

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

(позначення документа)

Розробка та дослідження приймально-передавальної системи
оптичного зв'язку в квест-кімнатах

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЕППм 19-1

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»
(повна назва освітньої програми)

Адаменко Є. І.
(прізвище, ініціали)

Керівник проф. Стрілкова Т. О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І. М.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
 Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 171 Електроніка
 Тип програми освітньо-професійна
 Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Адаменку Євгенію Ігоровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ В КВЕСТ-КІМНАТАХ»

затверджена наказом по університету від 06 листопада 2020 р. № 1561Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Довжина хвилі випромінювачів 940 нм, 650 нм

Мінімальна чутливість приймача (ПЗЗ-матриці) 0.01 лк

Мінімальне значення величини відношення сигнал/шум 20

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Огляд сценаріїв квест-кімнат

2. Дослідження факторів, що впливають на передачу оптичного сигналу

3. Моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____
 Презентація (слайди): 1 – Титульний слайд, 2 – Мета та завдання роботи, 3 – Актуальність теми, 4 – Суть і сценарії квесту лазертаг, 5 – Пристрої, що додають ефектів гри, 6 – Вплив перешкод на проходження оптичного сигналу, 7 – Принцип реалізації розробленого методу, 8 – Фізичне моделювання відгуку фотоприймача, 9 – Розрахунок відношення сигнал/шум, 10 – Розрахунок імовірнісних характеристик виявлення, 11 – Імовірнісні характеристики виявлення, 12 – Метод накопичення кадрів, 13 – Висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд	09.11.2020 – 15.11.2020	
2	Дослідження факторів, що впливають на передачу оптичного сигналу	16.11.2020 – 20.11.2020	
3	Моделювання та розрахунки	21.11.2020 – 28.11.2020	
4	Пояснювальна записка	29.11.2020 – 30.11.2020	
5	Підготовка презентації	01.12.2020 – 03.12.2020	
6	Нормоконтроль, перевірка на плагіат	04.12.2020 – 07.12.2020	
7	Рецензування	08.12.2020 – 10.12.2020	
8	Здача роботи	16.12.2020	

Дата видачі завдання 06 листопада 2020 р.

Студент _____
 (підпис)

Керівник роботи _____ проф. Стрілкова Т. О.
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 62 с., 33 рис., 2 табл., 2 додатки, 25 джерел.

ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНА СИСТЕМА, ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК,
ВИДИМЕ ТА ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ, КВЕСТ-КІМНАТА

Об'єкт дослідження – мережа передачі оптичного сигналу в умовах дії зовнішніх завад.

Предмет дослідження – програмно-компонентна частина та алгоритм обміну інформацією по оптичному каналу.

Мета роботи – дослідження та розробка алгоритму обміну інформацією по оптичному каналу в умовах одного зі сценаріїв квест-кімнати.

Метод дослідження – аналіз літератури, комп'ютерне моделювання.

У дипломному проекті зроблено огляд найпопулярніших сценаріїв квест-кімнати лазертаг, технічна основа якого полягає в передачі та прийомі оптичного сигналу, його обробці. Розглянуто фактори, що впливають на безперебійне функціонування приймально-передавальної системи.

Унаслідок виконання роботи розроблено алгоритм передачі та прийому оптичного сигналу в умовах власного сценарію квест-кімнати, доповненого ефектами.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ	
1 КВЕСТ-КІМНАТ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ	8
1.1 Суть і сценарії гри	8
1.2 Конструкція оптичного автомата та жилета	11
1.3 Аналіз структурної взаємодії елементів квест-кімнат	12
1.4 Постановка задачі	15
2 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПЕРЕДАЧУ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ	17
2.1 Вплив перешкод на проходження оптичного сигналу	21
2.2 Дальність передачі оптичного сигналу	22
2.3 Вплив лазерного випромінювання на зір людини	25
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБЛЕНОГО СЦЕНАРІЮ КВЕСТ-КІМНАТИ	27
3.1 Структурна схема та принцип реалізації методу	27
3.2 Розрахунок інтенсивності оптичного випромінювання	31
3.3 Фізичне моделювання відгуку фотоприймача	33
3.4 Розрахунки імовірнісних характеристик виявлення сигналів на тлі завад	37
3.5 Метод стабілізації величини відношення сигнал/шум	41
ВИСНОВКИ	44
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	46
ДОДАТОК А	49
ДОДАТОК Б	50

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- FSO – Free Space Optics, «оптика у вільному просторі»;
- LCD – Liquid Crystal Display, рідкокристалічний дисплей;
- OLED – Organic Light-Emitting Diode, органічний світлодіод;
- ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;
- ІЧ – інфрачервоний;
- ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком.

ВСТУП

Лазертаг (Lasertag) – динамічна тактична гра для великої компанії людей, сім'ї, в якій постріли імітуються інфрачервоним (ІЧ) або видимим променем, а потрапляння фіксується датчиками на тілі гравця. На відміну від пейнтболу це безболісна гра, від якої не залишається неприємних слідів на тілі та синців. Використовуються сучасні технології, що додає видовищності та захвату.

Але за різноманітними сюжетами гри приховується складне технічне забезпечення квесту. Оптичний зв'язок автомату, який випромінює спрямовані, сфокусовані імпульси світла, та пристрою фіксації попадання (пов'язка на голові, жилет, ціль), перемикання режимів автомату, збір інформації про попадання (ведення статистики) та відстеження місцезнаходження – все це потребує налаштування та перевірки для комфортного проведення часу гравцями.

Дана робота сконцентрована на дослідженні приймально-передавальної системи оптичного зв'язку в квест-кімнатах та удосконаленні її в умовах дії завад.

Результати атестаційної роботи магістра опубліковані у збірнику міжнародної наукової конференції SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT. Technics and technology.#34 Paris 30.10.2020 – 31.10.2020. URL: http://конференция.com.ua/files/106_07_xi_2020_s.pdf С. 45–47.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ КВЕСТ-КІМНАТ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Суть і сценарії гри

Як і більшість квест-кімнат лазертаг має певні сюжети, що ґрунтуються на популярних комп'ютерних іграх або кінофільмах. Усі дії відбуваються у спеціально побудованому лабіринті в умовах обмеженої видимості або на будь-якому природному майданчику. Перед гравцями ставиться ряд задач, від комплексного рішення яких залежить результат. На рис. 1.1 гравець лазертаг в обмундируванні.



Рисунок 1.1 – Обмундирування гравця

Лазертаг має багато різних сценаріїв гри. Найбільш цікаві представлені нижче.

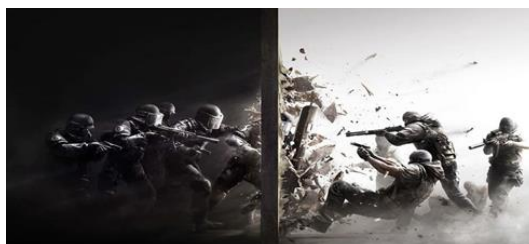


Рисунок 1.2 – Уявне зображення сценарію «Стіна на стіну»

Бій «стіна на стіну» (рис. 1.2). Гравці розбиваються на дві команди. Мета – знищити всіх гравців команди супротивника. Дві протиборчі команди б'ються до повного знищення однієї з них. Така сутичка називається раундом, їх проводиться певна кількість.



Рисунок 1.3 – Уявне зображення сценарію «Захоплення прапора»

Захоплення прапора (рис. 1.3) – один з найбільш «живих» сценаріїв лазертаг. Учасники поділяються на дві рівні команди і розходяться на свої бази, де знаходиться аптечка і прапор. Завдання – захопити прапор супротивника і принести його на свою базу.



Рисунок 1.4 – Уявне зображення сценарію «Термінатор»

Сценарій «Термінатор» (рис. 1.4) за мотивами відомого кінофільму. Люди зі звичайною кількістю патронів і життів проти людиноподібної машини знищення, що має велику кількість патронів і життів. Гра ведеться на

обмеженій території. Ціль – знищити термінатора, зазнавши якнайменших втрат [1].



Рисунок 1.5 – Генератор туману та стробоскоп

Крім самого по собі захоплюючого сценарію, більшої реалістичності та особливої атмосфери грі надають пристрої, що штучно погіршують видимість – це різноманітні генератори туману або диму, стробоскопи (рис. 1.5). В такому середовищі лазерний промінь при пострілі стає схожий на постріл з бойової зброї трасуючими набоями.

