорового аналізатора, для поліпшення мозкового кровообігу і запобігання втомі доцільно деякі перерви використовувати для виконання комплексу вправ, які передбачені ДСанПіН 3.3.2.007-98.

4.2.2 Освітлення робочого місця користувача

Штучне освітлення, а саме відсутність у спектрі ламп денного світла й ламп накаливання біологічно активної ультрафіолетової складової при тривалому впливі може призвести до ультрафіолетової недостатності, при якій знижуються бактерицидні властивості шкіри та імунітет. Істотне значення для збереження тривалої працездатності, підвищення продуктивності праці має забезпечення норм освітленості на робочому місці. Величина освітленості регламентується нормами ДБН В.2.5-28-2018. Робоче приміщення належить до І групи – приміщення, у яких розрізнення об'єктів зорової роботи здійснюється при фіксованому напрямку лінії зору працюючих на робочу поверхню.

Нормування штучного освітлення також здійснюється згідно ДБН В.2.5-28-2018. Для загального освітлення використовують головним чином люмінесцентні лампи, що обумовлено їхніми перевагами. Для розрахунку штучного освітлення застосовують метод коефіцієнта використання потоку:

$$\Phi = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{N \cdot C}$$

де Φ – світловий потік; E – нормована мінімальна освітленість; K – коефіцієнт запасу; S – освітлювана площа; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

C – коефіцієнт використання випромінюваного світильниками світлового потоку на розрахунковій площі; N – число світильників.

Згідно ДБН В.2.5-28-2018 визначаємо норму освітленості:

$$E = 300 \text{ лк}; K = 1,5; S = 5 \cdot 4 = 20 \text{ м}^2; Z = 1,2.$$

					<i>PC61.464412.001 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		56

Необхідна кількість люмінесцентних ламп визначається по формулі:

$$N = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{\Phi \cdot C} \quad (5.2)$$

Найбільш прийнятними для приміщення є люмінесцентні лампи ЛД (денного світла) потужністю 40 Вт. Нормальний світловий потік лампи ЛД-40 дорівнює $\Phi = 2340$ лм. Величиною i , індексом приміщення можна встановити залежність від площі приміщення й висоти підвісу:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} \quad (5.3)$$

де $A = 5$ м – довжина приміщення; $B = 4$ м – ширина приміщення; h – висота підвісу;

$$h = H - h_p - h_c \quad (5.4)$$

де $H = 3,5$ м – висота приміщення; $h_p = 0,8$ м – висота робочої поверхні;

$h_c = 0,4$ м – висота від стелі до нижньої частини лампи;

$$h = 3,5 - 0,8 - 0,4 = 2,3 \text{ м;}$$

$$i = \frac{5 \cdot 4}{2,3 \cdot (5 + 4)} = 0,97$$

Коефіцієнт використання світлового потоку на розрахунковій площі $C = 0,3$. У підсумку число світильників вийде рівним:

$$N = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 20 \cdot 1,2}{2340 \cdot 0,3}$$

Для штучного освітлення в робочому приміщенні достатньо використати 2 люмінесцентні лампи денного світла ЛД-40, зі світловим потоком $\Phi = 2340$ лм кожна.

4.2.3. Виробничий шум

Допустимі шумові характеристики на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6.037-99. Зовнішні джерела шуму відсутні. Джерелами шуму в приміщенні є персональні комп'ютери, телефон, принтер, кондиціонер, голоси людей і т.д. Припустимі рівні звукового тиску, рівні звуку й еквівалентні рів-

ні звуку на робочих місцях нормуються відповідно до ДСН 3.3.6.037-99.

Лист

PC61.464412.001 ПЗ

57

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Загальний рівень звуку в лабораторії не перевищує 50 дБА . Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 захист від шуму в приміщенні, створеного на робочих місцях внутрішніми джерелами повинна здійснюватися наступними методами: зменшенням шуму в джерелі, раціональним плануванням і акустичною обробкою робочого приміщення звукоізоляційними матеріалами.

4.2.4 Мікроклімат робочої зони

Для аналізу мікроклімату приміщення, у якому знаходиться ПЕОМ, скористаємося ДСН 3.3.6.042-99, що встановлює такі параметри мікроклімату як температура, вологість і рухливість повітря в залежності від ваги виконуваних робіт, часу року.

Роботу, виконувану в розглянутому приміщенні можна віднести до категорії 1а, тому що вона виконується сидячи і не вимагає фізичних зусиль. Енерговитрати організму людини при такому виді робіт складають до 120 ккал/г. Джерелом теплового випромінювання є радіатор центрального опалення, що складається із семи секцій. Нормовані значення параметрів мікроклімату згідно ДСН 3.3.6.042-99 оптимальні і припустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень представлені в таблиці 5.2.1.

Табл. 5.2.1

Період року	Температура повітря, С		Вологість повітря, %		Швидкість руху повітря, м/с	
	оптимальна	опустима	оптимальна	допустима	оптимальна	опустима
холодний	22-24	21-25	40-60	Не більше 75	0.1	не більше 0.1
теплий	23-25	22-28	40-60	75 при 24'С і нижче	0.1	0.1-0.2
присутні	22-24		55		0.1	

Параметри мікроклімату підтримуються за допомогою систем кондиціонування.

4.3 Електромагнітне випромінювання НВЧ

Відомо, що ЕМВ при потужності, що перевищують нормативи ДСНІП № 239-96, може викликати в організмі людини певні функціональні і морфологічні зміни, які у ряді випадків призводять до професійних захворювань.

