

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

ЧЕТВЕРИК ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

Допускається до захисту:  
Завідувач кафедри  
інформаційних технологій,  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Т. В. Нескородева  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ ЗАХИЩЕНОГО КАНАЛУ  
ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Спеціальність 125 Кібербезпека

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Керівник:  
Сергієнко С.П., доцент кафедри  
інформаційних технологій,  
к.ф.- м.н., доцент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Оцінка : \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
(бали за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вінниця 2021

## АНОТАЦІЯ

**П.І.Б** Експериментальне вивчення захищеного каналу оптичного зв'язку.

Спеціальність \_\_\_\_\_, спеціалізація \_\_\_\_\_, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2021.

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі досліджено теоретико-методологічний аспект захищеного каналу оптичного зв'язку; здійснено аналіз хвиль видимого світла для широкосмугового зв'язку; здійснено дослідження оптичної системи з DP-QPSK на швидкості в 100 гбіт / с.

Показано технології модуляції оптичних сигналів, застосовувані формати модуляції, принципи побудови захищених високошвидкісних атмосферних оптичних каналів зв'язку. Встановлено методи використання хвиль видимого світла для широкосмугового зв'язку; технічні та експлуатаційні характеристики ближньої широкосмугового зв'язку з використанням видимого світла; систему моніторингу персоналу і вантажів на базі само організованих бездротових мереж.

**Ключові слова:** оптичні системи зв'язку, optisystem, формати модуляції, оптоелектронних компоненти, oqpsk, оптичні ефекти у волокнах, DPSK, QPSK, DP-QPSK.

81 с., 1 табл., 27 рис., 40 джерел.

Табл. 1, Рис. 2, Бібліограф.: 40 найм.

## ABSTRACT

..... Experimental study of a protected optical communication channel.

Specialty \_\_\_\_\_, specialization \_\_\_\_\_, Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2021.

Aspect of a secure optical communication channel; the analysis of visible light waves for broadband communication is carried out; The research of the optical system with DP-QPSK at a speed of 100 Gbps was carried out. Methods of using visible light waves for broadband communication are established; technical and operational characteristics of short-range broadband communication using visible light; personnel and cargo monitoring system based on self-organized wireless networks.

**Key words:** optical communication systems, optisystem, modulation formats, optoelectronic components, oqpsk, optical effects in fibers, DPSK, QPSK, DP-QPSK.

81 p., 1 table., 27 fig., 40 sources.

Table. 1, Fig. 2, Bibliographer .: 40 hired.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>4</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>РОЗДІЛ 1.ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ</b>	
<b>ЗАХИЩЕНОГО КАНАЛУ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>7</b>
1.1 Технології модуляції оптичних сигналів.....	7
1.2 Застосовувані формати модуляції .....	9
1.2.1 Формати з амплітудною модуляцією .....	9
1.2.2 Формати з фазовою модуляцією.....	14
1.2.3 Змішані амплітудно-фазові формати .....	16
1.3 Принципи побудови захищених високошвидкісних атмосферних оптичних каналів зв'язку.....	18
<b>РОЗДІЛ 2.АНАЛІЗ ХВИЛЬ ВИДИМОГО СВІТЛА ДЛЯ</b>	
<b>ШИРОКОСМУГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>24</b>
2.1 Використання хвиль видимого світла для широкосмугового зв'язку .....	24
2.2 Технічні та експлуатаційні характеристики ближньої широкосмугового зв'язку з використанням видимого світла.....	32
2.2.1 Передавач для світлового зв'язку .....	32
2.2.2 Приймач світлового зв'язку.....	33
2.2.3 Поточна діяльність по стандартизації.....	36
2.2.4 Питання безпеки очей і нормативні документи.....	37
2.2.5 Впровадження та розгортання .....	38
2.2.6 Промисловість і виробництво.....	38
2.2.7 Підключення до мережі та автономні транспортні засоби.....	44
2.3 Система моніторингу персоналу і вантажів на базі само організованих бездротовій мережі.....	45
<b>РОЗДІЛ 3.ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ З DP-QPSK НА</b>	
<b>ШВИДКОСТІ В 100 ГБІТ / С.....</b>	<b>62</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>76</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>78</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВОЛЗ - волоконно-оптична лінія зв'язку

ВОСПІ - волоконно-оптична система передачі інформації

ВОСП - волоконно-оптична система передачі

ОП - оптичний підсилювач

DWDM - щільне спектральне ущільнення

HDWDM - високоякісне спектральне ущільнення

PMD - поляризаційно-модова дисперсія

НПЛ - напівпровідниковий лазер

ВКР - вимушене комбінаційне розсіювання

н/п Напівпровідник

VCSEL - vertical-cavity surface emitting lasers ( н/п лазери з вертикальним резонатором)

СЛД - суперлюмінесцентний діод

ЛФД - лавинний фотодіод

МДМ - мультиплексори і демультиплексори

FBG - волоконна решітка Брегга

ОК - оптичний комутатор

ОІ - оптичний ізолятор

ВС - волоконний світловод

ІЧ - Інфрачервоний

ПЗ - показник заломлення

РЗЕ - рідкісноземельний елемент

ВОБР - волоконно-оптична брегівська решітка

ВКР - вимушене комбінаційне розсіювання

ВГСС - германо-силікатні світловоди, леговані вісмутом

ВАЦ - вісмутові активні центри

УКІ - ультракороткі імпульси

ОВ - оптичне волокно

MCVD - метод модифікованого хімічного парофазного осадження

## ВСТУП

*Актуальність теми.* У сучасному світі системи зв'язку стали однією з основ розвитку суспільства. Попит на послуги зв'язку зростає з геометричною прогресією. Звідси і високі вимоги до сучасних мереж зв'язку. Загальновизнано, що забезпечити людство гідним якістю зв'язку на даний момент можливо тільки за допомогою оптичного волокна.

Але навіть у вік високошвидкісних волоконно-оптичних ліній передачі даних є куди прагнути. Головним завданням зараз залишається збільшення протяжності ВОСП, зменшення їх загальної вартості і вартості одиниці переданої інформації, а також збільшення спектральної ефективності (ефективність використання спектра для передачі інформації) DWDM- систем.

У досягненні цієї мети велику роль відіграють сучасні прогресивні формати модуляції оптичних сигналів. До даних сигналам висувається ряд серйозних вимог, який обумовлений специфікою призначення того чи іншого сигналу.

До даного ряду вимог відносяться такі, як: найбільш ефективно використовується смуга частот; максимальна стійкість оптичного каналу; захищеність від лінійних і нелінійних спотворень; гнучкість системи (можливість гнучкого налаштування передавачів); стабільність; економічна ефективність і т.д.

Вивчення впливу різних форматів модуляції на оптичні сигнали на практиці обмежена складністю і дорожнечою устаткування. Однак, завдяки сучасному програмному забезпеченню (OptiSystem, ModeSYS, OptiSim, OptiSPICE, PHOTOSS і т.д.) стало можливим доскональне вивчення всіх фізичних процесів, що протікають в ВОЛЗ.

Перспективність використання сучасних форматів модуляції залежить від конкретних методів їх інтеграції в існуючі технології передачі даних, тому, дослідження роботи систем з використанням різних форматів модуляції і виявленні оптимальних співвідношень застосовуваних форматів з технологією

конфігурації системи є вельми актуальним. Основним джерелом інформації до даної роботи були англomовні статті з наукових журналів, спеціалізовані зарубіжні сайти, а також сайти виробників програмного забезпечення.

Аналітичному моделюванню телекомунікаційних мереж присвячені роботи Г.П. Башарина, В.І. Неймана, С.І. Самойленко, В.М. Вишневського, А.Н. Дудіна, О.І. Шелухіна, Г.П. Захарова, О.С. Чугреєва, Г.Г. Яновського, Б.С. Гольдштейна, А.Є.. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, Т.І. Алієва, Н.А. Соколова, L. Kleinrock, W.Bux, W.Leland, M. Taggu, I. Norros і багатьох інших авторів. Для більшості цих робіт характерні узагальнені моделі дослідження мереж при впливі на них різних моделей трафіку. Разом з цим, в даний час поки ще відомо досить мало робіт, присвячених дослідженню широкосмугових оптичних мереж доступу, що приймають в при складанні моделей особливості мережевих структур і механізмів, що реалізуються на рівні доступу, які враховують при оцінці показників якості обслуговування, (зокрема - девіації затримки кожного з переданих класів трафіку), вплив пріоритетного обслуговування, а також враховують вплив видів топологій мережі, як при оцінці показників якості обслуговування переданих класів трафіку так і при оцінці показників надійності.

***Об'єктом дослідження є захищений канал оптичного зв'язку.***

***Предметом дослідження є експериментальне вивчення захищеного каналу оптичного зв'язку.***

***Метою роботи є вирішення фундаментальної науково-технічної проблеми - розробки нових методів побудови мережевої інфраструктури доступу великих телекомунікаційних операторів на основі масового впровадження широкосмугових оптичних технологій, орієнтованих на реалізацію мереж наступного покоління (NGN).***

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- визначити технології модуляції оптичних сигналів;
- розглянути застосовувані формати модуляції;
- охарактеризувати принципи побудови захищених високошвидкісних атмосферних оптичних каналів зв'язку;
- дослідити використання хвиль видимого світла для широкосмугового зв'язку;
- визначити технічні та експлуатаційні характеристики ближньої широкосмугового зв'язку з використанням видимого світла;
- проаналізувати систему моніторингу персоналу і вантажів на базі само організованої бездротової мережі;
- провести дослідження оптичної системи з DP-QPSK на швидкості в 100 гбіт / с.

**Практичне значення отриманих результатів.** Удосконалена технологія захищеного каналу оптичного зв'язку шляхом розробки автоматизованого вимірювального діагностичного комплексу (ВДК), з використанням нових методів діагностування реле та автоматизації процесу вимірювання їх електричних, часових і механічних параметрів. Здійснено дослідження оптичної системи з DP-QPSK на швидкості в 100 гбіт / с .

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у дипломній роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування, прикладної теорії надійності, теорії оптимізації та інші.

**Структура і обсяг роботи.** Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить 81 сторінки, 27 рисунка, 1 таблицю, 2 формули, список літератури містить 40 найменувань літературних джерел.

## РОЗДІЛ 1

### ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ЗАХИЩЕНОГО КАНАЛУ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

#### 1.1 Технології модуляції оптичних сигналів

Зростання потреби в швидкості і обсязі переданої інформації поставив завдання збільшення пропускної здатності DWDM - систем зв'язку. З'явилася необхідність в підвищенні спектральної ефективності DWDM систем і більш раціонального використання робочого спектра (зменшення між каналного відстані і збільшення каналної швидкості). Але сучасні DWDM - системи на швидкостях 40 Гбіт / с і вище не можуть працювати з традиційними амплітудними форматами модуляції, тому виникла потреба в абсолютно нових модульованих форматах для найбільш ефективного використання потенціалу DWDM.

На даний момент існує 3 основних технології модуляції оптичного сигналу: DML (Directly Modulated Lasers) - Лазер з прямою модуляцією; EAM (Electroabsorption Modulators) - Електроабсорбційний модулятор (Електропоглинаючий); MZM (Mach-Zehnder Modulators) - Модулятор Маха - Цандера

DML - найпростіший вид модуляції оптичного сигналу. Моделюючий сигнал управляє потужністю оптичної несучої (лазер модулюється струмом безпосередньо). Є бінарної модуляцією і ефективно застосовується в мережах зв'язку на швидкостях не вище 10 Гбіт / с.

Основним обмежуючим фактором DML є Чірпінг - ефект. Це паразитне явище, яке є залишкової фазовою модуляцією, викликане амплітудною модуляцією. Даний ефект розширюють оптичний спектр, обмежуючи відстань між DWDM - каналами. Також може взаємодіяти з хроматичної дисперсією в волокні, тим самим збільшуючи спотворення сигналу.

ЕАМ - Електроабсорбційний модулятор. Заснований на принципі зміна параметрів прозорості деяких матеріалів під дією електричного поля, створюваного джерелом сигналу, що модулює (Ефект Франца-Келдиша). Даний модулятор добре працює на швидкостях від 40 Гбіт / с до 80 Гбіт / с.

MZM - Модулятор Маха-Цандера (рисунок 1.1). На відміну від Електроабсорбційного модулятора, робота даного модулятора заснована на принципі інтерференції.

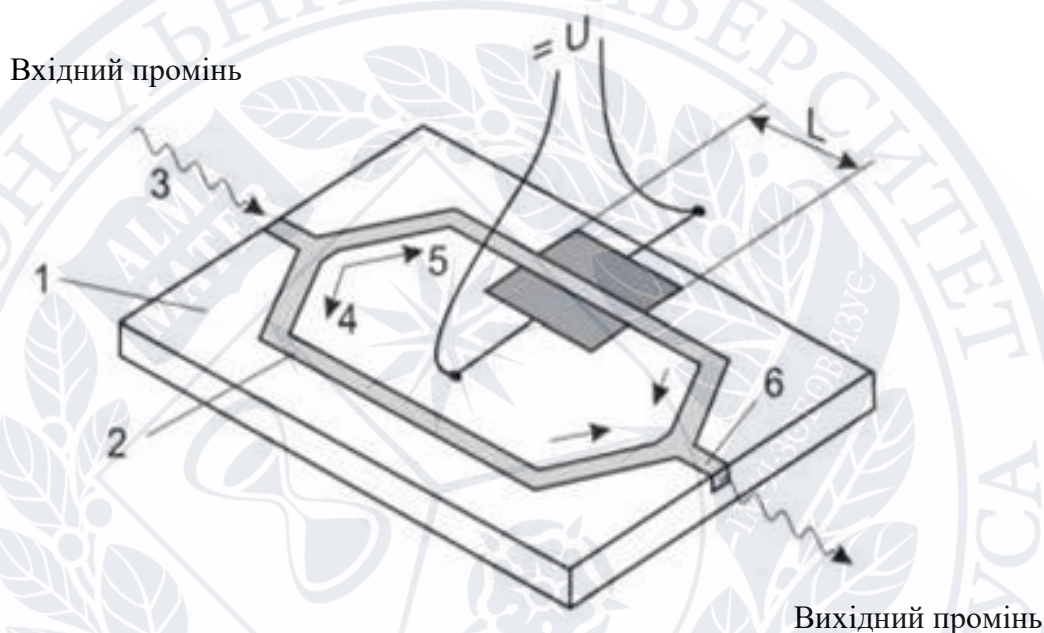


Рис. 1.1 - Модулятор Маха-Цандера (MZM) в розрізі

Вхідний світловий потік роздвоюється. Одне коліно модулятора має фазовий модулятор, який задає різницю фаз оптичних сигналів, контрольовану зовнішнім напругою. На вихідній муфті дані сигнали зустрічаються і в залежності від того, яка напруга було подано на фазовий модулятор, після взаємного впливу цих сигналів на виході виходять логічні 1 або 0. На даний момент Модулятори Маха - Цандера є найбільш зручними для реалізації різних форматів модуляції. Найбільш зручно реалізовані на  $\text{LiNbO}_3$  [1].

Незважаючи на різноманітність способів модуляції оптичних сигналів, необхідно строго задовольняти вимогам, що пред'являються до формуючих сигналів. Дані вимоги обумовлені відстанями, на яких буде відбуватися передача

даних, областю застосування систем, вимогам до швидкісних режимів, техніко-економічними показниками і т.д.

До даного ряду вимог відносяться такі, як: найбільш ефективно використовується смуга частот оптичного каналу (найбільше число інформаційних біт в одиницю часу); максимальна стійкість оптичного каналу (тобто нормальна працездатність оптичного каналу при мінімальному OSNR); захищеність від лінійних (хроматична і поляризаційні дисперсії) і нелінійних (ФСМ, ФКМ, ВКР, ВРМБ, ЧВС) спотворень; гнучкість системи (можливість гнучкого налаштування передавачів); стабільність характеристик модульованих сигналів; економічна ефективність і т.д.

Задовольняти подібного жорсткого ряду вимог можуть тільки оптичні передавачі з зовнішньої модуляцією випромінювання одномодових вузькосмугових лазерів. Параметрами модуляції оптичного випромінювання можуть бути: амплітудне значення, фаза випромінювання, фаза імпульсної послідовності, частота випромінювання, кодове накладення на випромінювання і т.д.

## **1.2 Застосовувані формати модуляції**

### **1.2.1 Формати з амплітудною модуляцією**

З причини дешевизни і простоти реалізації часто застосовують амплітудні формати модуляції (ASK - Amplitude Shift Keying). Основний модульований параметр - амплітуда оптичного сигналу. При амплітудній модуляції в системах оптичного зв'язку здійснюється зміна потужності оптичного випромінювання передавача. Є першим і найпоширенішим з форматів модуляції оптичного сигналу тому є найпростішим для реалізації - виходить при прямій модуляції струмом накачування лазера. Існує 2 види амплітудної модуляції - пряма і зовнішня [12].

При прямій модуляції в передавачах, відповідно до інформаційної послідовності, модулюється ток накачування (рис.1.2). Під дією модульованого

струму накачування змінюється потужність випромінювання лазера відповідно до інформаційної бітової послідовності.

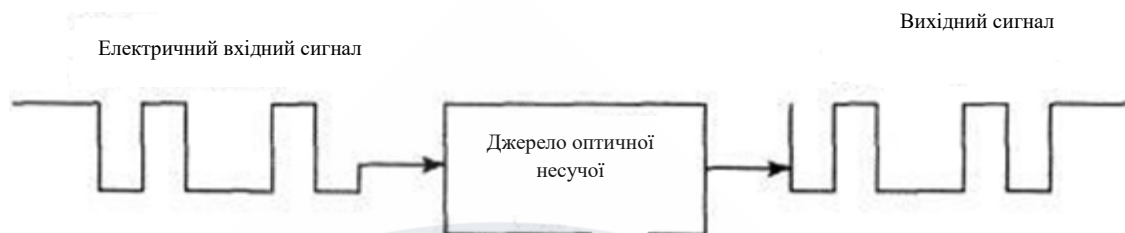


Рис 1.2 - Схема передавача з прямою модуляцією

Даний спосіб є переважаючим на швидкостях передачі даних до 2,5 Гбіт / с. На швидкостях понад 2,5 Гбіт / с спостерігається серйозний вплив чірпа, яке призводить до серйозних спотворень і распліттю сигналу. Але незважаючи на негативний вплив чірпінг - ефекту, можна підвищити швидкість передачі до 10 Гбіт / с використовую структуровані імпульси накачування, волокна з негативною дисперсією і лазери спеціальної конструкції. Однак, при використанні амплітудної модуляції на швидкостях до 10 Гбіт / с, дальність передачі і спектральна ефективність системи зв'язку навіть на сучасному обладнанні далекі від оптимальних.

Дану проблему може вирішити використання передавачів на основі лазерів з безперервною накачуванням і зовнішньої модуляцією (рис 1.3).

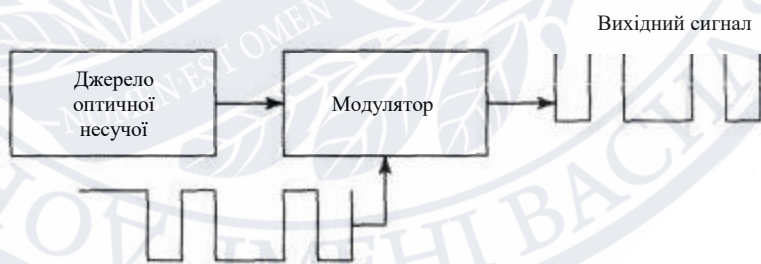


Рис 1.3 - Схема передавача з зовнішньої модуляцією

Найпопулярнішим амплітудним форматом є формат без повернення до нуля - NRZ (Non Return to Zero). Сигнал, відповідний логічній одиниці формується оптичним імпульсом, тривалість якого дорівнює періоду проходження символів, а нулю відповідає відсутність оптичного сигналу або

сигнал, рівень якого менше рівня логічної одиниці. На рис. 1.4 представлені потужність, фаза, оптичний спектр, ай-діаграма і схема формування оптичного сигналу при NRZ - кодуванні з амплітудною модуляцією.

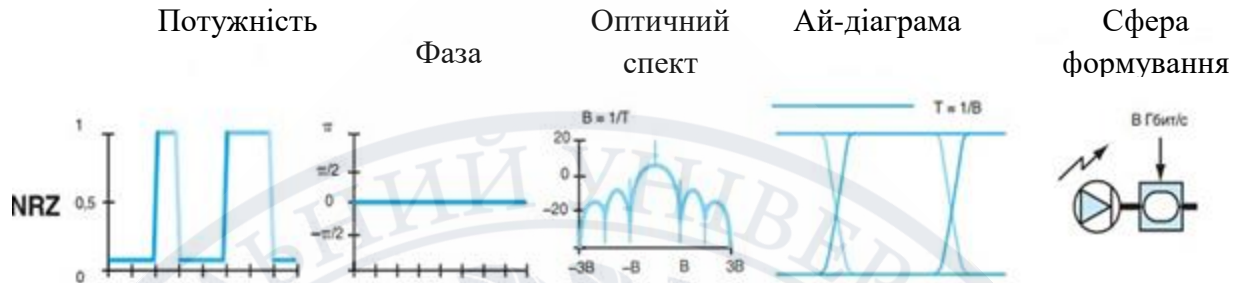


Рис.1.4 - Характеристики сигналу при NRZ кодування з амплітудною модуляцією

Для реалізації даного виду модуляції досить застосування одного модулятора MZ (Маха-Цандера) (рис 1.5). Змінюється амплітудне значення (б), але залишається незмінною фаза імпульсів (в).