Візуальні димові ефекти створюють за допомогою дим-машин, що мають певну механічну конструкцію. Застосовуються рідини різних складів. У більшості випадків генератори функціонують на воді (іноді з комбінацією гліцеринового спирту). Також замість води використовується етиленгліколь. Створення ефектів відбувається шляхом атомізації або випаровування рідин (розпилення її на дрібні частки). Можна створити легкий або важкий дим, туман. Пристрій дуже простий і складається з декількох елементів: резервуару з рідиною, помпи і нагрівального елементу (термоблока) з термозапобіжником. Помпа качає і подає рідину з резервуара в термоблок з трубчастим електронагрівачем, де вона випаровується і виштовхується з сопла у вигляді диму. Термозапобіжник захищає нагрівальний елемент від перегріву. Також для підтримки потрібної температури грубки можуть використовувати термостат або термопару [2].

Ще один цікавий момент створюють стробоскопи. Вони дуже доречно розташовані на локаціях, їх спалахи тимчасово дезорієнтують гравців, ніби

поруч вибухнув снаряд. Принцип роботи приладу полягає в тому, що короткі спалахи світла виникають з частотою, запрограмованою користувачем, і промені фіксують предмети на короткий проміжок часу, створюючи ефект їх нерухомості. Найпростіший стробоскоп складається з корпусу, в якому знаходяться діоди, мікросхема, блок живлення, потенціометр і з'єднувальні дроти.

1.2 Конструкція оптичного автомата та жилета

Конструкція автомата являє собою муляж бойової зброї. Основними елементами є дуло, де розміщена оптична система для фокусування ІЧ-променя та імітації спалаху пострілу, динамік для голосових повідомлень, імітації звуків пострілу, осічки, перезарядки та іншого, приціл, датчики потрапляння, екран для візуалізації різноманітної інформації про перебіг гри та приймач оптичного сигналу (розміщується в залежності від сценарію гри).

До конструкції жилета та пов'язки на голові (рис. 1.6) висуваються такі вимоги:

- наявність одного або декількох датчиків;
- датчик повинен спрацьовувати тільки на потрапляння лазерного променя, виключаючи похибки від засвічення бічним випромінюванням, джерелом природного освітлення або стробоскопічними ефектами;
- світлова або звукова індикація потрапляння.



Оптичний датчик у корпусі об'єднаний з індикаторами влучання

Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд жилету та пов'язки

Нагрудний жилет схожий на звичайний бронежилет, але набагато легший та еластичніший. У ньому досить зручно пересуватися і різко змінювати траєкторію рухів. На жилеті розміщені оптичні датчики (їх кількість і місце розташування залежать від сюжету гри) і пристрої самого жилета. Навколо датчика або в одному корпусі з ним розміщені світлові індикатори, які спалахують відповідним кольором, ідентифікуючи потрапляння в певну область жилета (рис. 1.7) [3].

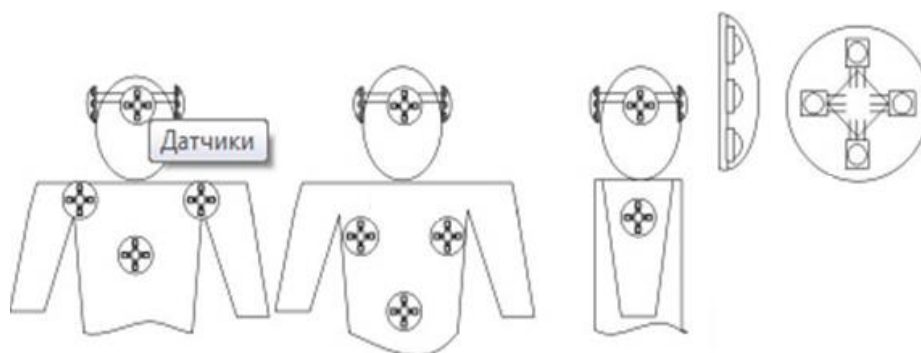


Рисунок 1.7 – Варіанти розміщення датчиків на жилеті та пов'язці

1.3 Аналіз структурної взаємодії елементів квест-кімнат

Квест-кімната являє собою приміщення, обладнане відповідно до сценарію гри. Діючі персонажі – це гравці команд. Кожен гравець озброєний оптичним ігровим автоматом, жилетом та головною пов'язкою, що виконують роль мішені. На жилеті і пов'язці розміщені один або кілька датчиків – приймачів ІЧ-випромінювання, а також звукові і світлові сигнали влучання в мішень. При «пострілі» з оптичного автомата в суперника, оптичне випромінювання від ІЧ-світлодіода потрапляє на приймач мішені, тим самим передається пакет даних по ІЧ-протоколу в якому містяться дані ідентифікації про те, хто вистрілив. Даний пакет сигналу обробляється платою, сигналізуючи про влучання.

Повний алгоритм роботи наступний:

1. Постріл – передача оптичного сигналу від зброї до мішені;
 2. Влучання – передача сигналу про влучання від мішені на сервер, фіксація влучання. Передача сигналу про влучання на зброю стрілка;
 3. Промах – сигналу від мішені немає. Очікування відповіді зброєю.
- Після закінчення певного часу можливо повідомлення про невлучання.
4. Обробка на сервері статистики на підставі отриманих сигналів від зброї і мішеней.

Вище описаний алгоритм роботи є базовим для більшості квест-кімнат подібної тематики.

Технічні можливості сучасного лазертагу вражають. Налаштування обладнання та управління грою проводиться пультом дистанційного керування, а також за допомогою програм, встановлених на комп'ютер або телефон, які дозволяють знімати і демонструвати статистику ігрових подій.

В залежності від бажань гравця оптичний автомат (тагер) може комплектуватися LCD (рис. 1.8) або OLED (рис. 1.9) екраном, прицілом, пристроєм імітації віддачі, різноманітними датчиками. На екранах відображається вся інформація про стан гри.

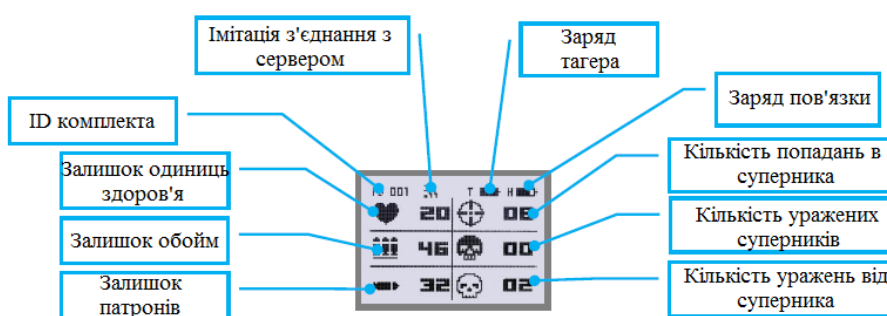


Рисунок 1.8 – Головне меню LCD екрана

Під час гри екран реагує практично на всі події, що відбуваються з комплектом. По закінченню ігрового раунду на екрані виводиться статистика.

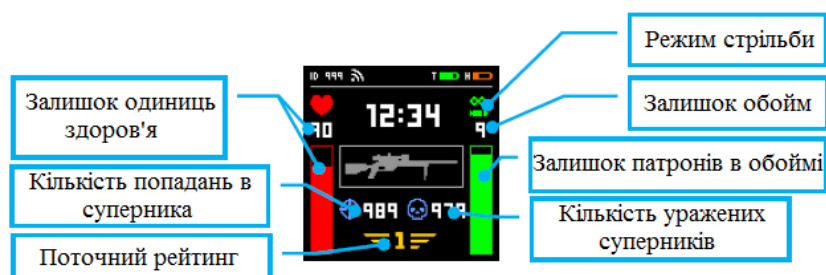


Рисунок 1.9 – Головне меню OLED екрана

Окрім стандартного набору кожен сценарій потребує додаткового обладнання. Це може бути контрольна точка (рис. 1.10), універсальні станції, різні бомби та міни.