Оскільки в приміщенні нема пристроїв які мають великий рівень електромагнітного випромінювання, а антена, яка проектується має занадто малі потужності, щоб негативно вплинути на організм людини, то додаткові засоби захисту від електромагнітного випромінювання не потрібні. Переконаємося в цьому провівши розрахунок щільності потоку ЕМП:

$$\text{ЩПЕ} = \frac{E_{\text{доп}}}{t_{\text{опр}}} \leq 10 \text{ Вт/м}^2$$

де - $E_{\text{доп}}$ енергетичне навантаження допустиме, при безперервному випромінюванні $E_{\text{доп}} = 2$, $t_{\text{опр}}$ - час опромінювання, в нашому випадку 8 годин.

$$\text{ЩПЕ} = \frac{E_{\text{доп}}}{t_{\text{опр}}} = \frac{2}{8} = 0.25 \text{ Вт/м}^2$$

.5 Електробезпека

Граничне допустимі значення струмів і напруги дотику при нормальному і аварійному режимах роботи електрообладнання відповідають ГОСТ 12.1.038-88.

Приміщення лабораторії, що знаходиться в приватному будинку, відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом, оскільки відносна вологість повітря не перевищує 75%, матеріал підлоги - неструмопровідний, температура повітря не перевищує 35°C, відсутні хімічно агресивні середовища, а також, можливість одночасного дотику до металевих частин електричного обладнання з одного боку, та до заземлених металоконструкцій будівель з іншого боку.

					РС61.464412.001 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

Живлення електроустановок, комп'юторів і контрольно-вимірювальної апаратури проводиться від трифазного ланцюга змінної напруги з глухо зазем

леною нейтраллю, зануленням і повторним заземленням нульового проводу відповідно до вимог ПУЕ. Є пристрій максимального струмового захисту, що дозволяє здійснити відключення напруги живлення мережі при аварійному режимі роботи обладнання.

В приміщенні знаходяться електричні пристрої, які відповідно до ГОСТ 12.2.007- 75 відносяться до II класу. Таким чином в додаткових заходах по забезпеченню електробезпеки нема необхідності

4.6 Пожежна безпека

У приміщенні є рідкі горючі речовини, тому розглянуте приміщення відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 можна віднести по пожежонебезпеці до категорії В. Клас робочої зони приміщення по пожежонебезпеці - II- III, згідно ПУЕ. Можливими причинами виникнення пожежі можуть бути:

- коротке замикання проводки;
- паління в недозволених місцях, користування побутовими електронагрівальними приладами.

У зв'язку з цим відповідно до ПУЕ необхідно передбачити наступні заходи:

1) ретельна ізоляція всіх струмоведучих провідників до робочих місць; періодичний огляд і перевірка ізоляції;

2) строге дотримання норм протипожежної безпеки на робочому місці.

Проводяться організаційно-технологічні заходи (заборона паління, інструктаж). Дотримано усі вимоги ДБН В.1.1-7:2016 по вогнестійкості будинків, часу евакуації у випадку пожежі, ширина евакуаційних проходів і виходів із приміщень назовні.

Для евакуації в будинку призначено два виходи: головний і чорний. Так як будинок невеликий, то існує одна схема евакуації при пожежній небезпеці, яка розміщена при вході в будівлю.

небезпеці, яка розміщена при вході в будівлю.					Лист
РС61.464412.001 ПЗ					60
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	

В приміщенні відсутні вогнегасники, тому необхідно встановити:

- Вогнегасник ВВ-3 - 1 шт.;
- Вогнегасник ВП-I "Момент" - 1 шт.

Така кількість вогнегасників відповідає вимогам ДСТУ 3675-98, якими передбачене обов'язкова наявність двох вогнегасників на 100 м² площі підлоги для приміщень типу конструкторських бюро. Вибір вогнегасників речовини ґрунтується на тім, що пожежа, що може виникнути в приміщенні лабораторії, відноситься до класу В, тому що палаючими об'єктами виявляються електроустановки, що знаходяться під напругою. Для гасіння пожеж цього класу застосовують галоїдоуглеводні, диоксидвуглеводні порошки.

У приміщенні виконуються усі вимоги по пожежній безпеці відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 "Правила пожежної безпеки в Україні"

					<i>РС61.464412.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		61

Висновки

В ході роботи було розглянуто переваги радіофотонної АР перед класичними АР в сучасних радіотехнічних системах.

Описано більш докладно компоненти, які використовувались саме у даному тракті живлення АР: таких як оптична лінія зв'язку, джерело оптичного сигналу, МZ-модулятор, фотодетектор. Було розглянуто принципи їх роботи, та різновиди даних компонентів.

За допомогою ПО було змодульовано радіофотонний канал, та зняті характеристики за якими видно, що радіофотонна АР має:

- Широкий динамічний діапазон
- Високий рівень фазової стабільності
- Багатоканальність при строгій ідентичності параметрів

					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		62

Список використаної літератури

1. Активные фазированные антенные решетки. Под ред. Д.И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
2. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках М.: Радиотехника, 2010. 144 с. ISBN: 978-5-88070-243-5.
3. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства МИЭТ 2001.
4. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и ее применение 2011. 149с.
5. Gregory E. Obarski and Paul D. Hale How to measure relative intensity noise in lasers 05/01/1999.
6. Ejeckam, F. E., Chua, C. L., Zhu, Z. H., Lo, Y. H., Hong, M., and Bhat, R., "High-performance InGaAs photodetectors on Si and GaAs substrates," Applied Physics Letters, 67(26), 3936–3938 (1995).
7. David Bailey Edwin Wright Practical Fiber Optics 1st Edition 2006 Paperback ISBN: 978075065800.
8. В.М. Афанасьев ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ПО СХЕМЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА–ЦЕНДЕРА
9. Рекомендация МСЭ-R P.619-3 (12/2017) Данные о распространении радиоволн, необходимые для определения помех между станциями, находящимися в космосе и на поверхности Земли

					РС61.464412.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		63