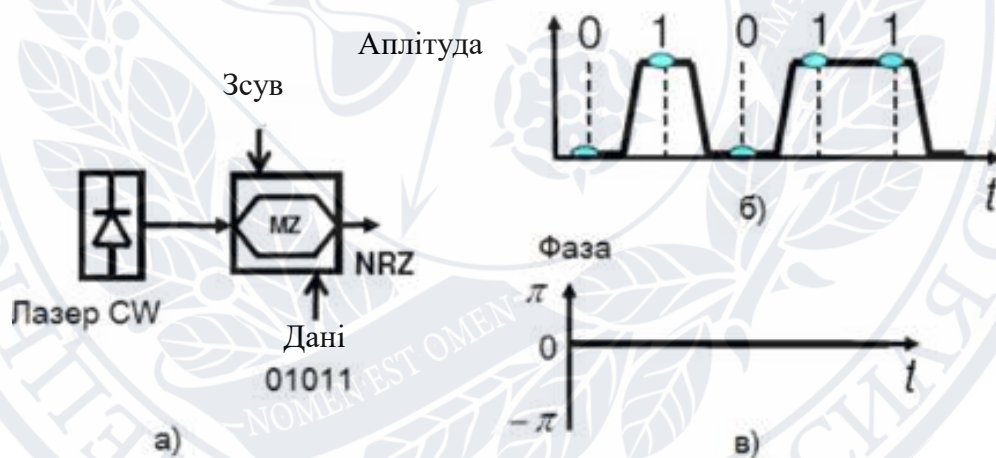


Рис. 1.5 - Формування оптичного сигналу NRZ на виході модулятора

RZ - Return to Zero формат з "поверненням до нуля" (рис. 1.6). Логічна одиниця являє собою імпульс, тривалість якого може варіюватися, але завжди менше періоду проходження символів. У мережах зв'язку на швидкостях до 10 Гбіт / с даний формат набув широкого поширення через високу стійкості до нелінійності волокна. Крім того, у сигналів RZ модульованих сигналів є

додаткова стійкість до поляризаційно - модової дисперсії, якій NRZ - сигнали не володіють.

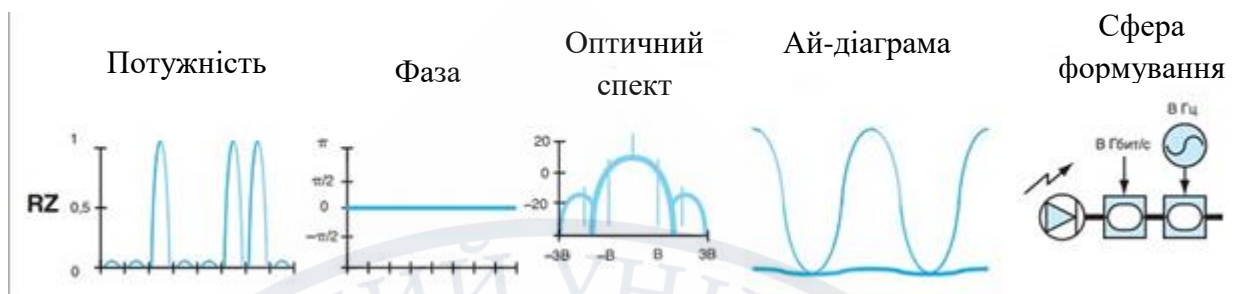


Рис 1.6 - Характеристики сигналу при RZ кодуванні з амплітудною модуляцією

Для формування оптичного сигналу з RZ кодуванням і амплітудної модуляцією необхідно скористатися додатковим модулятором MZ (малюнок 7). В даному модуляторі сигнал у форматі NRZ перетворюється в імпульси з поверненням до нуля.

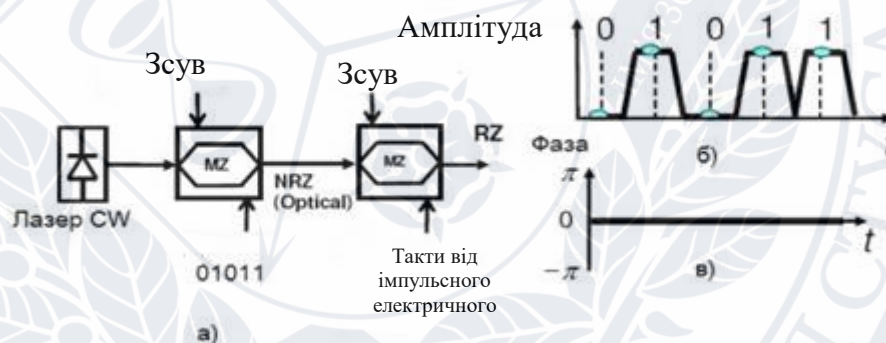


Рис. 1.7 - Формування оптичного сигналу RZ

Незважаючи на успіх двох попередніх форматів, найбільш успішним є чіпирований (містить частотну модуляцію) RZ формат амплітудної модуляції (CRZ). Він формується при проходженні RZ сигналу через фазовий модулятор, на який подається періодичний сигнал на частоті проходження інформаційних сигналів. У сигналу в форматі CRZ спектр ширше, ніж у RZ-сигналу, що обмежує максимально досягну спектральну ефективність і, таким чином, пропускну здатність. Однак цей формат набув широкого поширення в 10 Гбіт / с системах, тому що він значно стійкіший до нелінійних ефектів.

Для реалізації CRZ необхідне включення третього ступеня модуляції, яка буде вносити передспотворення для часткової компенсації дисперсійних спотворень в протяжній волоконній лінії за допомогою використання зовнішнього електричного сигналу.

### 1.2.2 Формати з фазовою модуляцією

Фазові формати модуляції знайшли застосування в системах зв'язку на швидкостях понад 10 Гбіт / с. До найбільш поширених належать такі формати як: BPSK, DPSK, QPSK, а також їх різновиди з мультиплексованими ортогональними когерентними променями від одного джерела - РМ-хвилі (PM-BPSK, PM-DPSK, PM-QPSK). РМ - хвилі подвоюють пропускну здатність каналу за рахунок ділення одного високошвидкісного потоку даних на два паралельних. Також, застосування фазового кодування сприяє зниженню фізичної швидкості імпульсів. А це означає, що знижується і необхідна смуга частот [12].

Одним з найбільш поширених фазових форматів є BPSK (Binary Phase-Shift Keying) - двійкова фазова маніпуляція (рис. 1.8). В оптичних лініях зв'язку при формуванні оптичного BPSK - сигналу, імпульси біполярного довічного сигналу керують випромінюванням MZM - лазера таким чином, що формуються оптичні імпульси з чергуванням фаз 0 і  $\pi$  (рис. 1.9). Рівень потужності випромінювання в середньому зберігається незмінним.

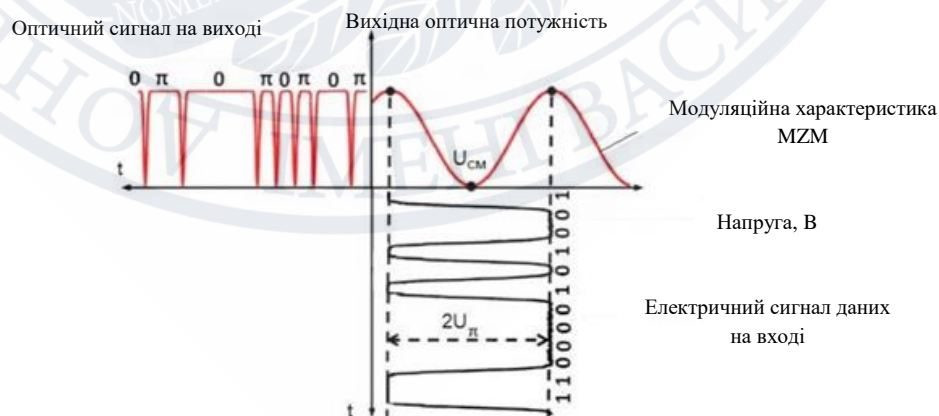


Рис. 1.8 - Формування оптичного сигналу NRZ - BPSK

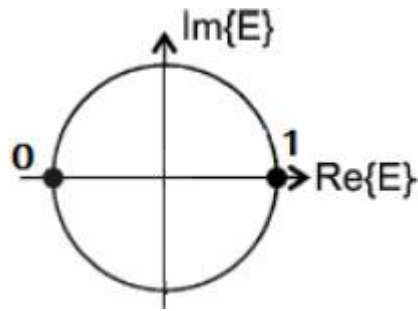


Рис. 1.9 - Кругова діаграма BPSK

Формат DPSK (Differential Phase Shift Keying) - диференціальна (роздільна) фазова маніпуляція, схожа на BPSK, в ньому інформація також міститься в різниці фаз між двома наступними імпульсами, потужність випромінювання інформації не несе.

NRZ-DPSK - Диференціальна фазова модуляція без повернення до нуля. Перш ніж модулюючий сигнал потрапляє на модулятор він кодується, що допомагає уникнути поширення помилок, які можуть виникнути при диференціальному декодуванні на приймачі. На DPSK-прекодері NRZ-кодування послідовність комбінується з таким же сигналом, але затриманим на 1 біт (one-bit delay) (рисунок 10). Після цього прекодер кодує електричний сигнал, який і буде використаний в модуляторі MZM для модуляції безперервного оптичного сигналу. Логічна "1" представляється зміною фази на  $\pi$  і не змінюється до тих пір, поки в послідовності чи не з'явиться "0". Логічний "0" представлений відсутністю зміни фази між наступними бітами в оптичному носії. Інтенсивність сигналу залишається незмінний.

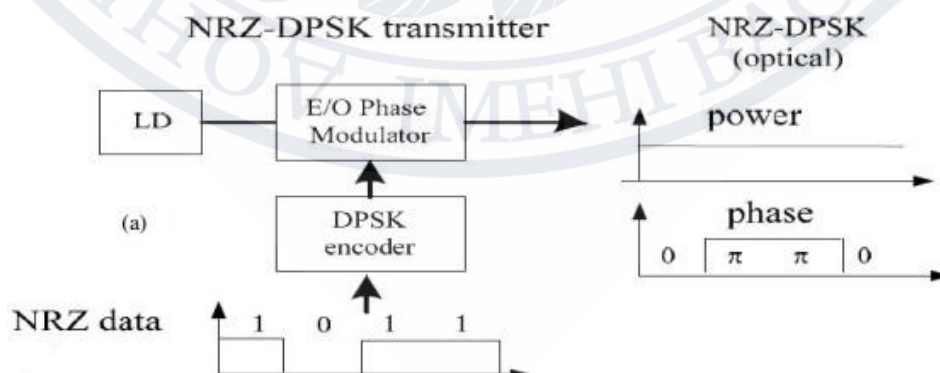


Рис. 1.10 - Схема кодування NRZ-DPSK сигналу

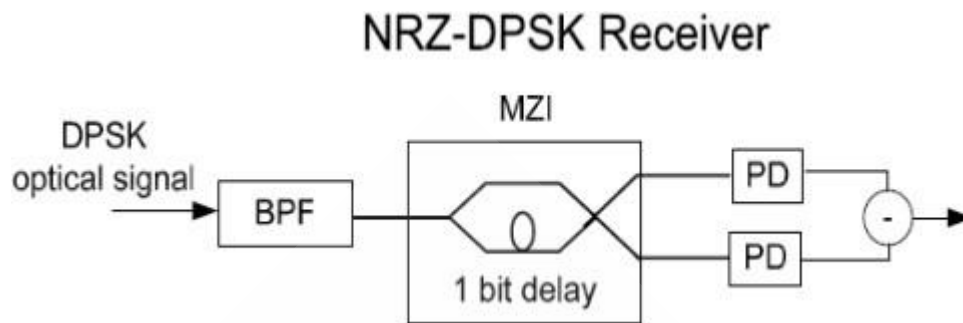


Рис 1.11 - Схема модулятора Маха-Цандера з затримкою 1 біта

На виході модулятора, принципова схема якого наведена на малюнку 11, присутня 2 виходи - конструктивний і деструктивний (constructive port or destructive port) [9]. Якщо на модулятор надходять два послідовних сімфазних сигналу - на конструктивному виході виходить високий рівень сигналу. Але якщо надходить зовсім два не сімфазних сигналу - низький рівень сигналу.

При використанні в якості приймача двох, що працюють паралельно фотодіодів дозволяє істотно знизити ймовірність помилки. Таким чином підвищується чутливість на  $\sim 3$  дБ.

### 1.2.3 Змішані амплітудно-фазові формати

Можливості амплітудних і фазових форматів не можуть задовольнити постійно зростаючу потребу в кількості інформації, що передається. На швидкостях передачі понад 40 Гбіт / с, внаслідок впливу дисперсії і чірпінг

- ефекту, дані формати стають практично марні. Їх спектральна ефективність прагне до нуля.

З даними обмеженнями добре справляються багаторівневі амплітудно-фазові формати модуляції - ASK-QPSK. Інформація кодується як амплітудою, так і фазою, таким чином даний формат успішно справляється із завданням підвищення спектральної ефективності  $\gamma$  [3].

ASK-QPSK є поєднанням бінарного ASK і 4-символьного QPSK. Якщо розглянути кругову діаграму (сузір'я) сигналу, модульованого таким чином (рис.1.12), можна побачити, що він містить 8 рівнів.

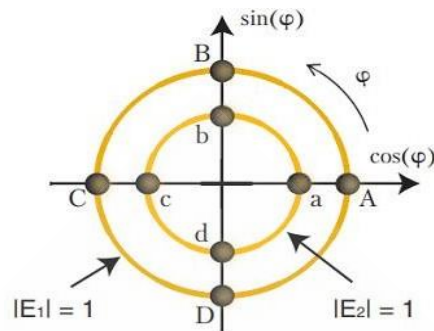


Рис.1.12 - Сузір'я 8-символьного сигналу ASK-QPSK

Один символ містить 3 біта інформації. Звідси випливає, що швидкість передачі біта виходить в 3 рази вище швидкості передачі закодованого символу. Сигнал має 2 рівні амплітуди і 4 рівня фази.

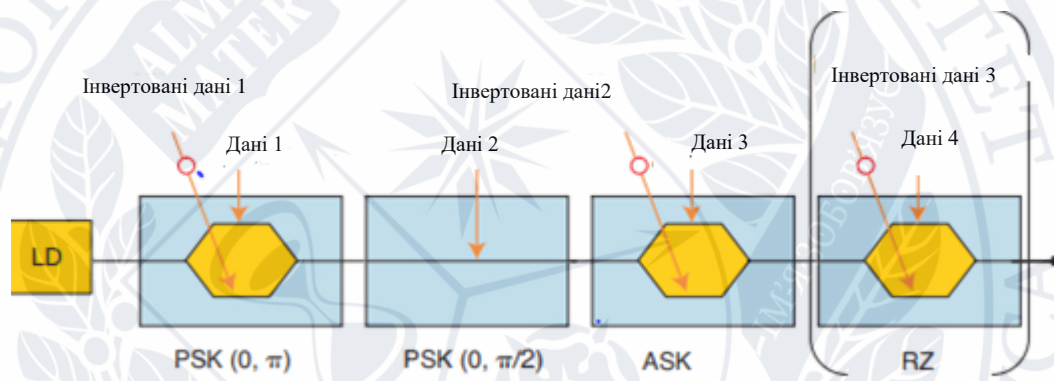


Рис. 1.13 - Пристрій передавача ASK-QPSK

На рис. 1.13 зображена принципова схема передавача ASK- QPSK модульованого сигналу. двотактний модулятор Маха -Цандера модулює фазу безперервної світлової хвилі, що виходить з лазерного діода, змушуючи її приймати значення 0 або  $\pi$ . Оптичний фазовий модулятор додає зрушення фаз 0 або  $\pi / 2$ . Таким чином, виходить чотирирівневе фазовий кодування. Наступним етапом додається NRZ або RZ амплітудне модуляція. Двотактний модулятор Маха - Цандера, що не вносить чірпа, потрібен для NRZASK-кодування, аналогічний прилад перетворює NRZ- в RZ-формат.

На кордонах біта RZ-ASK-QPSK потужність падає до нульового значення, і тому цей формат найбільш стійкий до хроматичної дисперсії.

### 1.3 Принципи побудови захищених високошвидкісних атмосферних оптичних каналів зв'язку

В даний час оптичний зв'язок - це рід електрозв'язку, передача і прийом сигналів будь-якого виду електрозв'язку в оптичному діапазоні електромагнітних хвиль. Найбільш широко використовується для зв'язку частиною оптичного діапазону, що тягнеться від рентгенівського до субміліметрового (довжини хвиль  $l$  від 0,1 до 100 мкм), є область від 0,26 до 10,6 мкм, що включає видимий ( $l = 0,4 \dots 0,75$  мкм), ближній інфрачервоний (ІК) ( $l = 0,75 \dots 2$  мкм), середній ІК ( $l = 2 \dots 20$  мкм) і ультрафіолетовий (УФ) діапазони.

Середовищем поширення оптичних сигналів можуть бути вільний простір, атмосфера, вода - для відкритих оптичних систем передачі (FSO - Free Space Optics) або оптичні хвилеводи, в якості яких найчастіше застосовуються оптичні волокна, які є складовою частиною оптичного кабелю, - для волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП, або FOTS - Fiber-Optic Transmission System).

Оптичні системи передачі інформації мають потенційно високою пропускною спроможністю, помехозащищенністю і, як наслідок, підвищеним ступенем захисту інформації, безпекою і живучістю. Важливою перевагою FSO перед радіоелектронними засобами для операторів є відсутність необхідності багатомісячної процедури отримання дозволу на використання смуг радіочастот. Разом з тим оптичні компоненти ОСП мають підвищену чутливість до впливу метеоявлень і іонізуючих випромінювань. Все це необхідно враховувати при розробці стратегії і тактики застосування оптичних каналів для забезпечення необхідної якості послуг зв'язку. Аналіз факторів, що визначають умови функціонування засобів зв'язку і переваг атмосферних оптичних каналів зв'язку (АОКС), дозволяє сформулювати основні напрямки їх впровадження.

АОКС можуть застосовуватися в наступних випадках:

- В якості абонентських ліній та ліній прив'язки;

- На всередині об'єктових і сполучних лініях;
- Для освіти сітки ліній в локальних обчислювальних мережах; як релейних вставок в ВОСП (наприклад, при подоланні водних перешкод і т. п.);
- Для зв'язку між ретрансляторами на льотно-підйомних засобах (ЛПС);
- Для зв'язку між ретрансляторами на космічних апаратах;

У свою чергу самі АОКС можна умовно розділити на канали зв'язку з умовами прямої видимості і канали зв'язку без прямої видимості. Під каналом зв'язку без прямої видимості далі буде матися на увазі канал зв'язку УФ діапазону, в якому приймач приймає тільки розсіяне атмосферою, або атмосферними аерозолями випромінювання передавача.

Спочатку оптичні канали зв'язку з прямою видимістю володіють більшим ступенем захисту інформації в порівнянні з оптичними лініями зв'язку без прямої видимості або лініями зв'язку в радіодіапазоні. Причина цього полягає в вузьконаправленому впровадженні призми для перехоплення частини сигналу, направленому безпосередньо на передавач (рис.1.14).

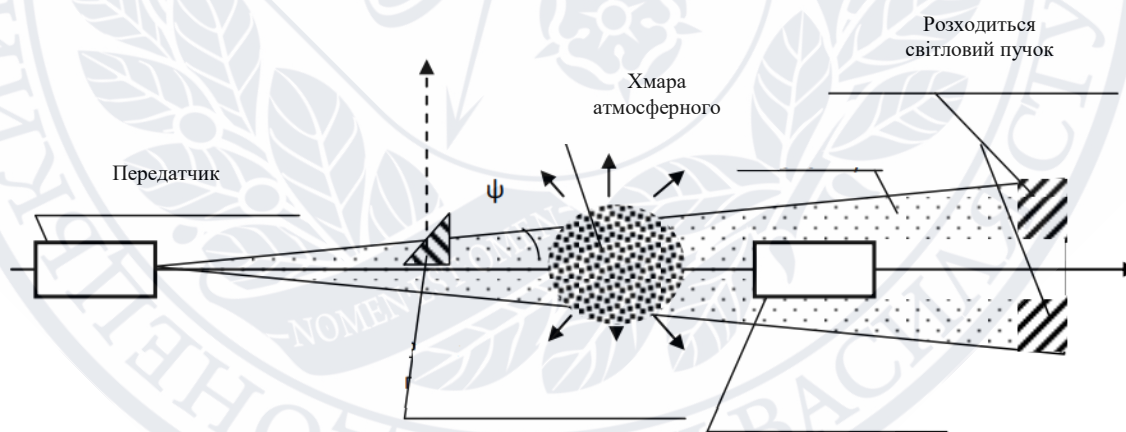


Рис. 1.1 Схема атмосферного оптичного каналу зв'язку з прямою видимістю

\* штрихуванням зображені потенційні уразливості каналу, \*\*  $\psi$  - кут розходження

Довжина хвилі випромінювача в таких системах, як правило, вибирається з урахуванням найменшого загасання сигналу і вікон прозорості атмосфери, що дозволяє використовувати невидиме око випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону без використання потужних джерел оптичного випромінювання.

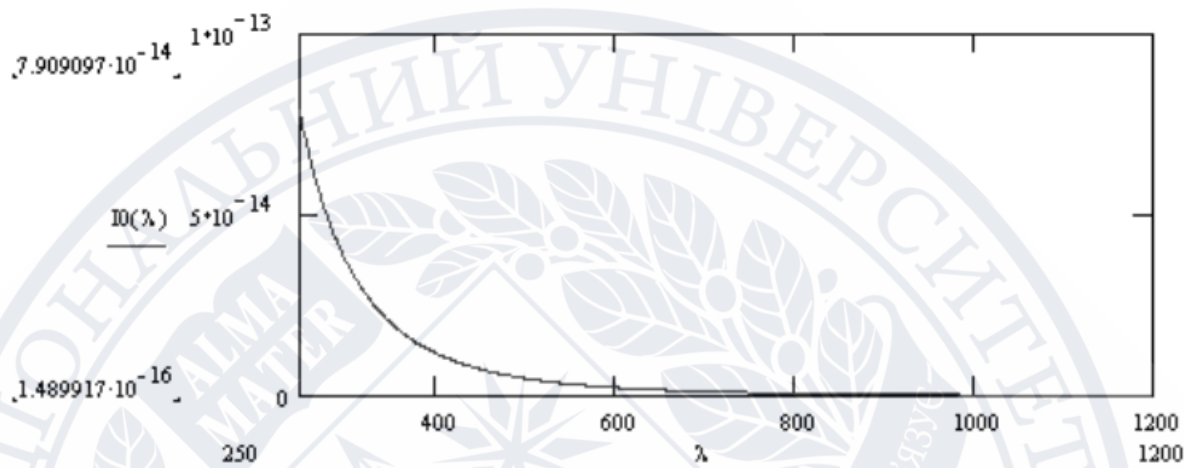


Рис. 1.15. Зміна інтенсивності розсіяного сигналу в залежності від довжини хвилі

Однак при цьому все одно зберігається можливість перехоплення сигналу.