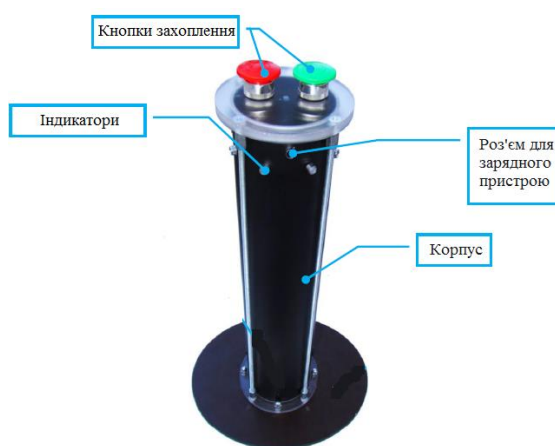


Рисунок 1.10 – Додаткове обладнання квесту

Незважаючи на велике різноманіття сценаріїв та технічних можливостей, лазертаг має недоліки, пов'язані з роботою обладнання:

- на коротких дистанціях не цілячись можна потрапити в датчик суперника;
- на далекій відстані можна потрапити в декілька датчиків одночасно;
- має місце відбиття променя від предметів навколо;
- проблеми взаємодії автомата з іншим обладнанням [3].

1.4 Постановка задачі

З урахуванням усіх вищеописаних сценаріїв гри та особливостей передачі оптичного сигналу було вирішено створити власний цікавий сценарій із застосуванням спецефектів, які ускладнюють гру; створити алгоритм передачі оптичного сигналу від гравців до гравців, мішеней в умовах поганої видимості та туману.

Відповідно до сценарію (рис. 1.11) група людей повинна пройти по лабіринту в умовах низької видимості, щоб знайти вихід або ціль. По периметру приміщення та на кожному гравцеві команди розміщені спеціальні контрольні точки (мітки). За допомогою оптичного передавача (лазера) в руках гравець знаходить ці точки для правильного переміщення по лабіринту. Використовується принцип далекоміра. Відстань до мітки відображається на екрані автомата. Таким же методом можна визначити відстань до партнера, якщо той загубився. Для більшої захопливості гра ускладнюється раптовою появою туману, який спантеличує гравця та заважає передачі оптичного сигналу.



Рисунок 1.11 – Уявне зображення сценарію «Лабіринт»

Втілити задачу можливо за допомогою двох випромінювачів (ІЧ-лазера, імпульсного лазерного діода червоного кольору) та двох приймачів (ПЗЗ-матриць).

Висновок. У сучасних іграх та розвагах все більше і більше застосовується високотехнологічне обладнання. Лазертаг цьому доказ. Різноманіття сценаріїв та гаджетів вражає. Обмін інформацією по оптичному каналу та його обробка – основа квесту. Але функціонування цих процесів, при зміні оточуючих факторів, може ускладнитися або навіть зупинитися. Щоб цього не сталося, треба розібратися з усіма причинами, що впливають на передачу оптичного сигналу.

2 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПЕРЕДАЧУ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

Способи передачі оптичних сигналів, даних і команд управління різні. В загальному вигляді приймально-передавальна система складається із трьох компонентів: передавач, канал зв'язку, приймач (рис. 2.1). Сигнал може передаватися по оптичному кабелю (волоконно-оптична лінія зв'язку – ВОЛЗ) та у повітрі (бездротові оптичні комунікації, Free Space Optics – FSO).



Рисунок 2.1 – Узагальнена схема приймально-передавальної системи оптичного сигналу

Джерелом світла, що розповсюджується по оптичним кабелям, є світлодіод (або напівпровідниковий лазер). На іншому кінці кабелю детектор перетворює світлові сигнали в електричні. Волоконна оптика спирається на особливий ефект – заломлення при максимальному куті падіння, коли має місце повне відображення (рис. 2.2). Це явище відбувається в тому випадку, коли промінь світла виходить із щільного середовища і потрапляє в менш щільне середовище під певним кутом. Внутрішня жила (нитка) оптоволоконного кабелю має більш високий показник заломлення, ніж оболонка. Тому промінь світла, проходячи по внутрішній жилі, не може вийти за її межі через ефект повного відображення. Таким чином, сигнал, що транспортується, йде всередині замкнутого середовища, проходячи шлях від джерела сигналу до його приймача. Інші елементи кабелю лише оберігають волокно від пошкоджень зовнішнім середовищем різної агресивності [4].

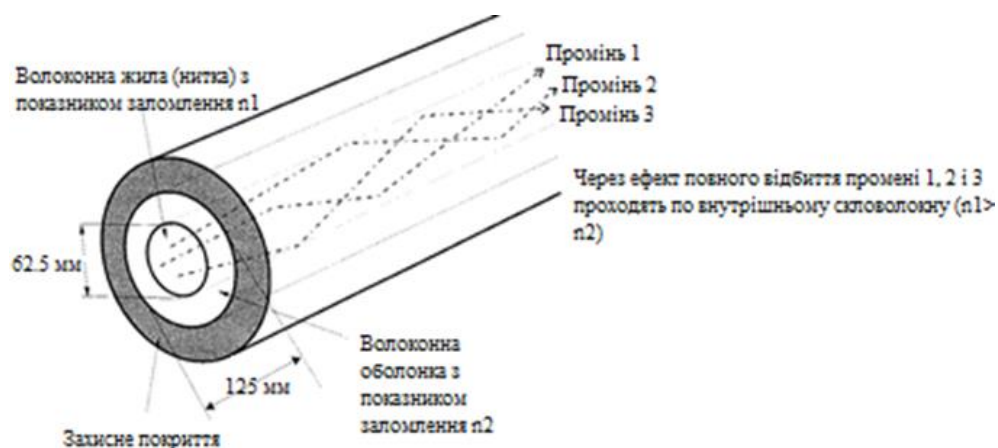


Рисунок 2.2 – Волоконна оптика ґрунтується на ефекті повного відображення

На передачу сигналу по ВОЛЗ не впливають навколишні фактори, але впливає стан каналу зв'язку (оптичного кабелю). Втрати при проходженні світла в оптичному волокні зумовлені низкою факторів, які можна класифікувати як зовнішні і внутрішні.

Зовнішні:

- втрати за рахунок вигинів;
- втрати на стику і у з'єднувачі.

Внутрішні:

- втрати самого волокна;
- втрати, що виникають при виготовленні волокна;
- френелівське відбиття.

Щоб уникнути пошкоджень волокна, потрібно дотримуватися рекомендацій виробника, де вказано мінімальний радіус вигину.

Основними перевагами використання волоконної оптики є:

- широка смуга пропускання (до декількох ГГц);
- несприйнятливості до електричних перешкод;
- низькі втрати при передачі сигналу;
- не викликає перешкод в сусідніх кабелів;
- велика дальність передачі;

- підвищена безпека передачі даних;
- гарна якість сигналу, що передається;
- мініатюрний і легкий кабель.

Недоліки ВОЛЗ:

- велика вартість обладнання;
- складність відновлення зв'язку в випадках обриву лінії;
- складна технологія виготовлення волокна;
- крихкість волокна [5].

Таким чином, використання ВОЛЗ у запропонованому сценарії квесту лазертаг, де застосовуються додаткові ефекти, було б гарним рішенням, адже ця технологія не сприятлива до навколишніх перешкод. Але це спровокувало б значні затрати на обладнання та незручності у грі (кабелі заважатимуть вільно пересуватися гравцям). Тому застосовуються бездротові оптичні комунікації.

У системах FSO (рис. 2.3) використовуються інфрачервоні лазери, які генерують світло в діапазоні близько 200 ТГц, що відповідає довжині хвилі порядку 1 мкм. Найчастіше використовується одна із двох довжин хвиль: 850 (на відстанях до 100 м) або 1550 нм (на великій відстані).



Рисунок 2.3 – Бездротові оптичні комунікації

Переваги FSO полягають у наступному:

- не використовують радіодіапазон і не створюють перешкод в радіочастотному спектрі;

- простота установки і підключення;
- повна пропускна здатність каналу;
- близька до нуля затримка в каналі;
- відсутнє принципове обмеження на швидкість передачі;
- висока закритість каналу.

До головних недоліків технології FSO відносяться:

- залежність доступності каналу зв'язку від погодних умов;
- необхідність забезпечення прямої видимості між випромінювачем і приймачем [6].

Найбільше застосування для оптичного зв'язку має діапазон, який називають ближньою інфрачервоною зоною (0.8-1.675 мкм). Його використання обумовлене двома факторами: по шкалі енергій цей діапазон відповідає ширині забороненої зони ряду напівпровідників, тобто кванти такого випромінювання можуть породжуватися і поглинатися з іонізацією лише валентних електронів; цей діапазон відрізняється найбільшою прозорістю в таких середовищах поширення хвиль як скловолокно і повітряна атмосфера. Отже, існує можливість виготовлення ефективних напівпровідникових приладів і узгодження їх із середовищами передачі.

Для волоконних світловодів з поліпшеними характеристиками визначені оптичні діапазони хвиль передачі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Оптичні спектри поліпшеного скловолокна [7]

О-діапазон	1260-1360 нм	Основний
Е-діапазон	1360-1460 нм	Розширений
S-діапазон	1460-1530 нм	Короткохвильовий
С-діапазон	1530-1565 нм	Стандартний
L-діапазон	1565-1625 нм	Довгохвильовий
U-діапазон	1625-1675 нм	Наддовгий

2.1 Вплив перешкод на проходження оптичного сигналу

У лазера видно промінь тільки через наявність атмосфери (середовища), крапельок води в ній, пилу та інших частинок. Світло від лазера розсіюється на цих мікроскопічних частинках і потрапляє до нас в око. В ідеально чистому просторі, вакуумі, незалежно від того, яка потужність у лазера, промінь не буде видно. У космосі ми не побачимо лазерного променя. Таким чином, яскравість променя, по-перше, залежить від того, наскільки чисте повітря і, по-друге, від потужності і кольору лазера.

Повне ослаблення світла в атмосфері зумовлено декількома факторами. Розрізняють ослаблення світла у вільній від хмар, туману атмосфері і ослаблення світла в тумані. Молекули газів і водяної пари мають електронну, коливальну і обертальну енергії. При випромінюванні або поглинанні кванта електромагнітних коливань певної частоти стрибком змінюються рівні цих енергій. Поглинання такого роду, що спостерігається у вузькій смузі частот, називається селективним поглинанням. Смугу частот, в якій відбувається поглинання, називають лінією поглинання.

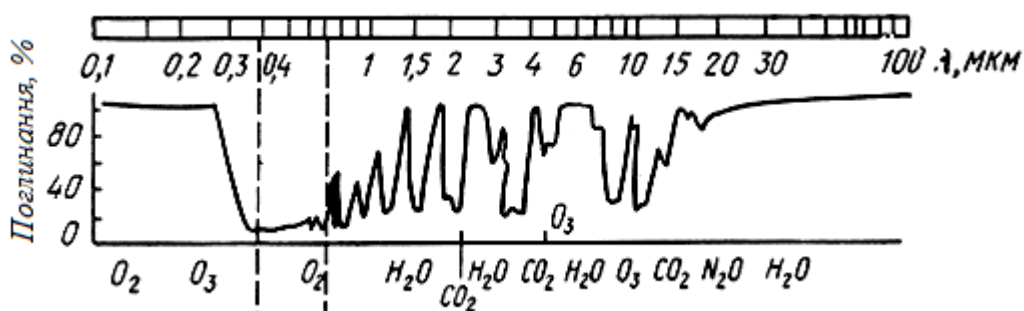


Рисунок 2.4 – Розподіл поглинання енергії спектра атмосферними газами

Селективне поглинання особливо характерно для ІЧ-діапазону. На рис. 2.4 показано розподіл поглинання енергії різного спектра атмосферними газами, виміряний для діапазону хвиль 0,1-100 мкм. На рисунку вказані гази, що зумовлюють поглинання на окремих ділянках спектра.

Відношення сигнал/шум є показником якості та основною характеристикою передачі сигналу для будь-якої системи. Очевидно, що чим більше відношення сигнал/шум, тим краще працює система або пристрій. Розрахувати відношення сигнал/шум можна за допомогою формули 2.1:

$$\varphi = \frac{\bar{X}_c}{\sigma_{ш}}, \quad (2.1)$$

де \bar{X}_c – середнє значення сигналу;

$\sigma_{ш}$ – середньоквадратичне відхилення шуму [8] [9].

2.2 Дальність передачі оптичного сигналу

Дальність променя – величина, що показує, на якій відстані людина ще здатна впевнено розрізнити світло від лазера. Яскравість світла від лазера зменшується з відстанню внаслідок двох причин: розходження променя і розсіювання в атмосфері. Оскільки видимість променя визначається станом середовища, в якій він поширюється, то дальність променя, перш за все, залежить від самого середовища, наскільки воно прозоре/непрозоре. У другу чергу дальність залежить від потужності і розбіжності променя. Дальність променя розраховується без урахування розсіювання в атмосфері. В ідеально прозорому середовищі (або вакуумі) світло лазера буде поширюватися нескінченно далеко.

Світлові та ІЧ-хвилі, падаючи на молекули й атоми газу, приводять їх в коливальний і обертальний рух. Оскільки розміри молекул малі в порівнянні з довжиною хвилі, вони перевипромінюють енергію як елементарні випромінювачі. Завдяки тепловому руху молекул немає фазової залежності між вторинним випромінюванням окремих молекул. Тому молекули можна розглядати як незалежні випромінювачі і вважати, що випромінювання від усіх

молекул пропорційно числу розсіюючих частинок. Явище розсіювання призводить до ослаблення потужності, переданої в заданому напрямку.

Коефіцієнт ослаблення обернено пропорційний четвертій степені довжини хвилі. Отже, цей вид ослаблення значно менше проявляється в інфрачервоному діапазоні, ніж в світловому. Енергія розсіяного світла розподіляється в просторі нерівномірно: найбільша частина енергії розсіюється в прямому і зворотному напрямках.

Кількість випромінювання, яке потрапить на фоточутливу матрицю залежить від граничної освітленості E_n :

$$E_n = \frac{\varphi \cdot \Phi_e \cdot K(\Delta f) \cdot K_e}{A_{вх} \cdot K_p}, \quad (2.2)$$

де K_p – коефіцієнт використання приймачем випромінювання об'єкта з врахуванням ослаблення середовищем й деталями оптичної системи;

K_e – коефіцієнт використання приймачем випромінювання джерела;

φ – відношення «сигнал/шум»;

Φ_e – пороговий потік приймача по випромінюванню еталонного джерела на одиницю полоси частот;

$A_{вх}$ – площа вхідного зрачка об'єктива;

$K(\Delta f)$ – коефіцієнт, враховуючий змінення частоти модуляції і ширини полоси підсилювача з еталонними умовами вимірювання [8] [9].

Для електромагнітних хвиль також має місце ефект Доплера. Ефектом Доплера називають зміну частоти хвиль, що реєструються приймачем, яка відбувається внаслідок руху джерела цих хвиль і приймача. Джерело, рухаючись до приймача, ніби стискає пружину – хвилю (рис. 2.5).

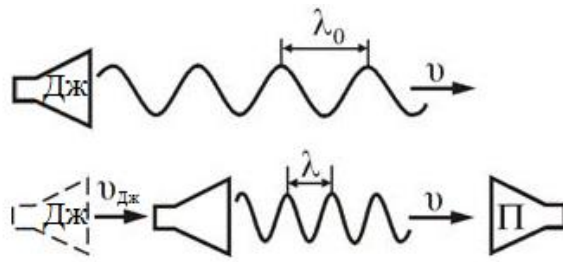


Рисунок 2.5 – Ефект Доплера

Співвідношення, яке описує ефект Доплера для електромагнітних хвиль у вакуумі, з урахуванням перетворень Лоренца, має вигляд:

$$v = \frac{v_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}}{1 + (v / c) \cos \theta}. \quad (2.3)$$

Якщо джерело рухається щодо приймача уздовж прямої, яка їх поєднує, то спостерігається поздовжній ефект Доплера. У разі зближення джерела і приймача:

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + v / c}{1 - v / c}} > v_0, \quad (2.4)$$

а в разі їх взаємного віддалення:

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 - v / c}{1 + v / c}} < v_0. \quad (2.5)$$

Крім того, з релятивістської теорії ефекту Доплера можливе існування поперечного ефекту, що спостерігається в тих випадках, коли джерело рухається перпендикулярно лінії спостереження [10]:

$$v = v_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2} < v_0. \quad (2.6)$$

2.3 Вплив лазерного випромінювання на зір людини

Лазерне випромінювання у видимому та інфрачервоному діапазоні 400 – 1400 нм часто називають небезпечним для сітківки діапазоном. Рогівка, кришталік і склоподібне тіло прозорі для світла цих довжин хвиль, світлова енергія поглинається сітківкою. Ураження сітківки виникає в результаті теплових або фотохімічних процесів.