Як показано на рис.1.1, при значній віддаленості приймача і передавача, поперечний переріз світлового пучка, як правило, перевершує геометричні розміри самого передавача, тому частина випромінювання проходить повз передавача і може бути перехоплена зловмисником.

При цьому також зберігається можливість перехоплення сигналу розсіяного на парах води, або інших аерозолях, розміщених в зоні проходження пучка, а також можливість розміщення призми, відбиває частину пучка в напрямку приймача зловмисника. У разі каналу зв'язку УФ діапазону, молекулярне розсіювання становить вже досить значну величину, яку можна приймати за допомогою високочутливих фотодіодів або фотоелектронних умножителей (ФЕУ).

З одного боку саме цей факт дозволяє створити лінію зв'язку без прямої видимості, але з іншого боку з'являється можливість перехоплення розсіяного сигналу тим же чином. З огляду на Індикатриса молекулярного розсіювання і закон Релея, можна оцінити необхідну чутливість приймача. На рис. 1.16 зображений графік зміни рівня сигналу при поворотах приймача уздовж оптичної осі передавача, зміщеного на відстані 1, 2, 3, 4, 10 метрів щодо оптичної осі в перпендикулярній площині.

Чисельні значення сигналу розраховані для випромінювача з довжиною хвилі 308 нм і потужністю 1 Вт, що працює в випромінює в безперервному режимі, і приймача з кутом захоплення  $\psi = \pi / 6$ . Таким чином, у злоумисника є реальна можливість виявити канал за допомогою високочутливих оптичних приймачів і перехопити розсіяний сигнал за такою ж схемою, як приймає сигнал справжній приймач.

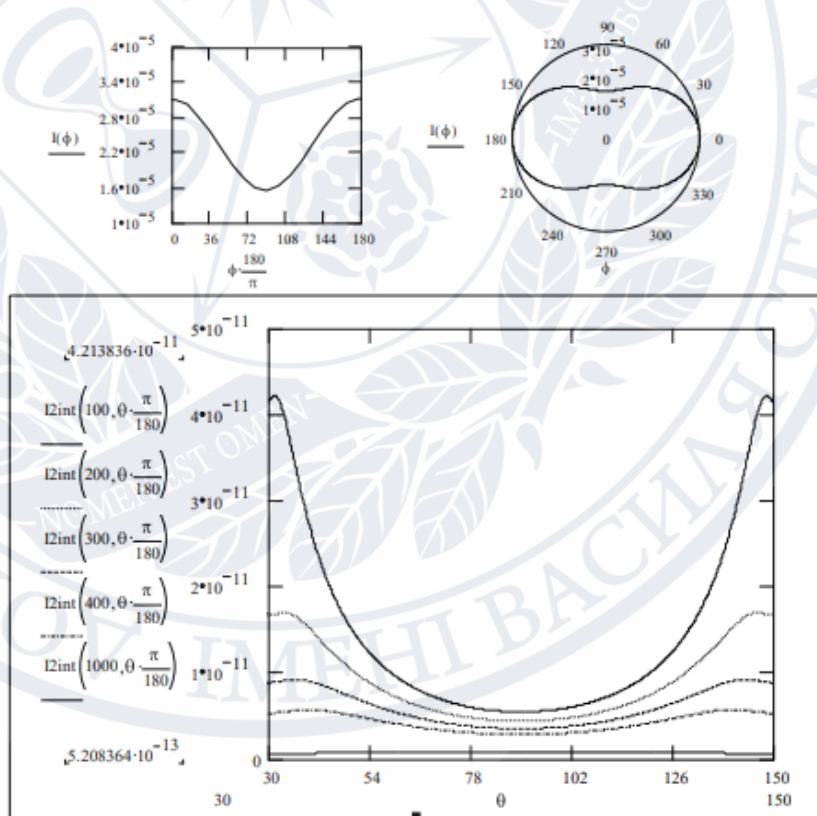


Рис. 1.16. Індикатриса молекулярного розсіювання і зміна рівня прийнятого розсіяного сигналу при поворотах приймача уздовж оптичної осі

Таким чином, для забезпечення інформаційної безпеки оптичного каналу, потрібне використання додаткових систем шифрування сигналу. У разі двобічної передачі потоків інформації по оптичних каналах відсутня необхідність в ідентифікації відправника потоку і потрібно фактично тільки шифрування даних, що передаються по каналу, за допомогою секретного ключа по протоколу симетричного шифрування.

На сьогоднішній день найбільш поширені протоколи симетричного шифрування на базі «мережі Фейштеля», такі як DES, потрійний DES, IDEA, ГОСТ 28147. Принцип роботи будь-якої мережі Фейштеля заснований на поділі вхідного блоку на кілька рівної довжини підблоків, званих гілками. Кожна гілка обробляється незалежно від іншої, після чого здійснюється циклічний зсув всіх гілок вліво. Таке перетворення виконується кілька циклів або раундів. Вважається, що оптимальне число раундів - від 8 до 32, так наприклад алгоритм DES використовує 16 раундів і довжину ключа 128 біт, алгоритм ГОСТ 28147 використовує 32 раунду і ключ довжиною 256 біт.

Відповідно можна говорити про істотне зниження смуги пропускання каналу, при додаванні систем шифрування на базі мереж Фейштеля відповідно до складності функції шифрування і кількості раундів алгоритму шифрування. Іншим способом шифрування потоку є асиметричні алгоритми шифрування, зокрема алгоритм шифрування на еліптичних кривих ECDSA. Потік в даному випадку ділиться на окремі блоки, які шифруються незалежно один від одного за певним алгоритму:

Повідомлення подається у вигляді точки на еліптичній кривій  $P_m(x, y)$ , в якості параметрів розглядається еліптична крива  $E(a, b)$  і точка  $G$  на ній. Учасник  $B$  вибирає закритий ключ  $n$  і обчислює відкритий ключ  $P = nx \cdot G$ . Щоб зашифрувати повідомлення  $P$  використовується відкритий ключ одержувача  $R$ . Другий учасник вибирає випадкове ціле число  $k$  і обчислює зашифроване повідомлення  $C$ , що є точкою на еліптичній кривій.

$$C = \{k \cdot XG, P + k \cdot XP\}$$

Щоб дешифрувати повідомлення другий учасник примножує першу координату точки на свій закритий ключ і віднімає результат з другої координати. Ніхто не знає значення  $k$ , тому хоча  $P$  і є відкритим ключем, ніхто не знає  $k \times P$ . Зловмиснику для цього доведеться обчислити  $k \times G$ , не знаючи  $G$ , що дуже складно. Одержувач не знає  $k$ , але йому висилається  $k \times G$ , помноживши його на свій закритий ключ, одержувач отримає значення, яке було додано відправником до зашифрованого повідомлення і зможе розшифрувати потік.

В даному випадку немає необхідності використання великої кількості раундів, тобто швидкість шифрування буде визначатися виключно машинної швидкістю перерахунку еліптичних функцій, тому для забезпечення широкої смуги пропускання каналу можна використовувати мультиплексування сигналу з метою паралельної обробки частин потоку одночасно. Таке рішення дозволить трохи знизити смугу пропускання каналу і забезпечити йому високу ступінь захисту інформації.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬ ВИДИМОГО СВІТЛА ДЛЯ ШИРОКОСМУГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 2.1 Використання хвиль видимого світла для широкосмугового зв'язку

Робоча група MCE-R з управління використанням спектру ініціювала Питання MCE R 238/1, який був прийнятий Асамблеєю радіозв'язку в 2015 році. Мета цього Звіту полягає в тому, щоб з'ясувати, яким чином і в якій мірі використання (ближній) зв'язку на основі хвиль видимого світла (VLC) (або, можливо, краще використовувати термін "оптична бездротовий зв'язок") здатне знизити перевантаженість радіочастотного спектру. Розробка нових технологій в поєднанні з використанням зв'язку на основі хвиль видимого світла могло б створити цікаву комбінацію і, можливо, стати одним з рішень задачі ефективного використання радіочастотного спектру.

Тут розглядаються такі теми:

- характерні особливості (технічні та експлуатаційні) застосування (ближній) VLC для широкосмугового зв'язку з точки зору використання спектру;
- переваги і недоліки застосування (ближній) VLC (до них відносяться ефективність, перешкоди, ризики для здоров'я, кібербезпека і т. п.);
- нові застосування, пов'язані з використанням хвиль видимого світла для широкосмугового зв'язку;
- перешкоди для розвитку широкосмугового зв'язку при переході до всесвітнього впровадження (ближній) VLC (наприклад, нормативні, культурні та / або економічні);
- спосіб з'єднання (ближній) VLC з існуючими системами електрозв'язку (фіксованими і рухливими).

З давніх часів до XIX століття в усіх системах зв'язку VLC людське око служив в якості приймача. Характер VLC змінився після того, як Олександр Грем Белл і Чарльз Самнер Тейнтер винайшли фотофон. Вони використовували той

факт, що в залежності від інтенсивності світла змінюється опір селену, і використовували цю властивість хімічного елемента для передачі аудіосигналів, приєднавши його до телефонного приймача. До 1950 х років ці системи зазнали безліч удосконалень, проте більшість матеріалів, що використовуються для детектування, більш чутливі до інфрачервоного випромінювання, що перешкоджає використанню видимого світла в якості середовища передачі.

З появою світловипромінювальних діодів (LED) інтерес до використання VLC відновився. Зокрема, поява світлодіодів на основі арсеніду галію (GaN) [1] і білих світловипромінювальних люмінофорів [2] призвело до створення джерел видимого світла, які можна модулювати з високими швидкостями без шкоди для їх основної ролі - освітлення. У 2004 році в Японії відбулися перші демонстрації високошвидкісного зв'язку з використанням світлодіодів і фотодіодів. Поширення стільникових телефонів з відеокамерами дозволило використовувати їх в якості приймачів VLC. Як передавачів дослідники почали використовувати РК екрани і інші відображають елементи.

Одним з перших органів стандартизації, створених для роботи над стандартом VLC, став Консорціум з питань зв'язку на основі хвиль видимого світла (VLCC) в Японії. У 2008 році Консорціум поширив стандарт зв'язку з використанням інфрачервоних хвиль Асоціації по інфрачервоної технології передачі даних (irDA) на спектр видимого світла.

При стандартному рівні освітлення в приміщеннях можливі швидкості оптичного бездротового доступу з використанням видимого світла від декількох біт в секунду до більш ніж 10 Гбіт / с. VLC здатна знизити перевантаженість смуг спектра низьких радіочастот (РЧ), оскільки в якості додаткового ресурсу для широкосмугового зв'язку можна використовувати світловий спектр.

При використанні VLC створюється спрямована лінія оптичної бездротового зв'язку. Наприклад, окрема оптична лінія може виходити від стельової освітлювальної лампи, спрямованої прямо в підлогу. Це дозволяє використовувати одну і ту ж лінію зв'язку декільком користувачам. Кілька

пристроїв VLC можуть працювати без перешкод завдяки паралельному використанню каналу з просторовим розділенням.

VLC використовує видиму частину спектру (довжина хвиль від 390 нм до 750 нм) і може забезпечити бездротовий зв'язок із застосуванням елементів освітлення та відображення інформації. {{ 1}} Оптична бездротовий зв'язок (OWC) здатна знизити перевантаженість смуг спектра низьких радіочастот (РЧ), оскільки в якості додаткового ресурсу для широкосмугового зв'язку можна використовувати світловий спектр.

Можливі послуги зв'язку на основі хвиль видимого світла можна розділити на три групи:

- зв'язок із застосуванням датчиків зображення (ISC);
- низькоскоростна зв'язок із застосуванням фотодіодного приймача (LR PC);
- високошвидкісна зв'язок із застосуванням фотодіодного приймача (HR PC) .

Для визначення низько- і високошвидкісного зв'язку встановлений поріг швидкості передачі даних, яка вимірюється на виході фізичного рівня приймача, в 1 Мбіт / с. Швидкість передачі даних менше 1 Мбіт / с вважається низькою, а більше 1 Мбіт / с - високою.

Зв'язок із застосуванням датчиків зображення

Система ISC забезпечує OWC, використовуючи джерела освітлення в якості передавача і датчики зображення - в якості приймача. Можливі області застосування включають наступне:

- послуги на основі розташування / позиціонування і навігація в приміщенні;
- внутрішньоофісні / домашні додатки (в конференц-залах, торгових центрах, музеях, виставкових залах і т. Д.);
- зв'язок з рухомими об'єктами;
- світлодіодні мітки;
- зв'язок пункту до пункту (з багатьма пунктами) / ретрансляція;

- охорона здоров'я;
- цифрові інформаційні екрани та доставка контенту на основі розташування;
- послуги передачі даних в транспортному засобі (на борту літака, в поїзді, на кораблі, в автобусі і т. Д.);  $\{\{ 1\}\}$  - підключені до мережі і автономні транспортні засоби;
- підводний / берегова зв'язок;
- інтернет речей (IoT).

Вимоги, які повинні дотримуватися при ISC: регулювання яскравості, управління енергоспоживанням, співіснування з навколишнім світом, співіснування з іншими системами освітлення, одночасна зв'язок з декількома передавачами і декількома приймачами (MIMO), джерело даних з майже точковим зображенням, ідентифікація модульованих джерел світла, повторна передача з малої додатковим навантаженням, сумісність датчиків зображення і локалізація.

Для забезпечення MIMO-зв'язку можна використовувати протокол MIMO MAC, з тим щоб приймальний пристрій з підтримкою відеокамери мало можливість обробляти прийняті дані. Система ISC повинна підтримувати зв'язок, коли джерело світла здається майже точковим, тобто висвітлює лише невелике число пікселів зображення.

Система ISC дозволяє підтримувати кілька каналів зв'язку між багатьма узгодженими або неузгодженими передавачами і багатьма узгодженими або неузгодженими приймачами.

Система ISC повинна підтримувати зв'язок з різними відеокамерами з різними значеннями частоти вибірки зображення (часу зчитування), дозволу і частоти кадрів. Зокрема, повинна підтримується як постійна, так і змінна частота кадрів. Також має підтримуватися як постійне, так і змінне оптичне дозвіл.

#### *Повільний зв'язок на основі фотодіодів*

Для низькоскоростной зв'язку на основі фотодіодів в якості передавачів використовуються джерела світла, а в якості приймачів - низькошвидкісні

фотодіоди. Основні області застосування аналогічні перерахованим для датчиків зображення.

Системи LR PC призначені в основному для використання в якості передавачів в джерелах світлових міток (світлодіодні мітки, лампи спалаху в смартфонах і т. Д.). Вони можуть служити механізмом перемикання між джерелами світла, дозволяючи користувачам зберігати безперервне підключення до мережі.

Системи LR PC можуть забезпечити механізми для розробки і надання методів координації перешкод більш високими рівнями і підтримувати механізми відновлення лінії для підтримки з'єднання в ненадійних каналах і зменшення затримок в забезпеченні з'єднання.

#### *Високошвидкісна зв'язок на основі фотодіодів*

Застосування в якості приймачів швидкодіючих фотодіодів дозволяє забезпечити високошвидкісну двонаправлену мережеву і рухливу бездротовий зв'язок. Основні області застосування цього режиму включають таке:

- внутрішньоофісні / домашні додатки (в конференц-залах, торгових центрах, музеях, виставкових залах і т. Д.);
- центри обробки даних / промислові підприємства, безпечна бездротовий зв'язок (виробничі осередки, цеху і т. Д.);
- зв'язок з рухомими об'єктами;
- бездротову транзитну передачу (транзитну передачу між малими сотами або системами спостереження, мости між ЛОМ);
- охорона здоров'я;
- послуги передачі даних в транспортному засобі (на борту літака, в поїзді, на кораблі, в автобусі і т. Д.);
- підключені до мережі і автономні транспортні засоби;
- підводний / берегову зв'язок;
- інтернет речей (IoT).

В системах HR-PC повинна підтримуватися безперервна потокова передача даних для всіх додатків з двобічної функціональністю, а також

передача коротких пакетів, де необхідна низька затримка. Слід передбачити механізми підтримки адаптивної передачі, а також зв'язку між декількома користувачами з різними потоками даних з одного і того ж джерела світла (множинний доступ).

VLC має істотно іншими характеристиками поширення в порівнянні з хвилями радіочастотного спектру. В результаті ймовірність перешкод мала, і для світлового зв'язку не потрібно управління з боку органу, що регулює використання спектра.

В IEEE 802 сказано, що операції світловий зв'язку слід класифікувати як не потребують ліцензування і не підлягають винятковому ліцензуванню. Цю точку зору підтверджує дослідження, проведене Агентством радіозв'язку Нідерландів [18]. Одним з висновків цього дослідження є наступне: "Ще залишаються проблеми, які необхідно вирішити, перш ніж перейти до промислового впровадження. Ми рекомендуємо більше зосередитися на зусиллях по стандартизації з боку МСЕ або IEEE, ніж на державне регулювання, обмеживши його головним чином вимогами, що відносяться до безпеки для здоров'я, вуглецевого сліду і комерційної конкуренції. Стандартизація підвищить не тільки сумісність промислових виробів, але і сумісність з роботи вже запровадженими технологіями". Важливе значення має дотримання відповідних місцевих правил охорони здоров'я та безпеки, що відносяться до безпеки і чутливості людського ока. Пристрої, що використовують VLC або OWC, повинні відповідати всім місцевим правилам щодо побічних радіочастотних випромінювань і не повинні створювати перешкод у смугах радіочастотного спектру.

Частоти, використовувані для оптичного зв'язку, зазвичай виражаються довжиною хвилі. Для волоконно-оптичного зв'язку через характеристик поглинання і розсіювання скла найбільш широко використовується довжина хвилі 1550 нм, однак це не відноситься до VLC нормального складу при нормальних умовах. Тут використовується діапазон частот 1,4-2,5 ТГц, або 400-700 нм.

Розширення можливостей спектра за рахунок об'єднання радіочастот, таких як 2,4 / 5/60 ГГц, з оптичною бездротовою мережею, як усередині приміщень, так і зовні: використання можливої синергії між Wi-Fi і Li-Fi, забезпечення пом'якшення впливу туману і сонячних променів в сценаріях зв'язку на відкритому повітрі, см. [9] і [10]. В [18] говориться: "Впровадження оптичної бездротового зв'язку особливо доцільно в умовах, коли багатьом користувачам в обмеженому просторі потрібен доступ до мережі з високою пропускну здатністю або коли неможливо використовувати звичайні радіотехнології або ж вони не в змозі забезпечити необхідний рівень обслуговування. Об'єднання зусиль представників потенційних груп користувачів, будівельної галузі, електрозв'язку, виробників пристроїв і постачальників технічних рішень може сприяти подальшому просуванню способів використання і вимог по стандартизації і подальших розробок і виявлення нішевих ринків, на яких впровадження OWC представляється особливо перспективним".

Системи VLC зазвичай впроваджуються з використанням (існуючої) системи світлодіодного освітлення, в рамках якої видиме світло світлодіодів модулюється по інтенсивності світіння для бездротової передачі інформації в пристрої. Такі системи освітлення зазвичай охоплюють великі площі і, як правило, забезпечують зв'язок з багатьма розташованими там пристроями. Отже, цим пристроям необхідний протокол, що дозволяє їм спільно використовувати смугу пропускання світлодіодним системи, тобто протокол управління доступом до середовища передачі (MAC). Такий протокол MAC зазвичай ділить загальну пропускну здатність світлодіодним системи на частини, і кожне активне пристрій отримує частину, конкуруючи з іншими пристроями, що має на увазі, що коли один пристрій споживає більше ресурсів, іншому дістається менше.

Робота з протоколом MAC і, отже, спільне використання ресурсів передбачає, що гарантовану пропускну здатність для кожного пристрою забезпечити важко. Встановлення зв'язку з пристроєм за допомогою протоколу MAC означає, що з'єднання встановлюється в процесі узгодження з іншими

пристроями. Цей процес вимагає часу, і результат не гарантований. Це час узгодження скорочує час готовності мережі для передачі даних і таким чином знижує пропускну здатність мережі. Крім того, для забезпечення передачі даних необхідно включити систему світлодіодного освітлення. Включене освітлення не завжди бажано, наприклад, коли кімната вже заповнена яскравим денним світлом або коли користувач віддає перевагу темряву або неяскравий світло. Отже, коли потрібно тільки зв'язок і не потрібно освітлення, система VLC може призводити до небажаного додаткового енергоспоживання.

У якості альтернативи для передачі даних можна використовувати кілька сконцентрованих світлових променів (наприклад, див. [4]). Кожен промінь обслуговує єдиний пристрій і повинен бути спрямований на нього з достатньою точністю. Таким чином, вся пропускну здатність цього променя призначається цьому єдиному пристрою.