Фотохімічні пошкодження рецепторів сітківки можуть погіршити або загальну світлочутливість або кольорочутливість очей, а ІЧ-хвилі можуть викликати утворення катаракти кришталіка. При поглинанні оком значної кількості енергії лазерного випромінювання найбільш імовірний тепловий опік, при якому світло, що поглинається гранулами меланіну пігментованого епітелію, перетворюється в тепло. Під опіком ІЧ-випромінюванням ми розуміємо теплову денатурацію білка. Денатурацією називається руйнування природної макроструктури білка. Первинна структура при денатурації зберігається. У денатурованих білків знижується розчинність, а головне – зникає біологічна активність. Вплив променя на білкову тканину точковий. Енергія не встигає рівномірно розподілятися у сусідні біотканини, в результаті чого відбуваються локальні нагрівання невеликих областей.

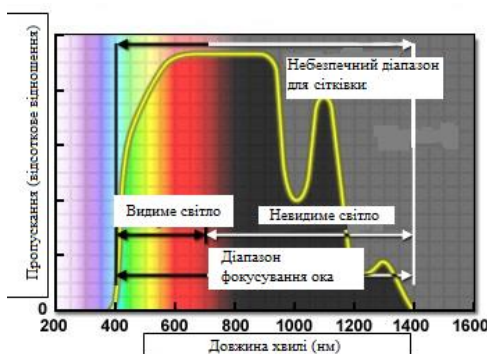


Рисунок 2.6 – Спектр випромінювання різних довжин хвиль

Імовірність ураження очей випромінюванням видимого діапазону лазерів відносно малої потужності скорочується завдяки рефлексу моргання, що допомагає відвести погляд від яскравого променя. Якщо енергії пучка досить для пошкодження ока менше ніж за 0.25 секунди, цей природний захисний механізм стає неефективний, до того ж він абсолютно даремний в невидимому ближньому інфрачервоному діапазоні від 700 до 1400 нм. На рис. 2.6 наведено довжини хвиль і відповідність їм певного діапазону випромінювання.

Існують малопотужні лазери, що генерують видиме випромінювання – це клас 2М. Яскравість пучка повинна бути такою, щоб попередити досить тривале опромінення очей і можливість пошкодження сітківки. Допустима потужність випромінювання цих лазерів не перевищує 1 мВт, що нижче максимально допустимого рівня опромінення для миттєвого імпульсу в 0.25 секунди і менше. Вважається, що природний рефлекс моргання на світло цієї яскравості повинен захистити очі, але будь-яке навмисне спостереження такого випромінювання протягом тривалого часу може завдати шкоди [11].

Висновок. Значний вплив атмосферних явищ на бездротові оптичні комунікації не дає спокою інженерам та робить технологію менш популярною (у порівнянні з ВОЛЗ). Тому доводиться експериментувати з різними спектрами випромінювання, щоб потрапити у «вікна прозорості». Ці факти також ускладнюють можливість повноцінно використовувати різні ефекти у квест-кімнатах лазертагу, які б додали видовищності грі. Щоб розібратися у цій проблемі, потрібно провести розрахунки та моделювання для різних довжин хвиль; проаналізувати, як зміняться параметри променя в умовах дії перешкоди. При моделюванні слід враховувати, що гравець постійно рухається, перешкода з'являється миттєво. Тому важливо створити таку структурну схему, яка б містила блок розрахунку характеристик прийнятих сигналів по певним параметрам. Цей блок має швидко реагувати на зміни, щоб сюжет проходив без затримок.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБЛЕНОГО СЦЕНАРІЮ КВЕСТ-КІМНАТИ

Математичне моделювання полягає у створенні математичної моделі кадрів, отриманих матрицями, які приймають випромінювання, аналізі відношення сигнал/шум для кожного кадру та застосуванні методу зміни приймача, коли відношення сигнал/шум стає критично малим. Використовуються програми Microsoft Excel 2010 та Mathcad15.

3.1 Структурна схема та принцип реалізації методу

З технічної точки зору робота описаного в першому розділі сценарію полягає в передачі та прийомі оптичного випромінювання в умовах дії джерела перешкоди. Цим наш сценарій відрізняється від існуючих. Максимальний рівень візуальних ефектів додає реалістичності та напруженості грі. Схема зображена на рис. 3.1. Передавач, приймач та система обробки інформації знаходяться в одному корпусі. На канал зв'язку діє перешкода (не постійно, а несподівано). Точкою потрапляння оптичного сигналу є відбивач, який відображає його на приймач.

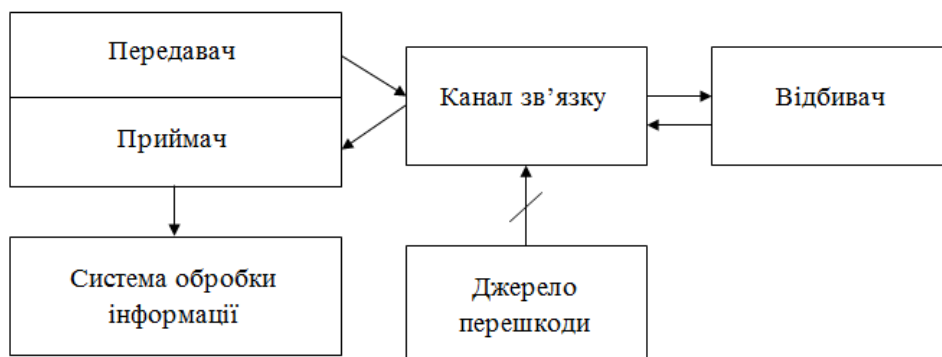


Рисунок 3.1 – Схема передачі/прийому оптичного випромінювання

Реалізувати запропонований сценарій гри можливо за допомогою структурної схеми, зображеної на рис. 3.2.

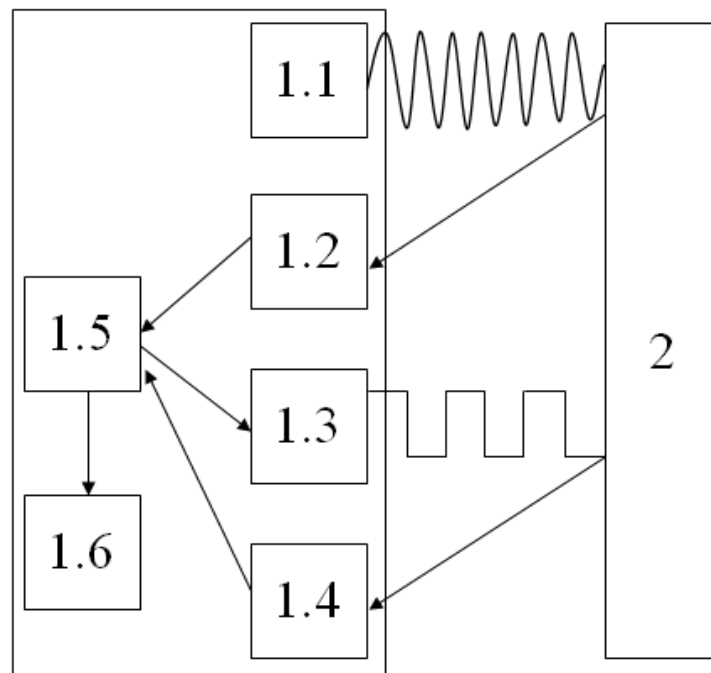


Рисунок 3.2 – Структурна схема реалізації розробленого методу

Гравець, рухаючись по лабіринту, тримає у руках автомат (1), у якому знаходиться передавач, приймач, система обробки та відображення інформації. Передавач складається з двох оптичних випромінювачів. Перший – ІЧ-лазер (940 нм TSAL6100), який найчастіше використовується у подібних квестах, безперервно випромінює сигнал (1.1). За допомогою цього променя гравець знаходить мітки по лабіринту (або мітки на партнері, якщо той загубився). На кожній із міток розміщено катафот (2), який відбиває промінь світла у напрямку джерела з мінімальним розсіюванням. Відображений промінь потрапляє на ПЗЗ матрицю (1.2) приймача та фіксується кількістю засвічених пікселів. Уся інформація потрапляє в блок розрахунку характеристик прийнятих сигналів по критерію величини відношення сигнал/шум, ймовірностей правильного виявлення та появи помилкової відмітки (1.5). Оброблена інформація відображається на дисплеї (1.6).

Миттєва поява туману у квесті ускладнює гру, адже найдрібніші частинки водяної пари поглинають частину (близько 50%) енергії випромінювання даної довжини хвилі. Блок 1.5, що налаштований на мінімальне значення сигнал/шум 20, не фіксує потрібну потужність променя, необхідну для визначення відстані до мітки або просто її наявності. Щоб подолати цю проблему, від блоку 1.5 надходить команда вмикатися другій частині передавача (1.3) – лазерному діоду (клас 2M), який подає короткі імпульси у напрямку відбивача (мітки). Поглинається невелика частина енергії цієї довжини хвилі. Зворотній шлях променя ідентичний, але в якості приймача інша матриця (1.4).

Характеристики лазерного діода U-LD-650543A:

- довжина хвилі – 650 нм;
- конструкція: TO-18 (діаметр 5,6 мм), без скляної кришки, PD;
- потужність випромінювання – 5 мВт;
- робоча температура – $-35 \dots 60^{\circ}\text{C}$;
- максимальна напруга живлення – DC 5 В.

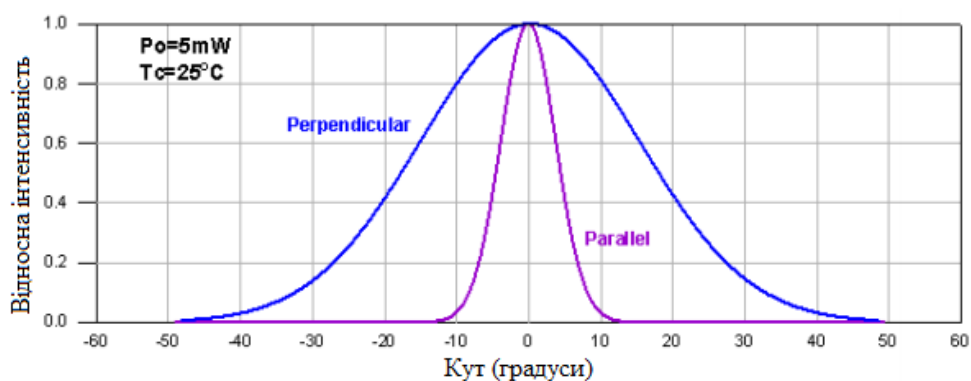


Рисунок 3.3 – Діаграма спрямованості лазерного діода U-LD-650543A [12]

Характеристики інфрачервоного діода TSAL6100:

- довжина хвилі – 940 нм;
- конструкція: діаметр 5 мм;
- потужність випромінювання – 210 мВт;

- робоча температура – $-55 \dots 100^{\circ}\text{C}$;
- пряма напруга – $I_F = 100 \text{ mA}$, $t_p = 20 \text{ ms}$ – 1.6 V
 $I_F = 1 \text{ A}$, $t_p = 100 \text{ }\mu\text{s}$ – 3 V .

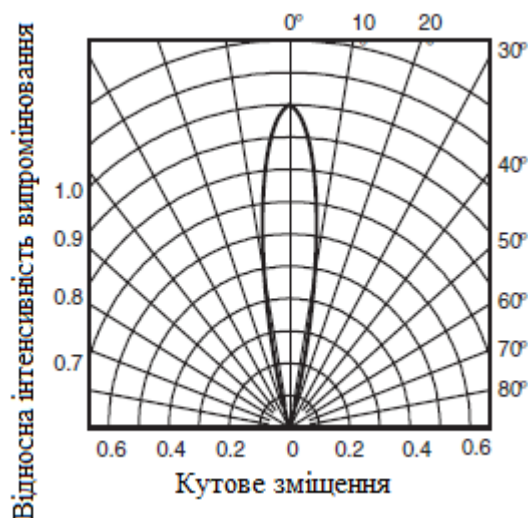


Рисунок 3.4 – Діаграма спрямованості інфрачервоного діода TSAL6100 [13]

Характеристики першого приймача:

- тип матриці – Hikvision 1/2.7" Progressive Scan CMOS;
- максимальна роздільна здатність – 2688×1520 ;
- розмір пікселя – 17 мкм ;
- мінімальна чутливість – 0.0089 люкс ;
- живлення – DC 12В ;
- споживання – 7.5 Вт [14].

Характеристики другого приймача:

- тип матриці ПЗЗ – Sony ICX-404AL, 1/3";
- число активних елементів – 510×492 ;
- розмір пікселя ПЗЗ – $9.6 \text{ мкм} \times 7.5 \text{ мкм}$;
- мінімальна робоча освітленість – $0,01 \text{ люкс}$;
- максимальна робоча освітленість – 30000 люкс ;
- струм 80 mA , напруга живлення $5 \text{ В} \pm 2\text{В}$ [15].

3.2 Розрахунок інтенсивності оптичного випромінювання

Розраховали кількість фотонів кожної довжини хвилі, що падає на поверхню матриці.

Енергія кванта:

$$Q(650 \text{ нм}) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{650 \cdot 10^{-9}} = 3.06 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \quad (3.1)$$

де h – стала Планка;

c – швидкість світла;

λ – довжина хвилі.

Число фотонів в потоці потужністю 1 Вт за 1 с при $\lambda = 650$ нм:

$$N_{[1 \text{ Вт}]} = \frac{1}{Q} = 33 \cdot 10^{17} \text{ фот / с} \quad (3.2)$$

та в потоці потужністю 1/683 Вт:

$$N_{[1/683 \text{ Вт}]} = 33 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{683} = 4.8 \cdot 10^{15} \text{ фот / с}. \quad (3.3)$$

При умові, що потік падає на площу 1 м^2 , щільність фотонів:

$$N(650 \text{ нм}) = 4.8 \cdot 10^{15} \text{ фот / с}. \quad (3.4)$$

Використовуючи характеристики другого приймача, розраховали площу пікселя:

$$S_{\text{pix}} = 9.6 \cdot 10^{-6} \cdot 7.5 \cdot 10^{-6} = 72 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2. \quad (3.5)$$

Отримуємо число фотонів, що падає на піксель за час накопичення 20 мс:

$$N_{\text{pix}}(650 \text{ нм}) = N(650 \text{ нм}) \cdot S_{\text{pix}} \cdot t_{\text{н}} = 4.8 \cdot 10^{15} \cdot 72 \cdot 10^{-12} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 6912 \text{ фот.} \quad (3.6)$$

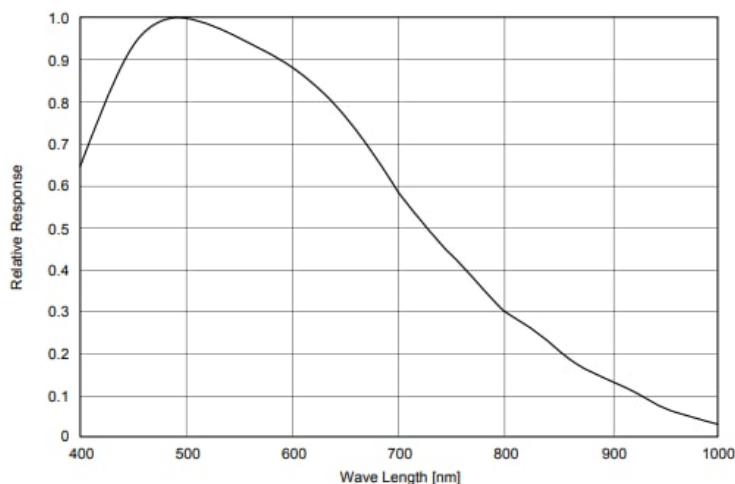


Рисунок 3.5 – Характеристика спектральної чутливості матриці Sony ICX-404AL [15]

Використовуючи характеристику спектральної чутливості першого приймача (рис. 3.5), можна визначити квантову ефективність матриці, що відповідає довжині хвилі $\lambda = 650$ нм. Вона рівна ≈ 0.75 . Розрахували середнє число електронів, що накопичуються в одній комірці за 20 мс:

$$N_{[\text{el}]_{\text{pix}}} = 6912 \cdot 0.75 = 5184 \text{ електронів.} \quad (3.7)$$

Для джерела випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 940$ нм отримано:

$$Q(940 \text{ нм}) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{940 \cdot 10^{-9}} = 2.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \quad (3.8)$$

$$N_{[1 \text{ Вт}]} = \frac{1}{Q} = 47 \cdot 10^{17} \text{ фот} / \text{с} \quad (3.9)$$

$$N_{[1/683 \text{ Вт}]} = 47 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{683} = 6.88 \cdot 10^{15} \text{ фот} / \text{с} \quad (3.10)$$

$$N(940 \text{ нм}) = 6.88 \cdot 10^{15} \text{ фот} / \text{с} \quad (3.11)$$

$$S_{\text{pix}} = 17 \cdot 10^{-6} \cdot 17 \cdot 10^{-6} = 289 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{pix}}(940 \text{ нм}) &= N(940 \text{ нм}) \cdot S_{\text{pix}} \cdot t_{\text{н}} = \\ &6.88 \cdot 10^{15} \cdot 289 \cdot 10^{-12} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 39766 \text{ фот.} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Квантова ефективність матриці Hikvision 1/2.7" Progressive Scan CMOS для $\lambda = 940 \text{ нм}$ рівна ≈ 0.7 .

$$N_{[\text{el}]\text{pix}} = 39766 \cdot 0.7 = 27836 \text{ електронів.} \quad (3.14)$$

3.3 Фізичне моделювання відгуку фотоприймача

Згідно із розробленим сценарієм для квест-кімнати, необхідно змоделювали фон кімнати, в якій проходить квест, та помістили на нього сигнал від ІЧ-лазера ($\lambda = 940 \text{ нм}$), який має мінімальні втрати (рис. 3.6). Максимальний рівень сигналу рівний 1 лк, приходить 0.9 лк. Відношення сигнал/шум, згідно з формулою 2.1 становить 76.