Отже, протокол MAC не потрібно, і спільне використання пропускну здатності з іншими пристроями не провадиться. Таким чином пристрою може бути гарантована пропускну здатність, час на обробку MAC не губиться і чиста пропускну здатність мережі підвищується. Крім того, промінь світла направлений тільки на ті пристрої, яким він потрібен, і обмежений їх розташування; так що енергія променя витрачається оптимально і, отже, енергоспоживання при обміні даними мінімізовано. Переважно використовуються світлові промені з довжиною хвилі більше 1,4 мкм, оскільки це дозволяє довести потужність променя до 10 мВт без ризику для безпеки очей. Для управління ІК променем необхідні засоби управління, які спочатку визначають, чи потрібно пристрою обслуговування, потім локалізують пристрій і за допомогою цієї інформації по локалізації орієнтують промінь у потрібному напрямку, встановлюючи лінію зв'язку. Таким чином система управління ІК-променем забезпечує пропускну здатність там, де це необхідно, і, отже, працює з максимальною економією енергії.

Поширеним методом реалізації внутрісистемного управління доступним світловим спектром, яке може регулюватися відповідними технічними

стандартами для конкретних застосувань, служать моделі каналів. Деяка інформація міститься в [17].

## **2.2 Технічні та експлуатаційні характеристики ближньої широкосмугового зв'язку з використанням видимого світла**

### **2.2.1 Передавач для світлового зв'язку**

Несуча частота - несуча частота обмежена діапазоном частот видимого світла.

Режим передачі - MCE-R може запропонувати кілька режимів роботи фізичних пристроїв на основі видимого світла для низько- і високошвидкісної передачі даних, які дозволяють оптимально використовувати доступну смугу пропускання оптичного сигналу даного джерела світла для підтримки зв'язку з датчиками зображення, низькошвидкісними фотодіодами і високошвидкісними фотодіодами.

Безпека для очей і мерехтіння - модульований світло безпечний для людського ока щодо частоти та інтенсивності світла. Крім того, модульований світло не стимулює розвиток таких захворювань, як фотогеном епілепсія.

Регулювання яскравості - стандарт підтримує регулювання яскравості для всіх застосувань.

Діяльність зв'язку - дальність зв'язку залежить від безлічі зовнішніх факторів (посилення сигналу, колімація сигналу, потужність джерела і т. д.). Це аспекти реалізації, які представлені тільки в якості рекомендацій. Комітет повинен узгодити використання однієї і тієї ж моделі каналу для оцінки функціональних можливостей пропонуваніх схем.

Співіснування з навколишнім світом - стандарт враховує співіснування з навколишнім світом, який може відбиватися від поверхні передавача, і трьома класифікованими групами світлових служб зв'язку.

Співіснування з іншими світловими системами - стандарт враховує співіснування з іншими світловими системами .

Ідентифікація передавача - стандарт підтримує схему ідентифікації передавачів, коли приймач або передавач переміщається в інше місце. Приймач може відстежувати ідентифікатор передавача.

### **2.2.2 Приймач світлового зв'язку**

VLC-приймач вимірює інтенсивність видимого світла і декодує передану інформацію відповідно до вимог програми.

Приймач OWC, що входить до складу пристрою користувача, повинен бути компактним і недорогим, не вимагати трудомісткою настройки і повинен отримувати достатню оптичну потужність, щоб забезпечити високу пропускну здатність низхідного потоку. Отже, він повинен володіти великим кутом огляду і великою апертурою. Однак збільшення активної області фотоприймача зазвичай супроводжується зменшенням ширини його смуги пропускання, а оптичний фактор, що характеризує расфокусировку світлового променя відносно кута і площі, передбачає, що твір апертури на тілесний кут зменшувати не можна. Для збільшення апертури приймача можна використовувати лінзи типу "риб'яче око" або оптику, що не формує зображення об'єкта, таку як концентрує складене параболічне дзеркало, зазвичай використовується для концентрації сонячної енергії. Для збереження широкої смуги пропускання можна використовувати 2D масив швидкодіючих фотоприймачів, поєднаний з окремими електричними предусилителями і каскадом підсумовування [11]. Як варіант, функцію збору світла можна відокремити від функції світлового детектування, оптимізувавши ці функції окремо.

Широкий поверхнево-гратчастий з'єднувач (SGC), що збирає падаючий світло, інтегрований з хвилеводом, що веде до швидкодіючому фотодіоду, здатний підтримувати прийом ООК зі швидкістю в кілька гігабіт в секунду [12]. Масив SGC і вбудований інтегратор дозволяють ще більше збільшити

апертуру без шкоди для пропускної здатності. Обмеження, пов'язане з оптичним фактором, можна зняти за допомогою □ перетворення прийнятого світла і його укладення в световодний пластинчастий хвилевід з присадкою флуорофора [13].

Зокрема, для OWC з керованим променем необхідно забезпечити локалізацію і відстеження для користувача пристроїв. Для цього можна використовувати, наприклад, технології Wi Fi, формування мінімуму діаграми спрямованості антени при 60 ГГц [14], контрольовані недорогий камерою ІК світлодіодні мітки на пристрої користувача [15] і т. Д.

Оптична бездротовий зв'язок особливо підходить для умов, коли радіозв'язок є (або буде) менш придатною через поєднання ряду факторів:

- дефіциту спектра;
- вимоги дуже високої пропускної здатності;
- небажання використовувати радіотехнологію;
- законодавчих обмежень;
- потреби в бездротовій передачі, обмеженою простором будівлі.

Оптична зв'язок може бути застосована до різних систем. Те, як вона може бути реалізована в цих системах, залежить від необхідного діапазону передачі. Залежно від цих діапазонів застосування OWC можна розділити на п'ять категорій.

Зверх ближній бездротовий зв'язок - може бути застосована для зв'язку між мікросхемами, коли OWC може здійснюватися за допомогою технології оптичного зв'язку у вільному просторі (Free Space-Optical Interconnect (FSOI)). Вона забезпечує пряме з'єднання між мікросхемами за допомогою світлового променя. Це застосування може вирішити деякі проблеми сучасних провідних електричних з'єднань, таких як швидкість передачі даних, електромагнітні перешкоди і енергоспоживання.

- Ближня бездротовий зв'язок зазвичай застосовується в бездротових мережах в межах людського тіла (WBAN) і персональних бездротових мережах (WPAN). Вона призначена для збору і передачі даних в безпосередній близькості до тіла людини. У сфері охорони здоров'я розробляються нові системи з

використанням OWC, звані оптичними системами WBAN (OWBAN), оскільки вони здатні забезпечити безпечну і стійкість перед перешкодами альтернативу WBAN-систем, які працюють в радіодіапазоні.

Бездротовий зв'язок середнього радіусу дії - це зв'язок в діапазоні, використовуваному бездротовими локальними мережами (WLAN). Існуючі системи OWC цієї категорії можна поділити на VLC і системи зв'язку на основі інфрачервоного випромінювання з регулюванням променя. VLC, як правило, ґрунтується на існуючій системі світлодіодного освітлення і використовує ті ж світлодіоди для модуляції даних. Таким чином система VLC охоплює широку область, в якій кілька користувальницьких терміналів спільно використовують пропускну здатність із застосуванням відповідного протоколу MAC. Зв'язок в інфрачервоному діапазоні з регульованим променем забезпечує пряме з'єднання між пристроями. Призначені для користувача термінали, що знаходяться в приміщенні, можуть незалежно обслуговуватися декількома променями, так що кожен термінал отримує гарантовану пропускну здатність, що не конфліктує з іншими терміналами. Такі системи можуть замінити або розвантажити існуючі системи (наприклад, Wi Fi), оскільки вони працюють в більш високочастотній області спектру, ніж радіосистеми WLAN. Інша область застосування бездротового зв'язку середнього радіусу дії - зв'язок всередині транспортних засобів і зв'язок транспортних засобів з інфраструктурою.

Дальня бездротовий зв'язок здатна діяти на відстанях від 300 м до приблизно 10 км. Наприклад, підприємства і міські установи застосовують її для зв'язку між будівлями і в системах міських бездротових мереж. Для OWC застосовується система оптичного зв'язку у вільному просторі (FSO), яка являє собою передавач і приймач, з'єднані між собою прямим променем.

Наддалековий бездротовий зв'язок може діяти на відстані близько 84 000 км, що робить її ідеальним засобом повітряної і космічного зв'язку. Для неї застосовується система, подібна FSO, тільки використовує дуже вузький світловий промінь і вакуумний канал для передачі і прийому інформації. Ця система називається оптичною бездротовою супутниковою мережею FSO (OWSN).

FSO). Було витрачено багато зусиль на прогнозування конкретних застосувань технологій доступу. Однак насправді дуже важко передбачити, які програми і пристрої стануть найбільш важливими через кілька років. Успіх таких речей, як інтернет, смартфони, планшети і навігаційні системи, які не був передбачений до тих пір, поки не став очевидним.

Успіх може залежати від всесвітнього успіху поєднання пристроїв / операційних систем / інфраструктури фіксованого та рухомого зв'язку / екосистем існуючих додатків.

### **2.2.3 Поточна діяльність по стандартизації**

У 2011 році робоча група IEEE 802.15 випустила стандарт IEEE 802.15.7-2011 "Ближня бездротова оптична зв'язок з використанням видимого світла" [3]. У грудні 2014 року був затверджений і в даний час здійснюється проект щодо перегляду стандарту IEEE 802.15.7 2011 "Оптична бездротовий зв'язок (OWC)", в який включені світлодіодні ідентифікатори, зв'язок з використанням оптичної камери (ОСС) і LiFi [6]. Група припускає розробити стандарт для прозорих оптичних середовищ передачі з використанням світлових хвиль довжиною від 10 000 нм до 190 нм. У березні 2017 року група розділилася. Група 802.15.7m продовжить роботу над стандартом зв'язку з використанням оптичних камер, а цільова група IEEE 802.15.13 займеться проектом "Многогігабітна бездротова оптична зв'язок (OWC)" з використанням високошвидкісних фотодіодів [7]. Крім того, тематична група IECSE 802.15 "Допоміжні технології для автомобілів" (Vehicular Assistant Technology (VAT)) розглядає можливості зв'язку VLC.

В кінці 2016 року робоча група IEEE 802.11 ініціювала створення тематичної групи (TIG) по світловий зв'язку [ 8] для визначення технічних і економічних можливостей використання світла в якості середовища передачі для бездротового зв'язку. У 2018 році затверджено заявка групи на затвердження проекту. За розробку відноситься до стандарту документа відповідає цільова група 802.11 bb.

15 я Дослідницька комісія MCE-T відповідає в MCE-T за розробку стандартів для інфраструктури оптичних транспортних мереж, мереж доступу, домашніх мереж і мереж енергосистем загального користування, систем, обладнання, оптичних волокон і кабелів. Це включає пов'язані з ними прокладку, технічне обслуговування, управління, випробування, вимірювальне обладнання і методи вимірювань, а також технології площини управління, що дозволяють здійснювати розвиток в напрямку інтелектуальних транспортних мереж, включаючи підтримку додатків "розумних" електромереж. Група відповідає за стандарт G.vlc "Високошвидкісний приймач видимого світла для приміщень - специфікація системної архітектури, фізичного рівня і рівня каналу передачі даних".

#### **2.2.4 Питання безпеки очей і нормативні документи**

Найбільш вразливою частиною людського ока є сітківка, розташована в задній частині ока, яка здійснює фактичний процес зору. Видиме світло (очевидно) досягає сітківки, і для того щоб не завдавати їй (постійний) шкоди, потужність впливу повинна залишатися обмеженою. У разі VLC світлодіодні системи призначені для освітлення і звичайно випромінюють розходяться конуси світла, не завдаючи сітківці шкоди в нормальних умовах. В оптичного зв'язку з регульованим променем промені видимого світла (подібні променям лазерної указки) можуть завдавати шкоди; їх потужність повинна залишатися нижче часткою мілівата. Однак при використанні інфрачервоних променів в силу фізіології людського ока, перш ніж промінь досягає сітківки, його інтенсивність значно послаблюється (рогівкою, кришталиком, склоподібним тілом). Отже, до перевищення межі безпеки для очей допустимі набагато вищі потужності; при довжині хвилі понад 1400 нм допустимі потужності несучої частоти до 10 мВт.

Стандарти безпеки для очей наведені в нормативних документах IEC 60825 та ANSI Z136. У дослідженні [18] говориться: "Для оптичних бездротових мереж найбільш важливим питанням є захист очей і шкіри. Хоча при застосуванні

оптичних бездротових мереж широким колом осіб їх можна зробити безпечними практично в будь-яких умовах, рекомендується ретельніше вивчити питання безпеки для тих, хто працює в безпосередній близькості від інтенсивних джерел світла, займаючись їх установкою і обслуговуванням".

### **2.2.5 Впровадження та розгортання**

Як і у всіх системах зв'язку, в даному випадку необхідно забезпечити як функціональність систем, так і захист призначених для користувача даних. В [18] сказано: "Впровадженню і розгортання OWC сприяє чітке уявлення про взаємодію з існуючими або новими популярними стандартами бездротового зв'язку, такими як Wi Fi, наприклад, в області аутентифікації, шифрування і безшовного роумінгу між точками доступу. Там, де це можливо, рекомендується заохочувати використання вже існуючих рішень, наприклад, щодо аутентифікації і шифрування сигналів.

Таке повторне використання може полегшити розробку механізмів взаємодії (наприклад, передачі обслуговування) між OWC і технологіями радіозв'язку. Ці нові розробки з відносно невеликою базою користувачів також допоможуть отримати користь від поліпшення рішень з більш широкої користувацької базою".

### **2.2.6 Промисловість і виробництво**

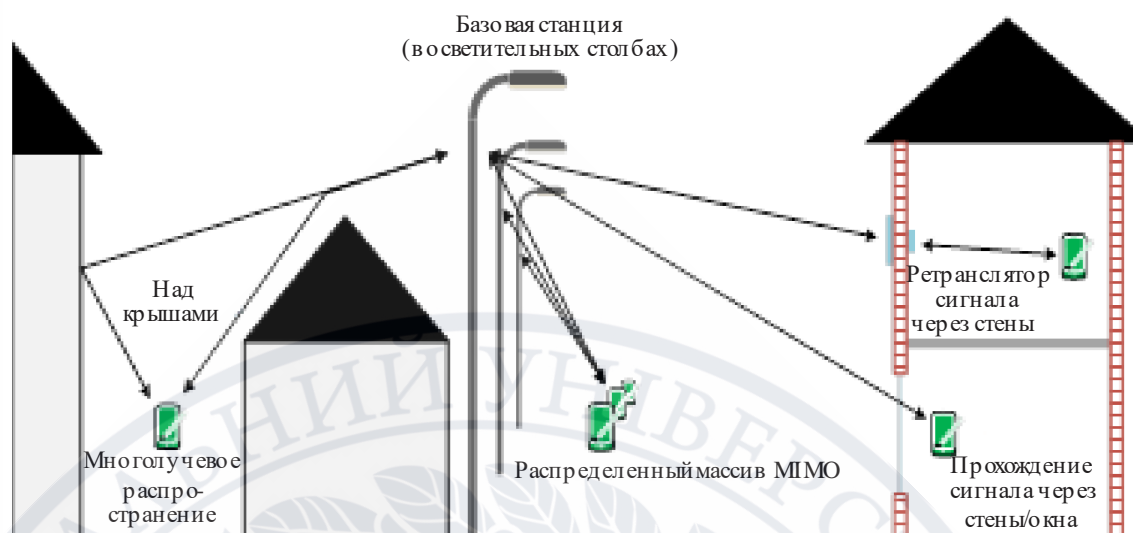
У сценаріях промислового освоєння і виробництва в даний час використовуються в основному провідні рішення, що пов'язано з високими вимогами до надійності, безпеки і малій затримці. Промислові протоколи (ProfiNet) надають клієнтам регулярний доступ до мережі і забезпечують передачу даних з короткою затримкою протягом певного періоду часу. Промислова бездротовий зв'язок також приваблива завдяки простоті

розгортання і гнучкості. Рішення на основі VLC можуть забезпечити переваги в порівнянні з рішеннями на основі радіозв'язку в наступних областях.

1) Придатність до щільного розгортання. Виробництво відноситься до так званих сценаріями щільного розгортання бездротового зв'язку з великою кількістю одночасно підтримуваних каналів, які гарантують вищезазначене високу якість обслуговування. VLC може забезпечувати безпечну бездротовий зв'язок з короткою затримкою, оскільки має чітко обмежені умови поширення в надзвичайно малих стільникових осередках. Крім того, VLC можна використовувати на додаток до радіосистемам для розвантаження трафіку даних.

2) Співіснування з іншими радіо службами. Однією з серйозних проблем промислових бездротових мереж є співіснування з іншими службами. Для використання інших радіочастотних каналів, що працюють в тому ж спектрі, потрібні такі протоколи, як прослуховування перед передачею, які загрожують непередбачуваними затримками і не відповідають вимогам малого часу очікування. Одним із способів вирішення цих проблем є отримання виділеного спектра для промислової бездротового зв'язку. Іншим способом полегшити поточну ситуацію може стати VLC. Відзначимо, що навколишній світ мало впливає на VLC, що пояснюється нижче в розділі "Технічна здійсненність VLC".

3) Стійкість до глушіння. Порушники, діючи з великих відстаней за межами підприємства, за допомогою простих мобільних пристроїв можуть легко заглушити використовуваний радіочастотний спектр. Очевидно, що застосування бездротових радіоз'єднань замість кабелів може в цілому послабити безпеку експлуатації підключених виробничих об'єктів. Крім того, радіозв'язку може шкодити присутність сильних електромагнітних перешкод, наприклад, на сталеливарному заводі, атомної електростанції або енергетичній установці. Зі свого боку VLC нейтральна до РЧ радіо глушення і ЕМП, так як поширення сигналу обмежена межами установки.



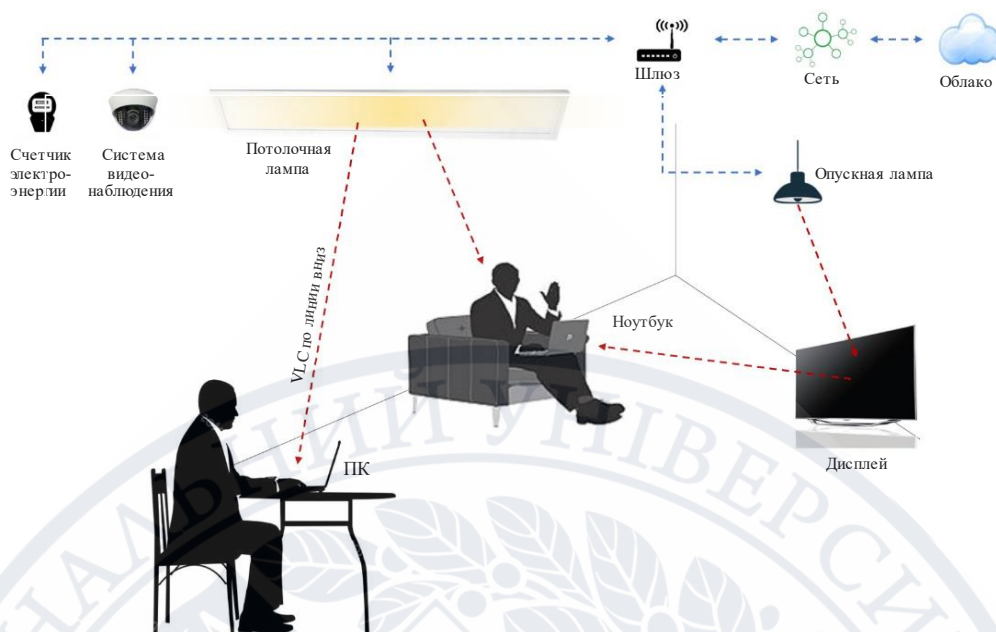
Report SM.2422-01

### "Розумний" будинок

В даний час поняття "розумний" будинок включає безліч видів побутової техніки, систему управління енергоспоживанням, систему спостереження за здоров'ям, передові мультимедійні послуги та систему відеоспостереження і безпеки, з'єднані за допомогою складної системи дротових і бездротових з'єднань. Підключення пристрою "розумного" будинку можуть працювати інтерактивно і незалежно один від одного, і їх можливості підвищують якість життя в домогосподарстві самими різними способами, такими як автоматизація виконання рутинних завдань, надання медичних послуг, раціоналізація споживання енергії, підвищення індивідуальної ефективності, підвищення безпеки житла, а також розваги і т. д.

в "розумному" будинку використовується підхід, який передбачає організацію локальної бездротової мережі, і він заснований на таких стандартах, як локальна мережа (ЛОМ), мережа в межах людського тіла (BAN) або персональна мережа (PAN), які представляють собою мережі малого розміру, що діють на відстань від 12 до 100 м, такі як Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, Z Wave і т. д.

VLC можна використовувати для підключення пристроїв, передають конфіденційну інформацію, таких як камери відеоспостереження, дитячі монітори і т. д., і внаслідок цього вона може являти собою більш приватну і безпечну мережу [19].