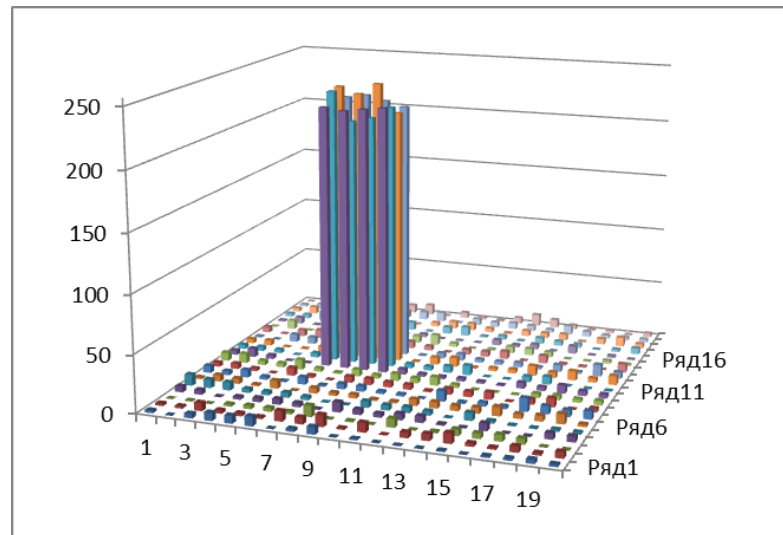


Рисунок 3.6 – Адитивна суміш ГЧ-сигналу та фоновому шуму.
Рішень шуму дорівнює внутрішньому шуму фотоприймача

За сценарієм в момент, коли гравець досягне певної точки лабіринту вмикається додаткова перешкода – миттєва поява туману. Адитивна (сумарна) суміш сигнальної та заводової складової без урахування застосованої перешкоди представлена на рис. 3.7.

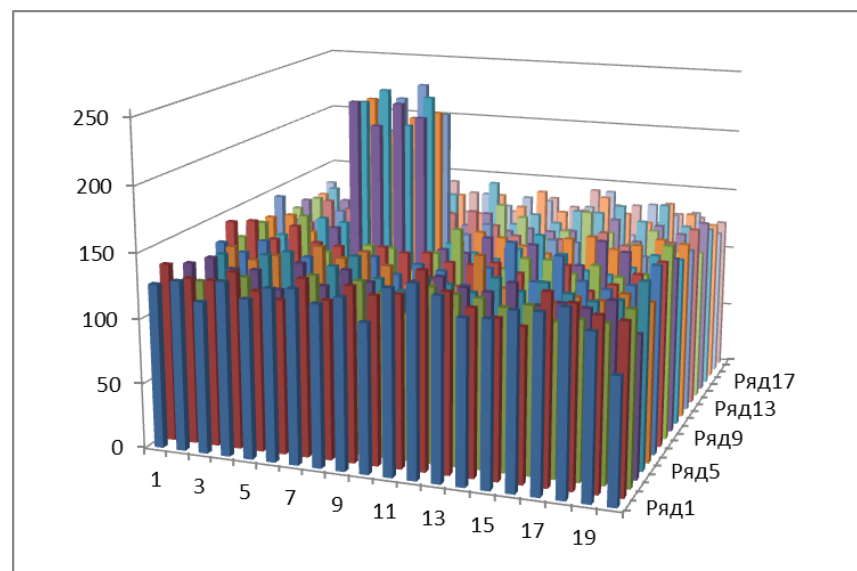


Рисунок 3.7 – Адитивна суміш сигнальної та заводової складової без урахування застосованої перешкоди

Згідно з рис. 2.1 випромінювання даної довжини хвилі при такій заваді ослабляється майже на 50% (рис. 3.8). У видимій частині спектру на хвилях 0,4-0,76 мкм поглинання незначне, при довжині хвилі 0,76 мкм спостерігається поглинання в кисні. Ділянки сильного поглинання парами є поблизу хвиль довжиною 0,94; 1,10; 1,38; 1,87 мкм, в інтервалах довжин хвиль 2,6-3,3; 5,5-7,5 мкм. Поглинальну дію має вуглекислий газ (на хвилях 2,7; 4,3; 12-20 мкм) і озон (на хвилях 4,7 і 9,6 мкм). Основну поглинальну дію має водяна пара, оскільки її вміст набагато перевищує вміст вуглекислого газу і озону. Прозорість атмосфери для інфрачервоних променів сильно залежить від вологості атмосфери. Порівняно хорошу прозорість для інфрачервоних хвиль атмосфера має на наступних діапазонах: 1,0-1,05; 1,2-1,3. Відношення сигнал/шум падає до 11, що не відповідає пороговому значенню блоку 1.5 структурної схеми (рис. 3.2), промінь майже не реєструється матрицею, гравець не може продовжувати переміщення по лабіринту. Блок 1.5 дає вказівку включитися лазерному діоду червоного кольору.

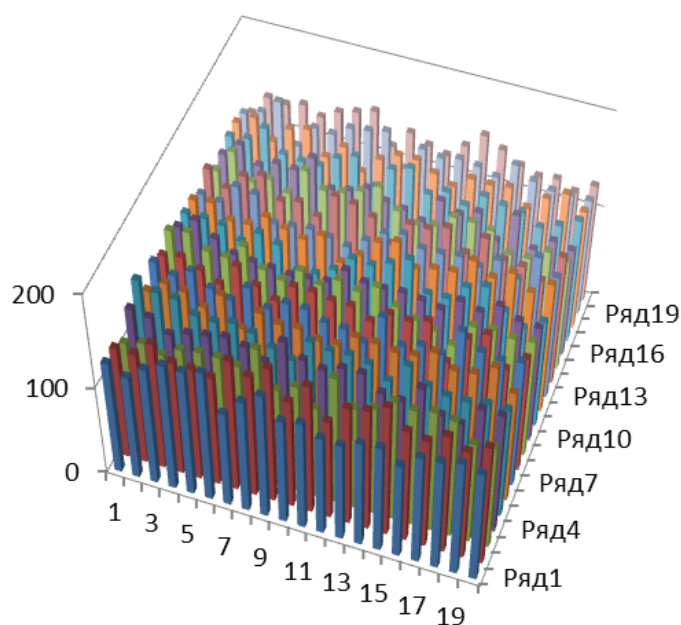


Рисунок 3.8 – Адитивна суміш сигнальної та завадової складової з урахування застосованої перешкоди

На цьому етапі свою роботу починає червоний лазер. Ослаблення випромінювання цієї довжини хвилі ($\lambda = 650$ нм), згідно з рис. 2.1, при такій заваді незначне $<10\%$ (рис. 3.9). Можна повноцінно продовжувати гру, адже другий приймач буде реєструвати сигнал поки шум не зникне.