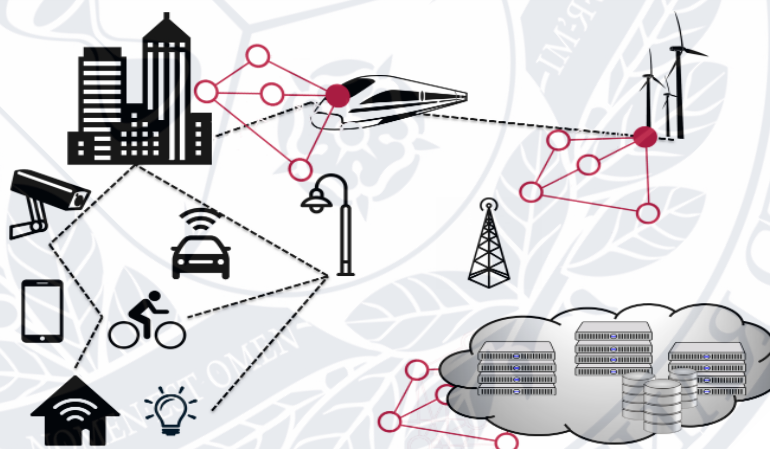


Report SM.2422-02

### *Інтелектуальна карта міста (геном міста)*

Міста можна розглядати як складні розвиваються живі організми. Справа не тільки в людях, які живуть в місті і являють собою складні "системи" самі по собі. Саме життя, здається, стає все складніше в силу руйнівних і експоненціально наростаючих змін. Важливу роль тут відіграють технічні розробки, особливо в сфері ІКТ. Однак не факт, що при цьому поліпшується якість життя, що становить їхню головну мету. Тут існують величезні можливості, але можуть виникнути і не менш зловісні загрози. Для досягнення дійсно якісного прогресу необхідний комплексний системний підхід. Інкрементального, лінійного мислення і проектування недостатньо. Перший крок полягає в розумінні відмінності між апаратними засобами і програмним забезпеченням міста, як між тілом і інтелектом людини або живого організму, генотипом і фенотипом або житлом і будинком. Перші частини відчутні, другі - ні. Загалом випадку перше відноситься до інфраструктури, а друге - до супраструктур. Очевидно, що інфраструктура і супраструктура взаємозалежні, і їх не можна розглядати окремо. Це складне завдання, оскільки інфраструктура належить до сфери технічних наук, а знання про супраструктуру - головним чином до семіотики.

В області інфраструктури мережі ІКТ набувають все більш важливе значення. Саме тут можуть бути корисні центри бездротової і фотонної зв'язку. Передбачається, що в мережах оптичної, фотонної зв'язку основними компонентами стануть волоконно-оптичні та фотонні інтегральні схеми (ФОС) нового покоління. Звичайно, це відноситься до базових і міських мереж. Бездротові технології зроблять ближче точки доступу. У майбутньому можна очікувати переходу від фіксованого зв'язку до бездротової на периферії мережі. Для цієї мети добре підходять елементи обладнання вулиць, а точніше вуличні ліхтарі. Відзначимо, що тільки в Нідерландах близько 4 млн. Вуличних ліхтарів. Вони можуть скласти мережу оптичних осередків. Від вуличних ліхтарів трафік може передаватися в напрямку будинку і назад з використанням ретрансляторів в багатофункціональних вікнах нового покоління всіх 7,5 млн. Житлових будинків і 300 000 нежитлових будівель. В середині будинків і будівель технологією майбутнього стане VLC.



Report SM.2422-03

При розгляді будинків і будівель і зв'язків між ними за допомогою інших фізичних інфраструктур в громадському просторі стає очевидним, що досвід вивчення забудованої навколишнього середовища може внести свій вклад. Вельми оригінальною є ідея, що організацію житлового і комунального господарства та громадських інфраструктур та супраструктур можна розглядати як розвиток живих організмів зі своїм тілом і розумом і вивчати їх генотип і фенотип. Дійсно, якщо сьогодні геном людини можна визначити протягом

години менше ніж за сотню євро, то чому це неможливо зробити для цих набагато більш простих фізичних конструкцій? І які при цьому відкриваються нові можливості! Потім можна точно обчислити макропараметри, такі як енергетичні показники і показники безпеки і стійкості. Тоді можна буде розробляти і оцінювати сценарії їх поліпшення.

Що стосується даних, які можна отримувати або передавати в будинку, будівлі і об'єкти громадської інфраструктури, то ясно, що вирішальну роль може зіграти центр наукового дослідження цих даних. Отримання з вихідних даних інформації, знань і нової мудрості дозволить створити незліченну кількість додатків як для інфраструктур, так і для супраструктур, мереж і служб, житлових будинків та нежитлових будівель. Вони спочатку повинні проектуватися з урахуванням вимог безпеки. Аналогічно можна провести дослідження методів моделювання складних систем, наприклад, з використанням теорії графічного і матричного аналізу складних адаптивних систем.

Вищесказане істотно наближає рішення задачі моделювання цілком реалістичних сценаріїв розвитку "розумних" міст завдяки узагальненому системному підходу.  $\{\{1\}\}$  щодо потреб користувачів і соціально-економічних аспектів необхідні додаткові дослідження, оскільки області застосування тут дуже різноманітні і не повністю вивчені. В [18] говориться: "Також рекомендується стимулювати тісні контакти між (національними) промисловими НДДКР і академічними дослідженнями, оскільки (все ще) має місце широке розмаїття досліджуваних технологій OWC. Раннє виявлення серед них потенційно виграшних технологій, а також сприяння конвергенції та взаємодії будуть сприяти промисловій розробці і прискоренню комерційного впровадження".

Також потрібна робота і дослідження з питань фактичного розміщення обладнання VLC всередині будівель і офісів, як зазначено в [18]: "OWC не замінює, а доповнює використання інших видів передачі, наприклад Wi-Fi для інфраструктури зв'язку всередині будівлі, в якій OWC може розвантажувати Wi-Fi від додатків з високою потребою в пропускну здатності. з огляду на такого

взаємодії з існуючою технологією Wi-Fi ми рекомендуємо проектувати і будувати офіси, громадські будівлі і житлові будинки з урахуванням потенціалу OWC, зокрема при створенні фіксованою (кабельною) інфраструктури, в якій передбачено досить точок доступу і транзитних каналів OWC. Поєднання транспортування даних з харчуванням оптичних бездротових точок доступу по кабелях Ethernet (Power over Ethernet) стає все більш перспективним, тому рекомендується враховувати його в планах будівництва".

### **2.2.7 Підключення до мережі та автономні транспортні засоби**

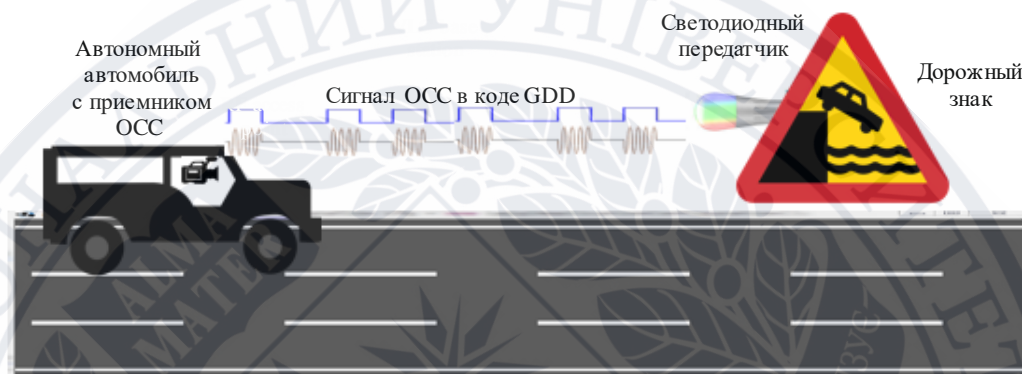
VLC може застосовуватися для підключених до мережі автомобілів і автономних транспортних засобів. Зазвичай водії в ході руху повинні стежити за дорожніми знаками. Автономні транспортні засоби розпізнають дорожні знаки так само, як програми розпізнавання образів, але іноді вони можуть помилятися.

Одним із прикладів технології для підключених до мережі і автономних транспортних засобів є розпізнавання дорожніх знаків з використанням VLC і Словника графічних даних (GDD). GDD розроблений з метою створення спільної платформи для передачі інформації про існуючі дорожні знаки і піктограмах в коді ISO TC204. Система кодування розроблена таким чином, що не залежить від національної мови, так що її інтерпретовані дані не залежать від мовних і регіональних відмінностей. Словник призначений для підтримки обміну повідомленнями системи інтелектуального транспорту. Знадобився спеціальний підхід для класифікації великого набору існуючих дорожніх знаків і піктограм по функціональних групах - це зроблено за допомогою інформаційних елементів.

Як передавача пропонується розроблений кодер (генератор) даних GDD. Кодовані дані можна передавати з використанням передавачів двох типів, один з них - це просто світлодіодний передавач сигналу, що встановлюється разом з існуючим дорожнім знаком, який передає кодовані дані, що відповідають певному дорожньому знаку. Перевагою цього простого передавача є його

застосовність до всіх існуючих дорожніх знаків. Єдина відмінність кожного знака - унікальний передається їм код.

Приймач GDD складається з камери з датчиком зображення і блоку декодування даних. Зображення зчитуються датчиком зображення, розташованим за об'єктивом оптичної камери, а отримані дані передаються системою зв'язку оптичної камери [20].



Report SM.2422-05

Недавні розробки в області OWC, діяльність по стандартизації і аналіз існуючих освітлювальних приладів показують, що VLC є зрілу технологію, яка має безліч переваг з точки зору розвантаження радіочастотного спектру.

Можна зробити висновок, що управління пристроями VLC і спектром VLC не є завданням нормативного регулювання, а має бути організовано за допомогою технічних стандартів. Може бути корисним тісна співпраця органів стандартизації, що займаються VLC з тими, які займаються традиційними додатками на основі радіо технологій.

### **2.3 Система моніторингу персоналу і вантажів на базі само організованих бездротовій мережі**

Система моніторингу персоналу і вантажів на базі само організованої бездротової мережі, що характеризується тим, що містить об'єднані єдиною мережею широкосмугового радіозв'язку комплект базовий стаціонарний, що включає в себе, щонайменше, один блок точки радіо доступу, що дозволяє

контролювати об'єкти моніторингу всередині зони контролю і передавати відповідну інформацію в блок обробки і відображення інформації, блок обробки і відображення інформації, виконаний на основі комп'ютера, що забезпечує прийом і обробку сигналів, а також графічне відображення стану об'єктів моніторингу в реальному масштабі часу, причому блок обробки і відображення інформації з'єднаний з блоком точки радіо доступу за допомогою проводового з'єднання Ethernet, щонайменше, один блок контролю, що забезпечує передачу інформації про координати і / або трасі руху об'єктів моніторингу і ретрансляцію відеоінформації при відсутності прямої радіозв'язку, по меншій мірі, один об'єктовий блок відео контролю, що містить бездротову IP відеокамеру, що забезпечує передачу відеоінформації про перетин зони контролю; щонайменше, один мобільний комплект модулів контрольних, виконаних у вигляді персональних блоків (портативних приймачів радіосигналів), також в блок контролю додатково введено розширений бездротовий маршрутизатор для забезпечення гарантованого радіо покриття в зоні контролю і зв'язку між комплектом модулів контрольних і блоком точки радіо доступу, щонайменше, один комплект джерел живлення електронних компонентів, що входять до складу системи, при цьому кожен пристрій системи моніторингу (блок точки радіо доступу, блок контролю, блок відео контролю, модуль контрольний) містить радіо модем, що забезпечує миттєву організацію широкосмугових мереж в зоні контролю і значну пропускну здатність бездротової мережі системи моніторингу.

2. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що в якості радіомодема використовують бездротову карту доступу WMC.

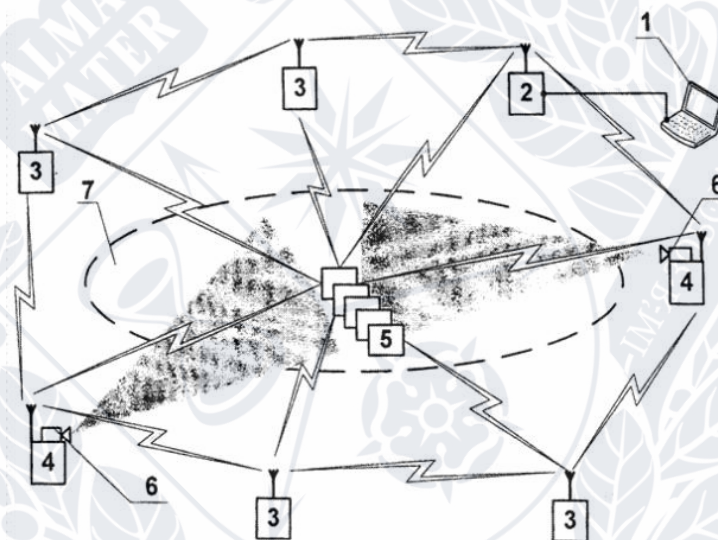
3. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що в блок обробки і відображення інформації додатково встановлено мобільний контролер MiSC, здійснює функцію стикування між бездротового і дротового мережею.

4. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що блок обробки і відображення інформації виконаний з можливістю збереження, архівування інформації про стан об'єктів моніторингу із зазначенням номера об'єкту

моніторингу його координат, дати і часу події в журналі подій у вигляді logфайла.

5. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що блок обробки і відображення інформації виконаний з можливістю графічного відображення стану об'єктів на двомірному плані місцевості (будівлі), видачі звукового сигналу тривоги і тривожного повідомлення при несанкціонованих діях.

6. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що блок обробки і відображення інформації виконаний з можливістю циклічної перевірки стану об'єктів моніторингу з задається періодичністю і виявлення / сигналізації тривожну ситуацію.



Пропонована корисна модель відноситься до області охоронної сигналізації, контролю спостереження, управління рухомими і стаціонарними об'єктами, в зокрема до радіотехнічних пристроїв виклику і системам виклику з використанням ближнього поля випромінювання, заснована на використанні радіочастотних модемів, обладнання передачі відеосигналу за допомогою само організованого інформаційного обміну (з використанням MESH - технології).

Корисна модель може бути використана для охорони периметрів об'єктів, моніторингу персоналу і вантажів в контрольованій зоні на стаціонарних об'єктах, а також може бути задіяна при проведенні пошукових та рятувальних робіт в важкодоступних областях, в зонах надзвичайних ситуацій (НС),

інцидентів, терористичних атак і в штатних режимах роботи правоохоронних органів і інших силових структур.

Постійно зростаючі вимоги до оперативності і точності реагування в екстремальних ситуаціях і повсякденної роботи висувають нові завдання по технічному обладнанню об'єктів охорони та оснащення персоналу. З'являється необхідність передачі великих обсягів цифрової інформації з місця аварії або НС.

Вузькополосні системи передачі цифрової інформації, забезпечуючи рішення основних завдань з визначення місця розташування мобільних об'єктів, не можуть повністю впоратися з передачею великих обсягів інформації, що часто необхідно в екстремальних ситуаціях, а тому не можуть надати можливість широкосмужової передачі там, де вона найбільш важлива: в русі, на місці події або в зоні екстремальної ситуації. Такі вимоги повністю задовольняє система широкосмужової передачі цифрової інформації технології MEA MESH застосована в корисної моделі.

Відома електронна система охорони і дистанційного контролю віддалених об'єктів по бездротових мережах, використовує існуючі радіотелефонні мережі, мережі мобільного зв'язку GSM і супутникову радіонавігаційну систему позиціонування GPS / ГЛОНАСС, містить працюють спільно блок обробки сигналу тривоги і блок-аналізатор тривоги з пов'язаними з ним датчиками, розташований на стаціонарному або мобільному об'єкті охорони.

Блок-аналізатор тривоги виконує функцію циклічної перевірки стану об'єкта охорони з задається періодичністю і виявлення / сигналізації тривожну ситуацію, включає додатково блок звукової обробки і навігаційний GPS / ГЛОНАСС-приймач з антеною. Блок обробки сигналу тривоги виконаний у вигляді персонального блоку постійно знаходиться в розпорядженні власника об'єкта охорони, включає блок звукової обробки, ЖК індикатор і сенсорний екран, виконаний з можливістю проведення через блок-аналізатор тривоги дистанційного автоматичного моніторингу об'єкту, що охороняється в режимі «точка точка», контролю своєчасного надходження періодичних дзвінків від

блока аналізатора тривоги з підтвердженням безпечного стану об'єкту, що охороняється.

Блок-аналізатор тривоги проводить сповіщення абонентів про спрацювання датчиків охоронного контуру, перехід на автономне живлення, критичному розряді резервної батареї, вихід за межі допустимого температурного діапазону, виході за задані автоматично або вручну кордону, у вигляді голосового та / або SMS повідомлення на телефони з заздалегідь сформованого списку (див. патент RU №83643, МПК G08B 25/10, H04M 11/00, 10.06.2009).

Недоліками даної електронної системи охорони є:

- відсутність пульта спостереження (персонального комп'ютера) для відображення інформації та / або відеоінформації про стан об'єкта охорони;
- відсутність визначення місця розташування об'єктів моніторингу в реальному масштабі часу;
- низька оперативність доставки SMS, при можливій завантаженні сервера коротких повідомлень і в моменти пікового навантаження затримка оповіщення може скласти кількох годин.

Найбільш близькою до пропонованої є система моніторингу (патент РФ №2295775 МПК G08B 25/00 24.02.2005), що містить мережевий і об'єктовий маршрутизатори, забезпечені модулями створення віртуальної приватної мережі та контролерами зв'язку. При цьому забезпечується робота через канали зв'язку, виконані у вигляді проводового, волоконно-оптичного, супутникового, стільникового або радіоканалів зв'язку. Передбачено підключення через канали зв'язку до мережі Інтернет.

Система виконана з можливістю передачі даних від об'єктових блоків до пульта спостереження за допомогою пакетної передачі даних і працює з стільникового рухомого зв'язку. Є пристрої підключення відеокамер, акустичних і дактилоскопічних приладів, приладів для перетворення інформації в цифрові файли і передачі її на пульт спостереження. Система містить групу додаткових пультів спостереження, з'єднаних між собою локальною мережею зв'язку.

Об'єктові блоки системи мають джерела безперебійного харчування з вбудованими акумуляторами.

Недоліками даної системи моніторингу є:

- несанкціонований доступ до ресурсів пульта спостереження з боку каналу зв'язку;
- перехоплення даних від об'єктових блоків до пульта спостереження, які передаються за допомогою пакетної передачі даних (GPRS);
- перехоплення даних по провідному каналу зв'язку;
- використання волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), зокрема дорожнеча інтерфейсного обладнання ВОЛЗ;
- складність експлуатації та ремонту обладнання входить до складу системи;
- висока вартість обладнання входить до складу системи. Завданням корисної моделі є:
  - організація зон контролю;
  - миттєва організація широкосмугових мереж безпосередньо в зоні контролю;
  - можливість безперервного визначення місця розташування об'єктів моніторингу в реальному масштабі часу;
  - відстеження і контроль переміщення персоналу та / або вантажів на заданій території стаціонарних об'єктів;
  - передача даних про переміщення персоналу та / або вантажів на пункти контролю і формування баз даних;
  - значна пропускна здатність бездротової мережі;
  - постійний відеоконтроль наявності і переміщення об'єктів моніторингу завдяки передачі відеоінформації з зони контролю;
  - відображення на моніторі блоку обробки і відображення інформації (БООІ) телеметричної інформації та відеоінформації, що надходить з модулів контрольних (переміщуються об'єктами моніторингу).

Під об'єктом моніторингу розуміється - персонал і / або вантаж знаходиться в зоні контролю об'єкту, що охороняється. Поставлена задача вирішується, а технічний результат досягається за рахунок того, що система моніторингу персоналу і вантажів на базі само організований бездротової мережі, що характеризується тим, що містить об'єднані єдиною мережею широкосмугового радіозв'язку, комплект базовий стаціонарний, що включає в себе, щонайменше, один блок точки радіо доступу (БТД), що дозволяє контролювати об'єкти моніторингу всередині зони контролю і передавати відповідну інформацію в блок обробки і відображення інформації (БООІ), виконаний на основі комп'ютера, що забезпечує прийом і обробку сигналів, а також графічне відображення стану об'єктів моніторингу в реальному масштабі часу, причому БООІ з'єднаний з БТД за допомогою проводового з'єднання Ethernet, щонайменше, один блок контролю (БК), що забезпечує передачу інформації про координ Атаху і / або трасі руху об'єктів моніторингу і ретрансляцію відеоінформації при відсутності прямої радіозв'язку, по меншій мере, один блок відео контролю (БВК), що містить бездротову IP- відеокамеру і забезпечує передачу відеоінформації про перетин зони контролю; щонайменше, один мобільний комплект модулів контрольних (МК), виконаних у вигляді персональних блоків (портативних приймачів радіосигналів), також в блок контролю додатково введений розширений бездротовий маршрутизатор для забезпечення гарантованого радіо покриття в зоні контролю і зв'язку між комплектом модулів контрольних і блоком точки радіо доступу, щонайменше, один комплект джерел живлення електронних компонентів, що входять до складу системи, при цьому, кожен пристрій системи моніторингу (блок точки радіо доступу, блок контролю, блок відео контролю, модуль контрольний) містить радіо модем, що забезпечує миттєву організацію широкосмугових мереж в зоні контролю і значну пропускну здатність бездротової мережі системи моніторингу.

Таким чином, запропонована система моніторингу сформована з наступних складових частин: комплект стаціонарний і комплект мобільний.

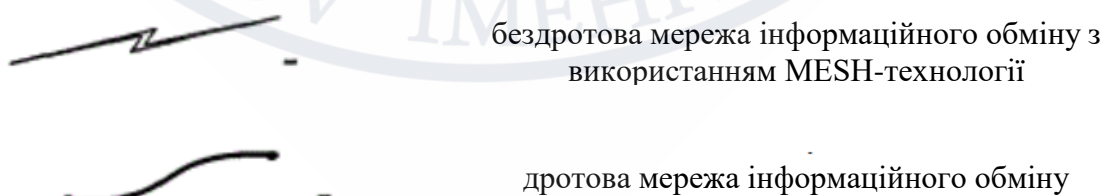
Технічна сутність запропонованої системи моніторингу полягає в тому, що пристрою системи моніторингу (БК, БВК, МК) при використанні само організованої мережі інформаційного обміну технології MEA MESH працюють як маршрутизатор / ретранслятор, тобто кожен пристрій системи моніторингу має можливість зв'язку з БТД як безпосередньо, так і через «сусідні» пристрої.

Така розподілена структура значно підвищує стійкість системи моніторингу до відмов, а також загальну пропускну здатність бездротової мережі, оскільки пакети даних автоматично направляються по менш завантаженим «шляхах» передачі інформації. Миттєва організація широкосмугових мереж в зоні контролю і значна пропускну здатність бездротової мережі системи обумовлена тим, що кожне пристрій системи моніторингу (БК, БВК, МК) виконує роль маршрутизатора / ретранслятора для інших пристроїв.

на Рис.2.6 представлена схема розташування запропонованої системи моніторингу на об'єкті охорони.

на Фиг.1 наведені такі позначення:

- 1 - блок обробки і відображення інформації (БООІ)
- 2 - об'єктовий блок точки радіодоступу (БТД)
- 3 - об'єктовий блок контролю (БК)
- 4 - об'єктовий блок відеоконтролю (БВК)
- 5 - модуль контрольний (МК)
- 6 - ІР - відеокамера
- 7 - зона контролю (ЗК)



БООІ виконаний на основі комп'ютера (промислового ноутбука), забезпечує прийом, обробку, збереження, архівування інформації про стан об'єктів моніторингу із зазначенням номера об'єкту моніторингу, його

координат, дати і часу події в журналі подій у вигляді log - файлу., а також забезпечує графічне відображення відеоінформації, переданої з БВК4, інформації про місцезнаходження і стан МК 5 на двомірному плані місцевості (будівлі), і видачі звукового сигналу тривоги і тривожного повідомлення при несанкціонованих діях об'єктів моніторингу: про зняття МК 5, при виході із зони контролю, а також при наближенні МК 5 до БК 3 і БВК 4 на відстань менше 2 м.

Спеціальне програмне забезпечення, встановлене в БООІ 1, підтримує повний набір функцій управління мережею MEA MESH, забезпечує безпеку, облік і управління параметрами пристроїв системи моніторингу, а також контроль параметрів продуктивності мережі. Управління всіма пристроями системи (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5) і їх моніторинг здійснюються за допомогою використання стандартного протоколу SNMP.

БТД 2 виконаний у вигляді електронної схеми в термостатованому герметичному корпусі з рівнем захисту IP65, і містить мікроконтролер з підключеними до нього радіо модемом, внесений антеною, акумулятором і платою підзарядки акумулятора. На корпусі БТД 2 встановлена всенаправлена антена для прийому переданої інформації з БК 3, БВК 4, і МК 5. На корпусі БТД 2 розташований роз'єм для підключення Ethernet кабелю (кручена пара), для передачі отриманої інформації від БК 3, БВК 4 і МК 5, на БООІ 1. БТД 2 призначений для отримання від БК 3, БВК 4, МК 5 і передачі на БООІ 1 інформації про місцезнаходження об'єктів моніторингу всередині зони контролю і факти несанкціонованого і / або санкціонованого зняття МК 5 з об'єктів моніторингу. БТД 2 забезпечує маршрутизацію системи моніторингу в цілому, а також служить інтерфейсом між бездротового і дротового мережами системи.

Для здійснення функцій стикування між БТД 2 і провідний мережею БООІ 1 застосований мобільний контролер MiSC. Мобільний контролер MiSC є частиною широкосмугового мобільного мережі MEA MESH, виконує функції маршрутизації, комутації та управління. Крім цього, він забезпечує з'єднання з провідний мережею БООІ 1. Устаткування контролера MiSC складається зі стандартних компонентів: пакетних шлюзів і маршрутизаторів, додаткових

медійних серверів і серверів додатків. Контролер MiSC забезпечує аутентифікацію та авторизацію пристроїв системи моніторингу, доступ до функцій експлуатації, адміністрування, управління та ініціалізації, управління параметрами внутрісистемної мобільності.

БК 3 виконаний у вигляді електронної схеми в термостатованому герметичному корпусі з рівнем захисту IP65, і містить мікроконтролер з підключеними до нього радіо модемом, розширеним бездротовим маршрутизатором, внесений антеною, акумулятором і платою підзарядки акумулятора. На корпусі БК 3 встановлено всенаправленна антена для передачі даних на БТД 2. БК 3 призначений для передачі інформації про місцезнаходження об'єктів моніторингу і передачі відеозображення з БВК 4. БК 3 забезпечує передачу інформації про координатах і / або трасі руху об'єктів моніторингу і ретрансляцію відеоінформації при відсутності прямої радіовидимості. Для забезпечення гарантованого радіо покриття в зоні контролю і зв'язку між МК 5 і БТД 2 в склад БК 3 додатково введено розширений бездротовий маршрутизатор, виконує функції забезпечення можливості доступу до декількох пристроїв системи моніторингу, об'єднує функції бездротового маршрутизатора і бездротового модему.

Це робить можливим включення в бездротову мережу будь-якого Ethernet-пристрої, такого, як комп'ютер, IP-відеокамера, а також різних датчиків і / або пристроїв сигналізації (пожежо - охоронні датчики, кошти дозиметричного контролю та ін.). Всі ці пристрої можуть працювати зі швидкістю до 6 Мбіт / с. Розширений бездротовий маршрутизатор забезпечує збільшення зони дії між МК 5 і БТД 2; є стаціонарною опорною точкою для визначення місця розташування об'єктів моніторингу.

БВК 4 виконаний у вигляді електронної схеми в термостатованому герметичному корпусі з рівнем захисту IP65, і містить мікроконтролер з підключеними до нього радіо модемом, розширеним бездротовим маршрутизатором, внесений антеною, IP-відеокамерою, акумулятором і платою підзарядки акумулятора. До корпусу блоку підключена всенаправленна антена

для передачі даних від БВК 4 на БТД 2. БВК 4 забезпечений зовнішньої IP - відеокамерою, яка встановлена на зовнішній стороні блоку, але може бути також встановлена на спеціально виготовлений штатив. Як телекамери в БВК 4 використовується мережева бездротова IP - відеокамера переднього огляду мобільного об'єкта з вбудованими автодіафрагмою, детектором руху і підтримкою двостороннього аудіоканалу.

Мережева бездротова IP - відеокамера виконана з можливістю підключення безпосередньо в IP мережу завдяки вбудованому WEB-сервера. Відеокамера також виконана в герметичному корпусі індустріального кліматичного виконання з рівнем захисту IP65. БВК 4 призначений для передачі відеоінформації на БООІ1 про вихід об'єктів моніторингу із зони контролю. БВК4 забезпечує передачу відеоінформації і ретрансляцію інформації про координати і / або трасі руху об'єктів моніторингу.

МК 5 виконаний у вигляді персонального пристрою (портативного приймача) постійно знаходиться в розпорядженні власника об'єкта моніторингу, містить радіомодем і антену, конструктивно виконаний на базі уніфікованого Бризко-вологозахищеного пластикового корпусу для захисту від атмосферних впливів і механічних пошкоджень, на корпусі є кріплення, за допомогою якого він встановлюється на контрольований об'єкт. Також на корпусі МК 5 є індикація рівня заряду / розряду акумулятора. Усередині корпусу МК 5 розміщуються: радіомодем, плата модуля контрольного, акумулятор і вбудована антена. МК 5 призначений для визначення і передачі інформації про місцезнаходження об'єкта моніторингу всередині зони контролю і факти несанкціонованого і / або санкціонованого зняття МК 5 з об'єкта моніторингу на БООІ 1. МК 5 також виконаний в герметичному корпусі індустріального кліматичного виконання з рівнем захисту IP65.

Радіомодем, встановлений в пристрої системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5), забезпечує передачу інформації, відео зображення в потоковому режимі з піковою швидкістю до 6 Мбіт / сек і швидше і точніше визначення розташування об'єктів моніторингу в зоні контролю без використання системи

GPS і GLONASS. Як радіомодема використана бездротова карта доступу WMC. Радіомодем є керованим елементом мережі, управління його робочими параметрами, конфігурацією і станом здійснюється в режимі віддаленого радіо доступу за допомогою спеціального програмного забезпечення встановленого в БООІ 1.

Пристрої системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5), оснащені даними радіомодемом, організовують власні однорангові мережі в будь-якому місці і в будь-який час, при цьому всі пристрої об'єднуються в високошвидкісну широкосмуговий мережу автоматично, незалежно від того, є присутнім або відсутній мережева інфраструктура в місці їх розташування. БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5 функціонують як бездротові маршрутизатори / ретранслятори для підвищення стійкості мережі, збільшення зони радіопокриття, зони контролю і підвищення надійності всієї системи.

Кожен пристрій системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5) при використанні самоорганізується мережі інформаційного обміну технології MEA MESH підтримують стандартний протокол IP (Internet Protocol) передачі даних, що істотно підвищує надійність роботи системи моніторингу і захист від несанкціонованого доступу. MAC-адресу кожного пристрою системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5) є персональним адресою в рамках всієї інфраструктури самоорганізується мережі інформаційного обміну технології MEA MESH.

На всіх корпусах пристроїв системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5) обладнано роз'ємом для заряду акумулятора від мережі змінного струму  $220 \pm 20$  В. Система моніторингу розрахована на безперервну цілодобову роботу при умови електроживлення від мережі змінного струму  $220 \text{ В} \pm 20 \text{ В}$ , 50 - 60 Гц. БТД 2, БК 3 і БВК 4 виконані з можливістю автономного функціонування від акумуляторної батареї до 4 годин. МК 5 виконаний з можливістю автономного функціонування від акумуляторної батареї до 8 годин.

Також на всіх корпусах пристроїв системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5) передбачені кріплення для монтажу блоків на будь-яку вертикальну

поверхню. Мережа інформаційного обміну технології MEA MESH організована в відповідно до вимог стандарту бездротової передачі даних IEEE 802.1 Is. Робота системи моніторингу здійснюється наступним чином. Для охорони об'єкта організовується зона контролю за допомогою стаціонарного розміщення по периметру об'єкта БТД 2, БК 3 і БВК 4 (див. рис.2.7). МК 5 видаються персоналу і / або поміщаються в транспортні засоби (контейнери), і розташовуються усередині зони контролю об'єкта.

Установка БТД 2, БК 3 і БВК 4 проводиться з обов'язковою прив'язкою до системи географічних координат. Координати визначаються за допомогою GPS приймача. БТД 2 встановлюється в безпосередній близькості від БООІ 1 (до 10 0 м). БООІ 1 розміщується поза периметром об'єкта. Після установки проводиться включення харчування БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5 і БООІ 1.

Після цього, оператором з клавіатури вводиться в БООІ 1 інформація про об'єкти моніторингу, на яких встановлені МК 5, а також про об'єктових блоках БТД 2, БК 3, БВК 4 і зоні контролю, яка полягає з:

- мережевого IP - адреси модема БТД 2, маски підмережі і основного шлюзу;
- мережевого IP - адреси мікроконтролера БТД 2, маски підмережі і основного шлюзу;
- мережевого IP - адреси модема БК 3, маски підмережі і основного шлюзу;
- мережевого IP - адреси мікроконтролера БК 3, маски підмережі і основного шлюзу;
- мережевого IP - адреси модема БВК 4, маски підмережі і основного шлюзу;
- мережевого IP - адреси мікроконтролера БВК 4, маски підмережі і основного шлюзу;
- мережевого IP - адреси IP-відеокамери БВК 4, маски підмережі і основного шлюзу;

- мережевого IP - адреси радіомодема МК 5, маски підмережі і основного шлюзу;

- географічних координат (широта, довгота, висота) установки БТД2.БКЗ;

- мережевого IP - адреси БООІ 1; {{1 }} - графічного плану міс та розташування БТД 2, БК 3, БВК 4.

- параметрів зони контролю в залежності від географічних координат (широта, довгота, висота) установки БТД 2, БК 3.

Після введення необхідної інформації автоматично утворюється віртуальна мережа зв'язку для передачі цифрової інформації між об'єктовими блоками системи моніторингу (БТД 2, БК 3, БВК 4, МК 5). На екрані монітора БООІ 1 на графічному плані встановлюється (малюється) зона контролю відповідно до географічними координатами установки БТД 2 і БК 3, на якій відображаються всі об'єкти моніторингу. Від кожного МК 5 по бездротовому широкопasmового каналу передачі даних, автоматично, із заданою періодичністю відбувається обмін пакетами цифровий інформації з БТД 2, БК 3 і БВК 4 для визначення свого місця розташування (координат) і передачі цифрової інформації на БООІ 1 через БТД 2.

При перетині кордону зони контролю об'єктом моніторингу на БООІ 1 видається звуковий сигнал тривоги, при цьому в базу даних БООІ 1 в реальному масштабі часу проводиться запис і збереження (архівування) інформації / відеоінформації про подію з можливістю подальшого перегляду події. Запис і збереження (архівування) інформації / відеоінформації про стан об'єктів моніторингу із зазначенням номера об'єкту, його координат, дати і часу події проводиться в журналі подій у вигляді log - файлу.

Таким чином, технічні ефекти, що досягаються при використанні корисної моделі:

- можливість здійснення геопозиціонування об'єктів моніторингу без використання GPS ;

- створення довільних (конфігуруються) меж зони контролю;

- висока точність установки кордонів зони контролю (одиниці метрів);

- малий час реакції на тривожне подія (1 сек.) ;
- необмежену кількість зон контролю і контрольованих об'єктів моніторингу;
- простота масштабування системи;
- використання одного частотного діапазону;
- можливість організації великої зони радіопокриття;
- висока стійкість до радіозаглушення;
- система відеоспостереження інтегрована в структуру;
- при спробі впливу на систему моніторингу ззовні система автоматично переходить на резервний канал.

Технічна сутність запропонованої системи моніторингу полягає в тому, що пристрою системи моніторингу (БК, БВК, МК) при використанні самоорганізованої мережі інформаційного обміну технології MEA MESH працюють як маршрутизатор / ретранслятор, тобто кожен пристрій системи моніторингу має можливість зв'язку з БТД як безпосередньо, так і чере«сусідні» пристрою.

Така розподілена структура значно підвищує стійкість системи моніторингу до відмов, а також загальну пропускну здатність бездротової мережі, оскільки пакети даних автоматично направляються по менш завантаженим «шляхах» передачі інформації. Об'єднання в єдину систему моніторингу з автоматичною організацією віртуальних мереж дозволяє істотно підвищити контроль пересування об'єктів моніторингу, а також дозволяє створювати стаціонарну інфраструктуру, гарантує надійну мобільну передачу цифрової та відеоінформації про місцезнаходження об'єктів моніторингу в реальному масштабі часу. Крім того, система відповідно до її описом, наведеним у формулі, володіє цілісністю, є мобільною, швидко розвертаючої, має можливість швидкої і простої установки і налаштування.

#### *Формула корисної моделі*

1. Система моніторингу персоналу і вантажів на базі самоорганізованої бездротової мережі, що характеризується тим, що містить об'єднані єдиною

мережею широкосмугового радіозв'язку комплект базовий стаціонарний, що включає в себе, щонайменше, один блок точки радіо доступу, що дозволяє контролювати об'єкти моніторингу всередині зони контролю і передавати відповідну інформацію в блок обробки і відображення інформації, блок обробки і відображення інформації, виконаний на основі комп'ютера, що забезпечує прийом і обробку сигналів, а також графічне відображення стану об'єктів моніторингу в реальному масштабі часу, причому блок обробки і відображення інформації з'єднаний з блоком точки радіодоступу за допомогою проводового з'єднання Ethernet, щонайменше, один блок контролю, що забезпечує передачу інформації про координати і / або трасі руху об'єктів моніторингу і ретрансляцію відеоінформації при відсутності прямої радіозв'язку, по меншій мере, один об'єктовий блок відеоконтролю, що містить бездротову IPвідеокамеру, що забезпечує передачу відеоінформації про перетин зони контролю; щонайменше, один мобільний комплект модулів контрольних, виконаних у вигляді персональних блоків (портативних приймачів радіосигналів), також в блок контролю додатково введено розширений бездротовий маршрутизатор для забезпечення гарантованого радіо покриття в зоні контролю і зв'язку між комплектом модулів контрольних і блоком точки радіо доступу, щонайменше, один комплект джерел живлення електронних компонентів, що входять до складу системи, при цьому кожен пристрій системи моніторингу (блок точки радіо доступу, блок контролю, блок відео контролю, модуль контрольний) містить радіо модем, що забезпечує миттєву організацію широкосмугових мереж в зоні контролю і значну пропускну здатність бездротової мережі системи моніторингу.



2. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що в якості радіомодема використовують бездротову карту доступу WMC.

3. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що в блок обробки і відображення інформації додатково встановлено мобільний контролер MiSC, здійснює функцію стикування між бездротового і дротового мережею.

4. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що блок обробки і відображення інформації виконаний з можливістю збереження, архівування інформації про стан об'єктів моніторингу із зазначенням номера об'єкту моніторингу його координат, дати і часу події в журналі подій у вигляді logфайла.

5. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що блок обробки і відображення інформації виконаний з можливістю графічного відображення стану об'єктів на двомірному плані місцевості (будівлі), видачі звукового сигналу тривоги і тривожного повідомлення при несанкціонованих діях.

6. Система моніторингу по п.1, що відрізняється тим, що блок обробки і відображення інформації виконаний з можливістю циклічної перевірки стану об'єктів моніторингу з задається періодичністю і виявлення / сигналізації тривожну ситуацію.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ З DP-QPSK НА ШВИДКОСТІ В 100 ГБІТ / С

### 100 Gbps DP-QPSK System with Digital Signal Processing

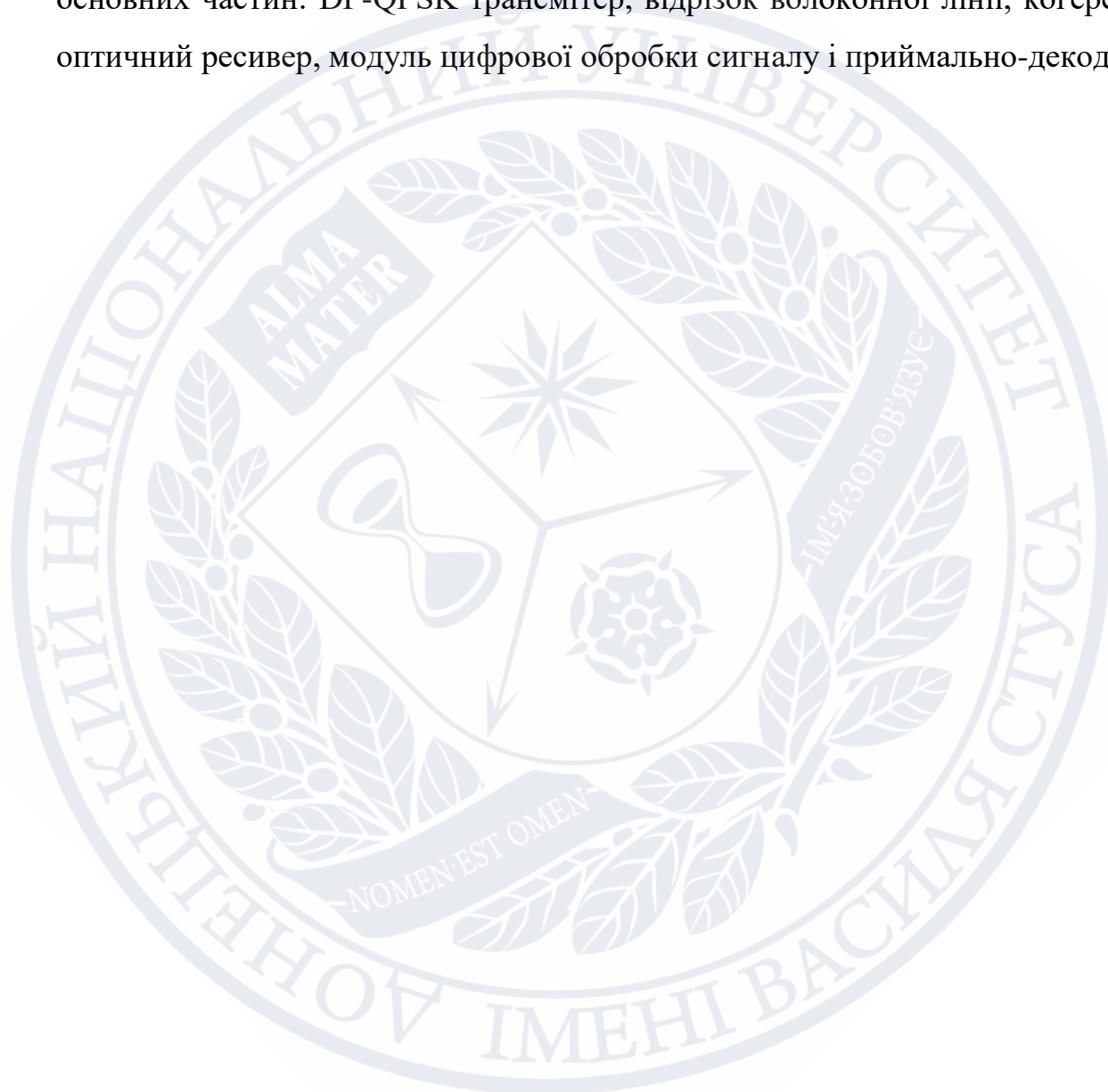
Квадратурна фазова маніпуляція з подвійною поляризацією (DP - QPSK dual polarization quadrature phase shift keying).

Це спеціальна техніка модуляції оптичного сигналу в волоконній оптики, яка використовує 2 ортогональні поляризації лазерного променя з QPSK на кожну поляризацію.

QPSK може передавати 2 біти інформації per symbol rate. DP-QPSK збільшує число біт до чотирьох. В такому випадку, для систем, що працюють на швидкостях 100 Гбіт / с, необхідно передавати 25-28 тисяч символів в секунду. Але оскільки кожен символ передає 4 біти інформації, то електроніці немає

необхідності працювати на частоті в 100 ГГц, достатньо всього від 25 до 28 ГГц, що є економічно вигідним для застосування в ВОЛЗ. Вартість оптоелектронних компонентів в даному випадку також буде значно нижче.

Розглянемо систему 100 Гбіт / с DP-QPSK з цифровою обробкою сигналу (рис 3.1). Дана система приведена на малюнку нижче. Вона представляє із себе 5 основних частин: DP-QPSK трансмітер, відрізок волоконної лінії, когерентний оптичний ресивер, модуль цифрової обробки сигналу і приймально-декодер.



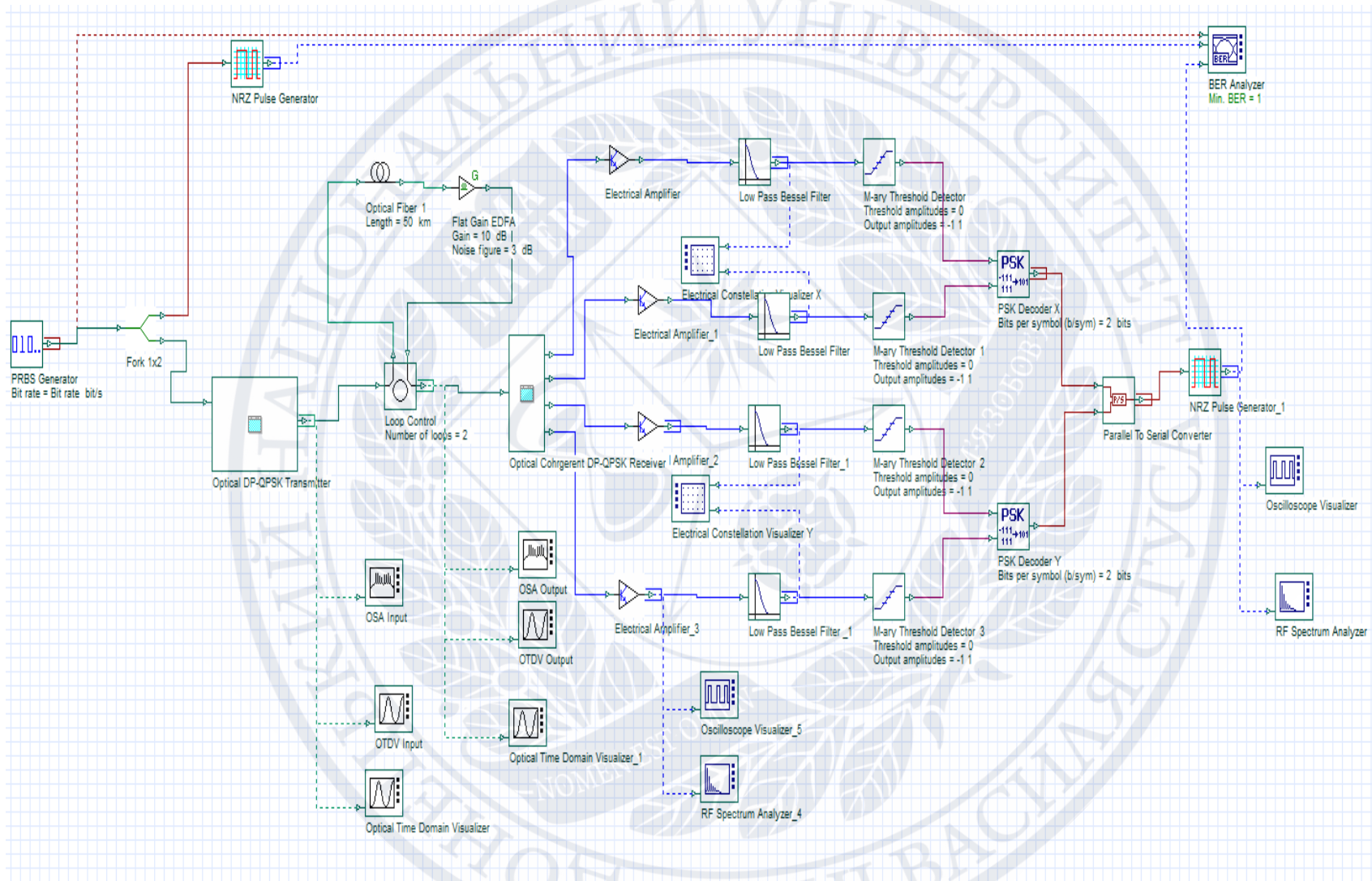


Рис. 3.1 -

Схема 100 Гбіт / с DP-QPSK з цифровою обробкою сигналу



Сигнал генерується оптичним DP-QPSK трансмітером, який в даній схемі представлений підсистемою з окремих компонентів. Після генерації оптичний сигнал поширюється через оптичне волокно, де зазнає вплив дисперсії і поляризації. В даній схемі використовується 100 кілометрова лінія з двома підсилювачами накачуванням в 10 дБ.

Пройшовши волоконну лінію сигнал потрапляє на когерентний оптичний приймач, який також представлений у вигляді підсистеми з окремих елементів. Тут оптичний сигнал оцифровується і потрапляє на модуль цифрової обробки для компенсації впливу нелінійних ефектів, що впливали на сигнал в волоконній лінії.

Розберемо схему трансмітера більш докладно. Вона представлена на рис 3.2. Як джерело сигналу використовується простий генератор псевдо - випадкових послідовностей. Даний цифровий сигнал подається на оптичний передавач DP-QPSK. Даний передавач на схемі виконаний, як окрема підсистема (малюнок). Це зроблено для наочного відображення процесів, що відбуваються при DP-QPSK модуляції.

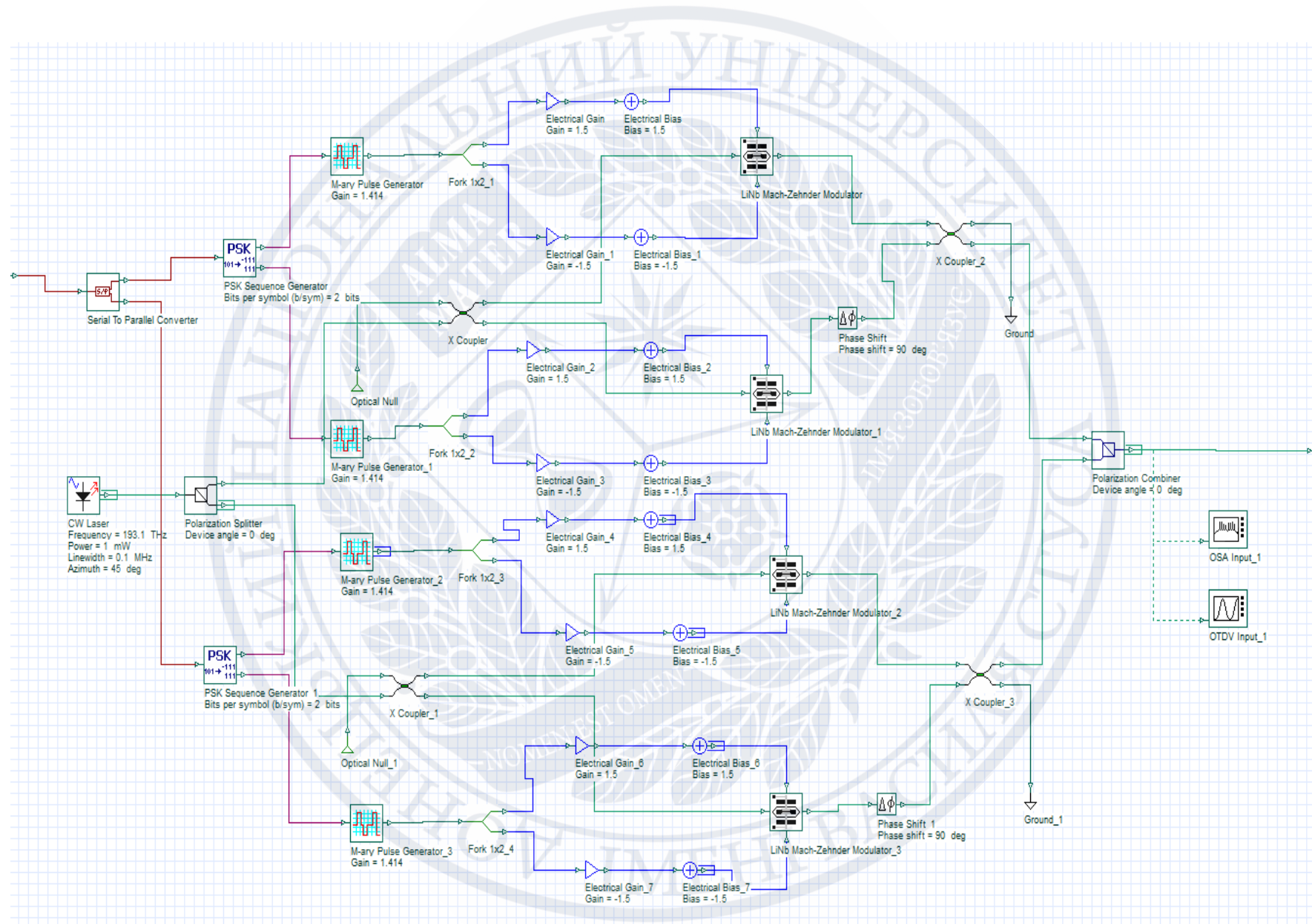


Рис 3.2 - схема DP-QPSK трансмітера

Розглянемо детальну схему DP-QPSK трансмітера. Згенерована псевдо-випадкова послідовність потрапляє на конвертер (serial to parallel converter), де зазнає поділ на 2 частини по бітовій швидкості (обидва вихідних сигнали в 2 рази повільніше, ніж вхідний).

В якості носія моделіруемого сигналу використовується лазер безперервного випромінювання (CW Laser), налаштований на частоту в 193,1 ТГц і кутом лінійною поляризацією в 45 градусів.

Даний оптичний сигнал розділяється на 2 шляхом проходження через спеціальний спліттер поляризації. На виході виходять 2 сигналу з різною поляризацією. Спліттер самостійно розділяє сигнал на 2 компоненти з різною поляризацією.

Після поділу спліттером, оптичні сигнали з різною поляризацією потрапляють на модулятори Маха-Цандера (MZM). На цьому етапі необхідно підвести до модулятору, безпосередньо, модулюючий сигнал, в якості якого буде використаний раніше розглянутий цифровий сигнал, розділений конвертером. Але, перш ніж потрапити на модулятор, дану цифрову послідовність необхідно пропустити через генератор символної послідовності PSK (PSK-Sequence Generator). Цей пристрій генерує з вхідного двійкового сигналу дві багаторівневі послідовності (M-ary) за допомогою фазової модуляції. При модуляції відбувається кодування 2 біта на символ зі зміщенням початкової фази на 45 градусів. При даному виді кодування вийде 4 фазових стану.

$$\varphi_i = \left( \frac{2\pi}{M} (i - 1) + \theta \right), i = 1, 2 \dots M \quad (3.1)$$

У цій формулі число M являє собою кількість можливих цифрових послідовностей, розраховується за формулою

$$M = 2^h \quad (3.2)$$

Тут число  $h$  - кількість біт на символ. В даній схемі це число дорівнює 4. Звідси випливає, що на виході генератора виходять 4 фазових стану (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1- Фазові стану  $I$  і  $Q$

Bit sequence	I	Q
00	1	0
01	0	1
10	-1	0
11	0	-1

Модульований PSK M-ary сигнал надходить на M-ary Pulse Generator - генератор багаторівневих імпульсів. Він генерує на своєму виході електричний сигнал, відповідний вхідний M-ary послідовності для подальшого використання в якості модулюючого сигналу для модулятора Маха-Цандера.

Тепер на MZM надходить як оптична несуча, так і сигнал, що модулює. Оскільки розглянута схема використовує подвійну поляризацію, використовується відразу 4 модулятора Маха-Цандера (по 2 на кожен поляризацію). Таким чином ми отримуємо можливість кодувати сигнал великою кількістю фазових станів, що підвищує ефективність системи.

На виході з модуляторів, по одному на пару, необхідно додати невеликий пристрій Phase Shift - фазовий зсув, яке додає затримку за часом вихідного оптичного сигналу для запобігання проблем при детектуванні сигналу. Після додавання необхідної затримки оптичні сигнали об'єднуються в поляризаційному сумматорі (Polarization Combiner) і за рахунок затримки не зміщуються і не перекривають один одного.

На цьому процес створення дупольарізованого оптичного сигналу з фазовою маніпуляцією можна вважати закінченим. Далі відбувається передача по звичайному оптичному волокну довжиною в 100 км з двома підсилювачами EDFA (леговані ербієм), встановленими на відстані 50 км один від одного і володіють посиленням в 10 дБ (рис 3.3).

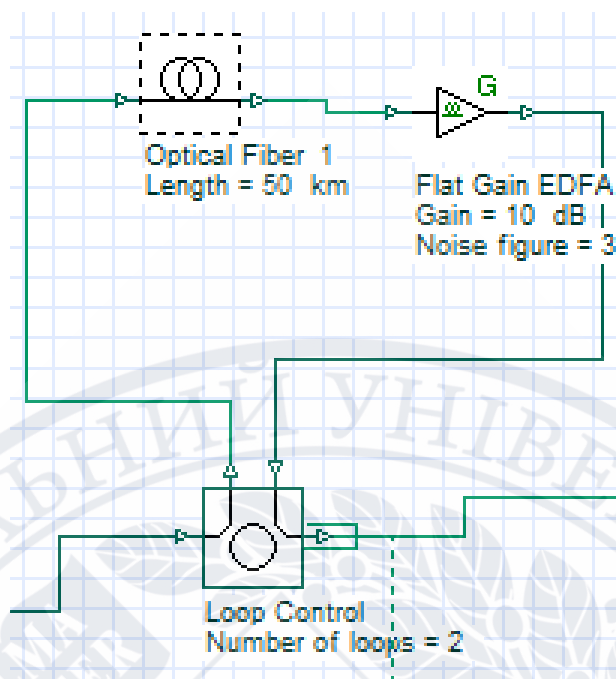


Рис 3.3 - Схематичне зображення волоконної лінії

При виході з волоконної лінії сигнал спектр оптичного сигналу звужується і набуває шуми (рисунок 3.4) [7]. Для візуалізації даних ефектів скористаємося такими візуалізатором, як: Оптичний візуалізатор тимчасової області (Optical Time Domain Visualiser), Візуалізатор оптичного спектру (Optical Spectrum Analyser).

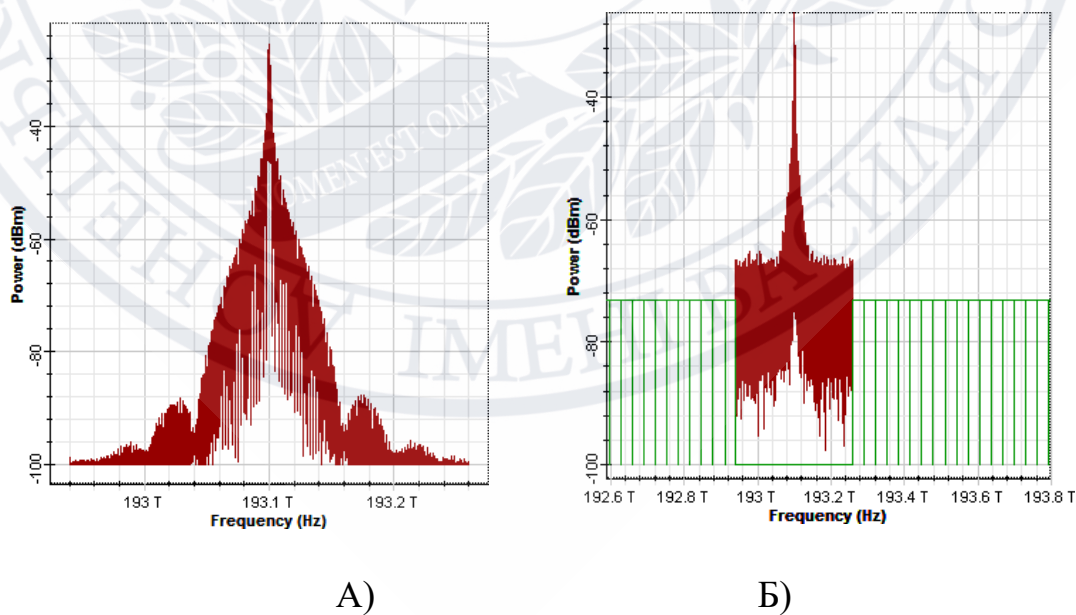


Рис 3.4 - спектри сигналів А) на виході DP-QPSK трансмітера Б) на виході оптичної лінії

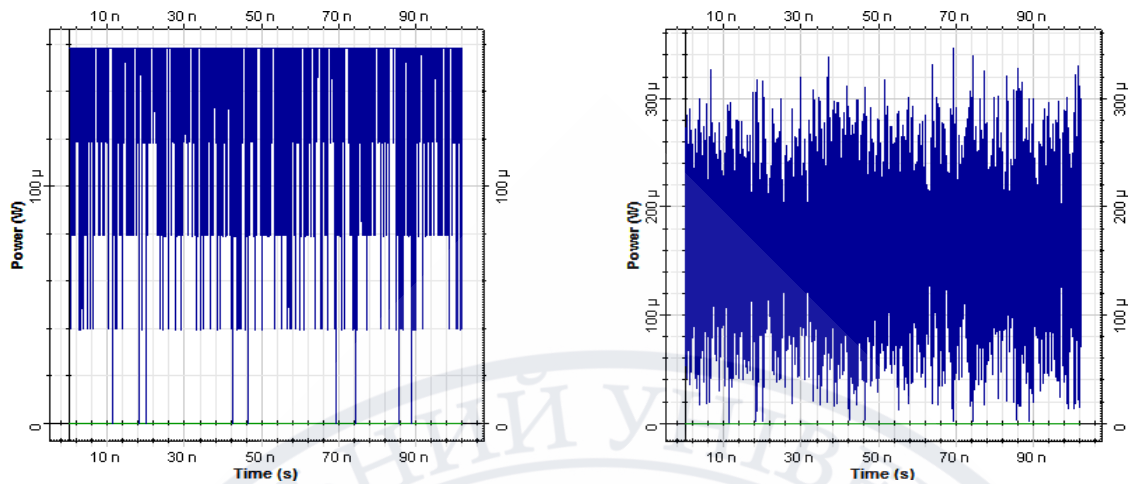


Рис 3.5 - результат моделювання візуалізатора тимчасової області (зліва - до оптичної лінії, праворуч - після оптичної лінії)

Даний «зашумлений» сигнал потрапляє на когерентний оптичний приймач (Optical Coherent DP-QPSK Receiver) (рис. 3.6). Цей компонент також можна представити у вигляді окремої підсистеми.

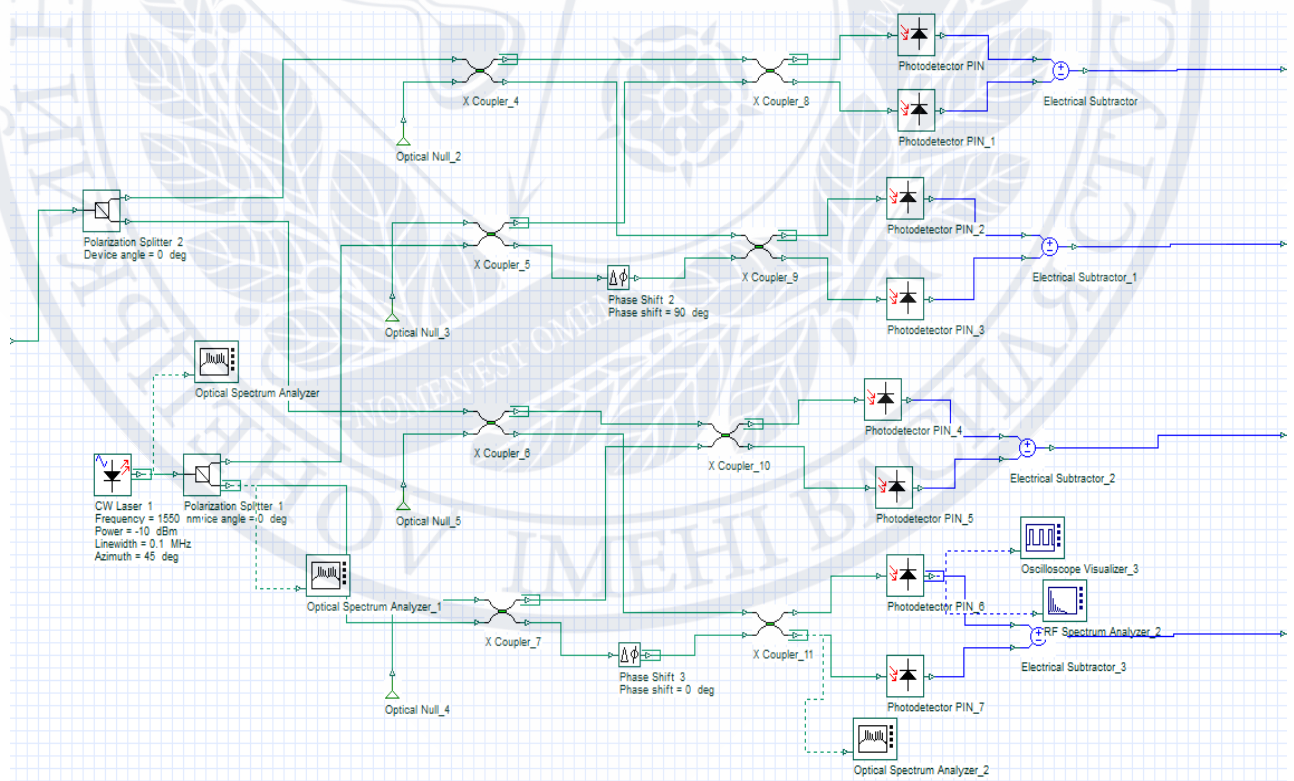


Рис. 3.6- Схема використовуваного DP-QPSK ресивера

Помітно схожість зі схемою трансмітера. Тут оптичний сигнал, що пройшов через волоконну лінію, знову розділяється на сплітері. У ресівері встановлено додаткове джерело оптичного випромінювання, поляризоване на 45 градусів щодо початкового сигналу. Оптичні сигнали змішуються на оптичних муфтах і надходять на фотодетектори для перетворення в електричний сигнал. Як фотодетектора використовується система з фотодіодів.

На виході PD-QPSK ресивера сигнал залишається досить спотворене і з великою кількістю шумів (рис. 3.7).

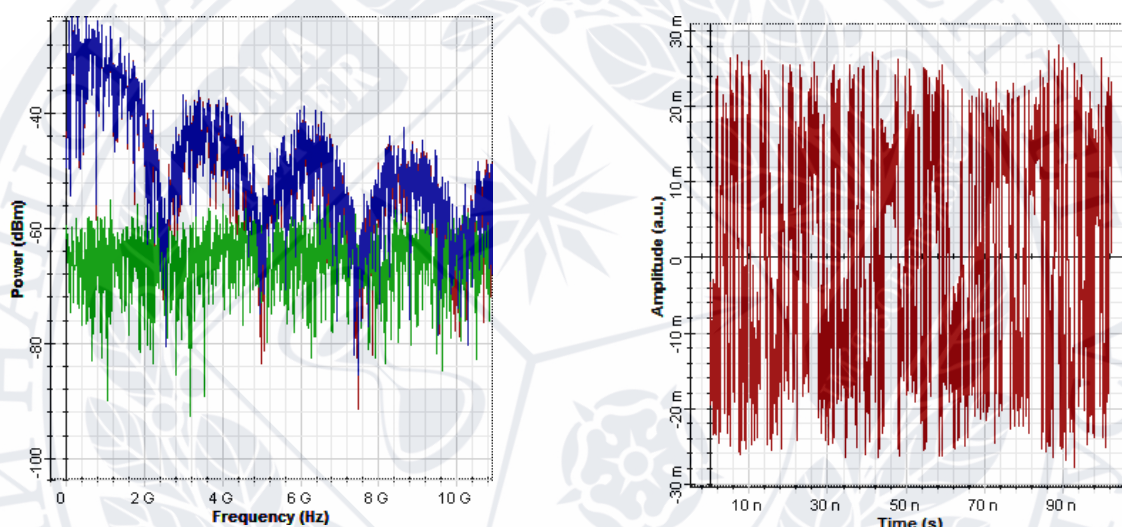


Рис 3.7 - Оптичний спектр (зліва) і осцилограма (праворуч) сигналу на виході приймача

Для усунення що виникли в ході передачі шумів необхідно скористатися модулем цифрової обробки сигналів. Для цього в схемі передбачена система з наступних компонентів: електричний підсилювач з посиленням в 30 дБ, фільтр нижніх частот Бесселя і багаторівневий пороговий детектор.

В першу чергу сигнал проходить перед посилення на електричному підсилювачі. Далі він подається на фільтр Бесселя. Даний фільтр має найменш крутим спадом амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), ніж у інших лінійних фільтрів. Даний фільтр є найбільш прийнятним для обробки ступеневої вхідного сигналу [8]. Фільтр Бесселя має фазовим зрушенням, пропорційним

частоті і максимально гладкою груповий затримкою (рисунок 27). Групова затримка практично не змінюється по частотах смуги пропускання, внаслідок чого форма фільтруючого сигналу на виході такого фільтра в смузі пропускання зберігається практично незмінною. Даний фільтр прибирає велику частину шумів.

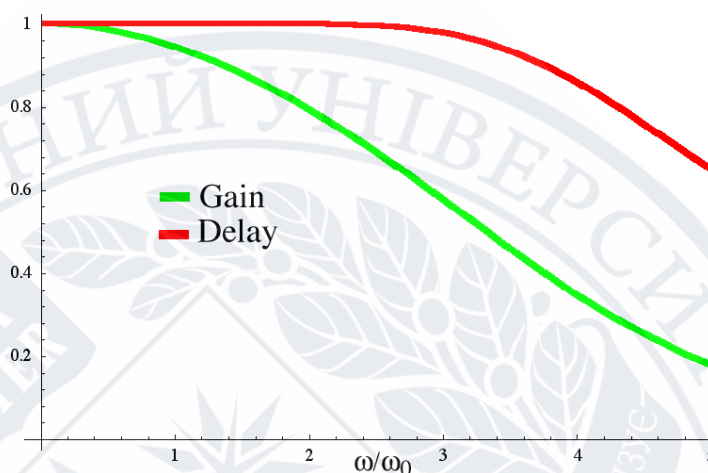


Рис. 3.8 - Графік амплітудно-частотної характеристики і груповий затримки

Після проходження сигналом фільтра Бесселя скористаємося візуалізатором "сузір'я" електричного сигналу (Electrical Constellation Visualizer) (рис. 3.9). Він показує фазові і квадратурні електричні сигнали. Також може оцінити ймовірність помилки символу.

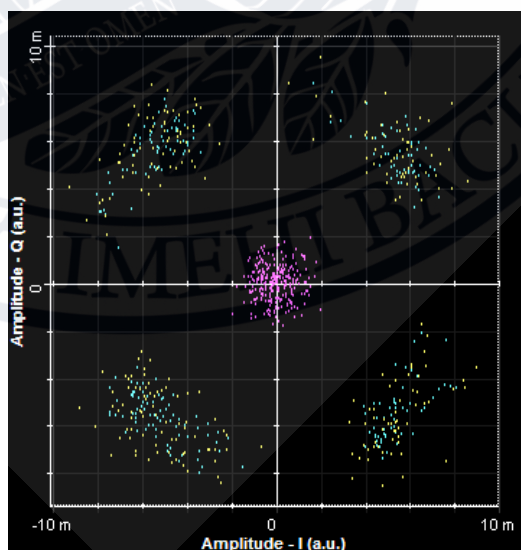


Рис 3.9 - діаграма фазових станів на виході фільтра Бесселя

Як говорилося раніше, в даній схемі використовується передача 2 біта на символ. На додаток до цього, модуляція відбувається також за допомогою поляризації оптичного сигналу [2]. Тому на візуалізаторі спостерігається відразу 4 фазових стану (рис 3.10). Варто відзначити, що при щонайменшій зміні параметрів системи дана діаграма "сузір'я" буде значно спотворюватися, що призведе до непрацездатності системи.

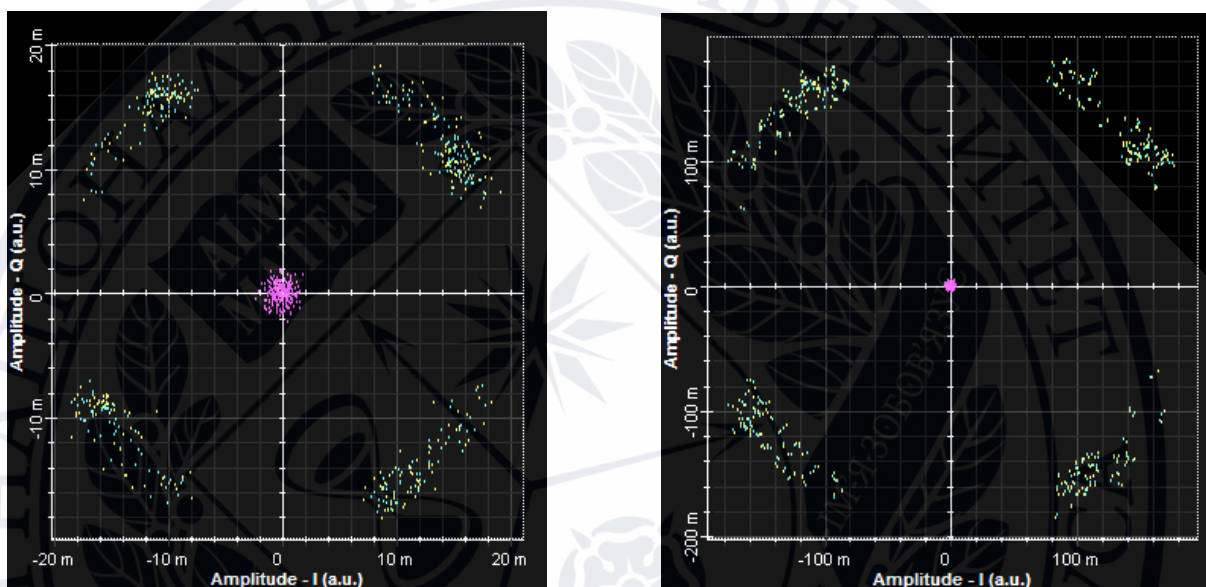


Рис 3.10- діаграми фазових станів при збільшенні протяжності волоконної лінії до 140 км (ліворуч) і при збільшенні потужності підсилювача в два рази (праворуч)

Отримані результати показують, що в даній схемі на швидкості в 100 Мбіт / с можливе точне детектування і декодування отриманого сигналу. Після проходження фільтра Бесселя сигнал потрапляє на багаторівневий пороговий детектор, який декодує багаторівневий електричний сигнал в багаторівневий. Він дозволять компенсувати затримку, що виникла при поширенні сигналу.

Потім слід декодер (PSK Decoder). Він перетворює вхідні багаторівневі сигнали (M-ary) в звичайну цифрову бінарну послідовність. За принципом роботи схожий з кодером і має однаковий математичний апарат. Дані з обох PSK-

декодерів надходять на суматор, де дві бітові послідовності складаються і утворюють одну послідовність з подвоєною швидкістю передачі.

Після всіх перетворень на виході суматора ми можемо спостерігати Глазкова діаграму, близьку до ідеальної, що вказує на ефективність роботи даної системи на високих швидкостях (рис.3.11) [13].

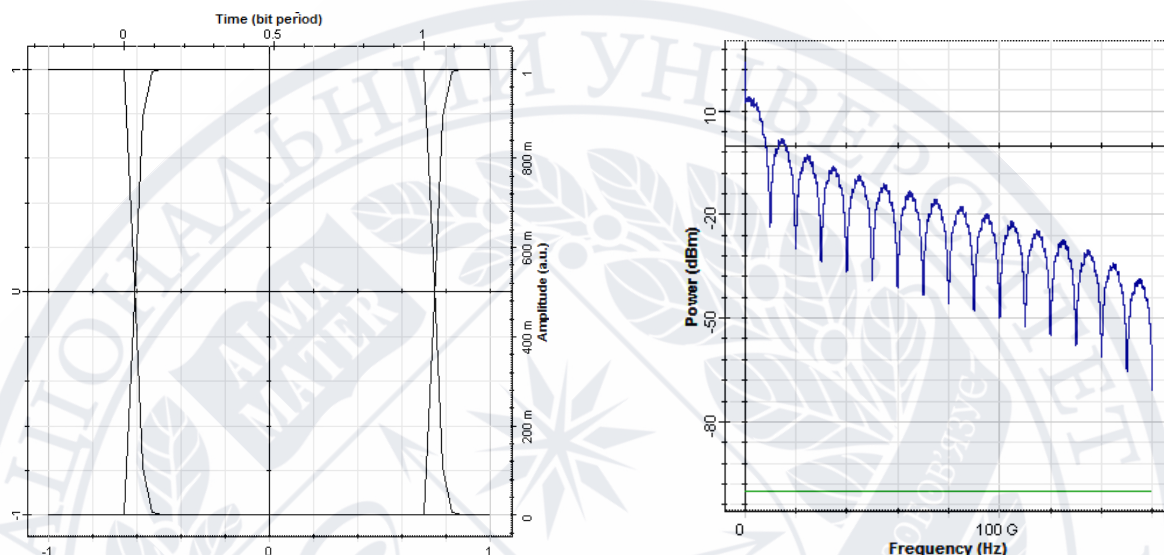


Рис. 3.11- Глазкова діаграма (зліва) і спектр (праворуч) отриманого сигналу

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи «Експериментальне вивчення захищеного каналу оптичного зв'язку» дійшли наступних висновків.

Оптичні системи передачі інформації є одним з найбільш перспективних сучасних напрямків в області техніки зв'язку, увібрали в себе кращі досягнення мікроелектроніки, волоконної оптики, інтегральної оптоелектроніки, фізики і техніки напівпровідників.

Наукові проблеми освоєння оптичного діапазону зв'язку до теперішнього часу, в значній мірі, вирішені і подальший розвиток оптичних систем передачі інформації істотно залежить від рівня і стану технології виробництва оптичних і оптико-електронних компонент таких систем. Це не виключає можливості висунення і реалізаційових ідей в області фізики і техніки оптичних систем передачі інформації, заснованих на досить різноманітні властивості як оптичного випромінювання, так і застосовуваних в таких системах оптичних матеріалів, їх складних композицій і структур.

Проведено аналіз існуючих загроз і атак на безпроводові технології (передавач, приймач і середовище передавання інформації) і побудовано дерево атак на безпроводові мережі.

Для забезпечення змістовності аналізу отриманих результатів в процесі проведення вибору підходів забезпечення інформаційної безпеки були проаналізовані моделі та критерії загроз у безпроводових технологіях і методи оцінки загроз у безпроводових мережах.

Основні результати бакалаврської роботи полягають у наступному:

На основі проведеного порівняльного аналізу застосовуваних і перспективних форматів модуляції в оптичних системах зв'язку виявлено: Амплітудні формати модуляції обмежені по швидкості передачі символів і застосовуються зазвичай на швидкостях до 10 Гбіт / сек. Це пов'язано з впливом межсимвольної і міжканального інтерференції, чірп ефектом джерела

випромінювання. При швидкостях до 40 Гбіт / сек використовуються амплітудні формати, в яких за допомогою VSB фільтрів видаляється частина спектра. Дана особливість викликана придушенням бічних небажаних мод, однак, при довжині лінії зв'язку більше 50 км необхідна повторна фільтрація. При швидкостях понад 40 Гбіт / сек до 100 Гбіт / сек застосовуються багаторівневі фазові формати модуляції QPKS, DP-QPSK, N-QAM, де на один переданий символ доводиться 2 і більше біта інформації.

У середовищі проектування OptiSystem проведено моделювання схеми високошвидкісної передачі даних 100 Гбіт / с з DP-QPSK модуляцією. В результаті моделювання були отримані очей-діаграма, сигнальні сузір'я, осцилограми і спектри сигналу з двуполарізованою квадратурною фазовою маніпуляцією.

Експериментальні дані співпали з відомостями в літературних джерелах. Формат DP-QPSK виявився набагато ефективніше DPSK і простого QPSK. Спектральна ефективність DP-QPSK в два рази перевершує простий QPSK. При використанні кодування 3 біта на символ можна домогтися ще більшої спектральної ефективності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. М.: EXFO, 2001. / Пер. с англ. под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдуллаева, А.В. Шмалько. / Общая редакция А.В. Шмалько, 245 с.
2. С. Н. Артеменко, Г. М. Самойленко, “Коммутация режимов накопления и вывода сверхвысокочастотного электромагнитного излучения в сверхпроводящих резонансных компрессорах с интерференционным переключателем”, Изв. ВУЗов. Радиофизика, Т. 57, № 1, с. 23–34, 2014.
3. С. Н. Артеменко, В. А. Августинovich, В. Л. Каминский, П. Ю. Чумерин, Ю. Г. Юшков, “Анализ процесса формирования радиоимпульсов в сверхразмерном резонаторе с интерференционным ключом”, Радиотехника и Электроника, Т. 42, № 8, с. 1011–1018.
4. А. Л. Вихарев, А. М. Горбачев, О. А. Иванов, В. А. Исаев, С. В. Кузиков, Б. З. Мовшевич, Дж. Л. Хиршфилд, С. Х. Голд, “Активный брэгговский компрессор СВЧ импульсов трехсантиметрового диапазона длин волн”, Изв. ВУЗов. Радиофизика, Т. 51, № 7, с. 597–616, 2008.
5. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах, Теория и практика, 2016 - 516 с.
6. Ю. Ю. Данилов, С. В. Кузиков, В. Г. Павельев, Ю. И. Кошуринов, С.М. Лещинский, “Компрессия микроволновых импульсов квазиоптическим резонатором с гофрированным зеркалом”, Письма в ЖТФ, Т. 27, вып. 19, с. 5–10, 2001.
7. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) Сравнительный анализ устройств для опроса волоконно-оптических датчиков. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) # 7 (16), 2015. с 12.

8. Лапони́на О.Р. Основы сетевой безопасности: криптографические алгоритмы и протоколы взаимодействия / О.Р. Лапони́на. – М., 2005.
9. Манько В.А., Манько А.А. Метод расчета динамических характеристик тонкопленочных оптических фильтров. Зв'язок.- 2010.- №4.- С.42-45.
10. Манько О.О., Марков С.Ю. Новый метод экспериментального моделирования тонкопленочных оптических фильтров . VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» COMINFO'2010-Livadia, 4 – 8 жовтня 2010 року, Зб. тез.С.127-128.
11. Манько А.А., Манько В.А. Особенности фазовых характеристик тонкопленочных оптических фильтров // Проблемы телекоммуникаций: IV міжнародна науково-технічна конференція, 20-23 квітня 2010: тези. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. С. 198.
12. Никульский, И.Е. Технологии PON: взгляд в будущее / И.Е. Никульский, А.А. Филиппов // Вестник связи. 2010. № 2. С. 4–8.
13. Никульский, И.Е. Оптическая сеть переноса системы абонентского доступа АТСЦ-90 / И.Е. Никульский, А.Н. Матяшов // Вестник связи. – 2000. – № 11. С. 58–61.
14. Официальный сайт компании Optiwave // (Engl.). – URL: <https://www.optiwave.com/PP/RC/rc9808.html> [10 May 2017].
15. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Пер. с англ.: Учебное пособие. В 2 т. Т.1 – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. – 784 с.
16. Скляр Б. Цифровая связь. — М.: Издательский дом Вильямс. 2003 — 1104с
17. Яцків В.В. Організація комп'ютерних мереж на основі лазерних активних ретрансляторів // Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу університету. - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. - 1999. – С. 95-96.

18. Alla Abbas Khadir Achieving Optical Fiber Communication Experiments by OptiSystem // International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.6, June- 2014, pg. 42-53.
19. C.E. Baum, "Microwave pulse compression experiments at low and high power", Circuit and Electromagnetic System Design Notes, Note 63, pp. 1–30, January 2010.
20. P. R. Bolton, M. Park, "Microwave pulse compression from a storage cavity with laser induced switching", U. S. Patent 5148129, 1992.
21. O. A. Ivanov, V. A. Isaev, M. A. Lobaev, A. L. Vikharev, J. L. Hirshfield, "A resonance switch employing an explosive-emission cathode for high-power rf pulse compressors", Applied Physics Letters, vol. 97, no. 3 – pp. 031501-1– 031501-3. 2010.
22. S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, "Candela Class High Brightness InGaN/AlGaN Double Heterostructure Blue Light Emitting Diodes", Applied Physics Letters, vol. 64, no. 13, pp. 1687 1689, 1994.
23. J. S. Kim, et al., "White-light Generation Through Ultraviolet-emitting Diode and White-emitting Phosphor", Applied Physics Letters, vol. 85, no. 17, pp. 3696-3698, 2004.
24. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 15.7: "Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light", in IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp. 1-309, Sept. 6, 2011.
25. A.M.J. Koonen, C.W. Oh, K. Mekonnen, Z. Cao, E. Tangdionga, "Ultra-high capacity indoor optical wireless communication using 2D-steered pencil beams", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(20):7482669.
26. Jaesang Cha et al., "A new band plan for IEEE802.15.7m", Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/17/15-17-0174-00-007a-a-new-band-plan-for-15-7m.pdf>.
27. IEEE 802.15.7r1 Short-Range Optical Wireless Communications Task Group.  
[http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802\\_15%20WPAN%2015\\_7%20Revision1%20Task%20Group.htm](http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm).

28. [7] "Multi-Gigabit per Second Optical Wireless Communications (OWC) with Ranges up to 200 meters". <https://development.standards.ieee.org/get-file/P802.15.13.pdf?t=92735500003>.
29. M. Ayyash et al., "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016.
30. D. Schulz et al., "Long-Term Outdoor Measurements Using a Rate-Adaptive Hybrid Optical Wireless/60 GHz Link over 100 m", *Proc. ICTON 2017* (invited).
31. A.M. Khalid et al., "10 Gbps indoor optical wireless communication employing 2D passive beam steering based on arrayed waveguide gratings", *Proc. IEEE Summ. Top., TuC2.3*, Newport Beach (2016).
32. J. Zeng et al., "A 5Gb/s 7-Channel Current-mode Imaging Receiver Front-end for Free-Space Optical MIMO", *Proc. IEEE MWSCAS*, Cancun (2009).
33. Z. Cao et al., "200 Gbps OOK Transmission over an Indoor Optical Wireless Link Enabled by an Integrated Cascaded Aperture Optical Receiver", *Proc. OFC, PDP Th5A.6*, Los Angeles (2017).
34. S. Collins et al., "High gain, wide field of view concentrator for optical communications", *Opt. Lett.*, p. 1756 (2014).
35. [15] A.M. Khalid et al., "Bi-directional 35-Gbit/s 2D Beam Steered Optical Wireless Down link and 5 Gbit/s Localized 60-GHz Communication Uplink for Hybrid Indoor Wireless Systems", *Proc. OFC, Th1E.6*, Los Angeles (2017).
36. Ivica Stevanović, "Light Fidelity (LiFi)", Federal Office of Communications OFCOM Licences and Frequency Management Division Radio Technology Section, December 14, 2016.
37. <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0746-01-007a-tg7r1-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.pdf>.
38. Optical Wireless Communication: options for extended spectrum use, Stratix and Technical University of Eindhoven commissioned by the Dutch

Radiocommunications Agency (Agentschap Telecom) Ministry of Economic Affairs and Climate policy, December 2017.

39. GDD based Automatic Traffic Sign Recognition Using CamCom Technology, IEEE 15 18-0031-00-0vat, 2018. 1.

40. 100 Gbps DP-QPSK System with Digital Signal Processing // (Engl.) – URL: <https://optiwave.com/applications/100-gbps-dp-qpsk-system-with-digital-signal-processing/>