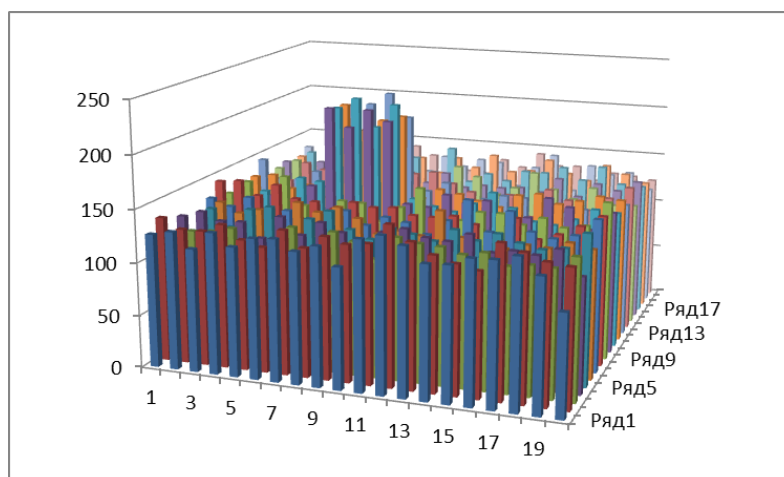


Рисунок 3.9 – Адитивна суміш сигнальної (червоний діод) та завадової складової з урахування застосованої перешкоди

Розраховуємо відношення сигнал/шум за допомогою формули 2.1:

$$\varphi = \frac{\bar{X}_c}{\sigma_{\text{ш}}}, \quad (3.15)$$

Таблиця 3.1 – Відношення сигнал/шум для кожного випадку сценарію

№ рисунка	Середнє арифметичне сигналу	Середньоквадратичне відхилення шуму	Відношення сигнал/шум
Рис. 3.6	228.7	3	76
Рис. 3.7	232.5	9.65	24
Рис. 3.8	113.7	10.3	11
Рис. 3.9	209.5	9.65	21.7

3.4 Розрахунки імовірнісних характеристик виявлення сигналів на тлі завад

Нехай дані представляють числову послідовність. За деякий час формується одновимірний масив значень X розмірністю n . Може бути розрахована дисперсія і середнє значення такого масиву.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (3.16)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (3.17)$$

На підставі отриманих значень дисперсії і математичного очікування може бути проведена апроксимація масиву нормальним законом розподілу.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.18)$$

де μ – математичне очікування (середнє значення);

σ – середньоквадратичне відхилення (σ^2 дисперсія) розподілу.

Під характеристиками виявлення ми розуміємо умовну ймовірність правильного виявлення сигналу:

$$d = \int_{x_{\text{пор}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{(x-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2}} dx. \quad (3.19)$$

Умовна ймовірність появи помилкової відмітки:

$$f = \int_{\infty}^{x_{\text{пор}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-\frac{(x-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}} dx. \quad (3.20)$$

Графічне пояснення умовних ймовірностей правильного виявлення та появи помилкової відмітки наведені на рис. 3.10.

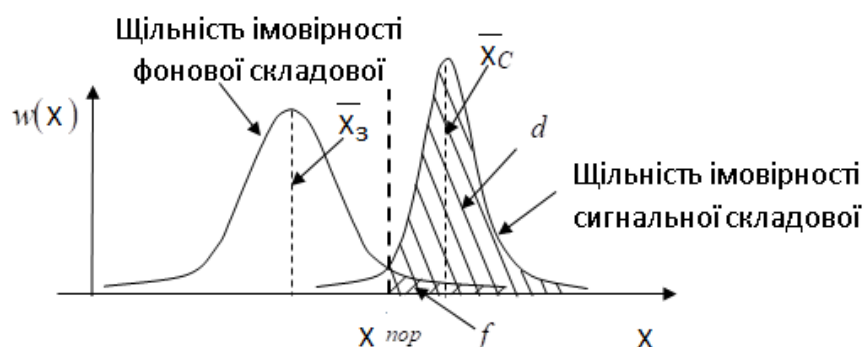


Рисунок 3.10 – Щільність ймовірностей сигнальної та фоновій складових

Проведемо розрахунки ймовірнісних характеристик виявлення для випадку, коли на ІЧ-промінь діє лише фоновий шум (рис 3.6). У цьому випадку:

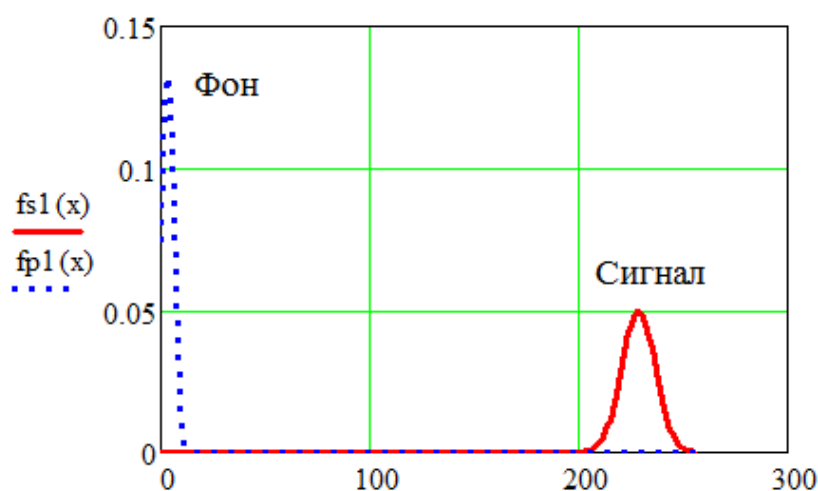


Рисунок 3.11 – Щільність ймовірностей ІЧ-променя та фоновому шуму

$$\mu_c = 228.7, \quad \sigma_c = 8; \quad \mu_3 = 3.2, \quad \sigma_3 = 3. \quad (3.21)$$

Вибираємо порогове значення ($X_{\text{пор}} = 168$), за допомогою формул 3.19 та 3.20 знаходимо умовну ймовірність правильного виявлення сигналу та появи помилкової відмітки:

$$d = 1, \quad f = 0. \quad (3.22)$$

Із результатів (рис. 3.11) зрозуміло, що ПЗЗ-матриця в такій ситуації 100% виявить ІЧ-промінь на тлі фону.

Проведемо розрахунки імовірнісних характеристик виявлення для випадку, коли з'являється перешкода, яка ще не вплинула на ІЧ-промінь (рис 3.7). Порогове значення залишається незмінним:

$$\mu_c = 232.5, \quad \sigma_c = 10.2; \quad \mu_3 = 128.6, \quad \sigma_3 = 9.65. \quad (3.23)$$

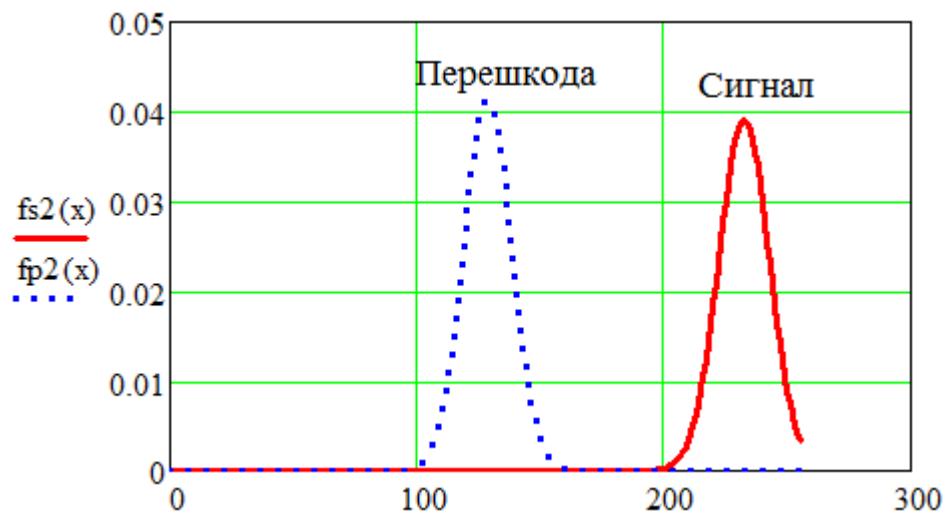


Рисунок 3.12 – Щільність ймовірностей перешкоди та ІЧ-променя без ослаблення

$$d = 1, \quad f = 1. \quad (3.24)$$

Із результатів (рис. 3.12) зрозуміло, що ПЗЗ-матриця в такій ситуації знайде ІЧ-промінь в такій перешкоді.

Проведемо розрахунки імовірнісних характеристик виявлення для випадку, коли перешкода вплинула на ІЧ-промінь, він ослаб на 50% (рис 3.8):

$$\mu_c = 113.7, \quad \sigma_c = 8; \quad \mu_3 = 128.7, \quad \sigma_3 = 10.3. \quad (3.25)$$

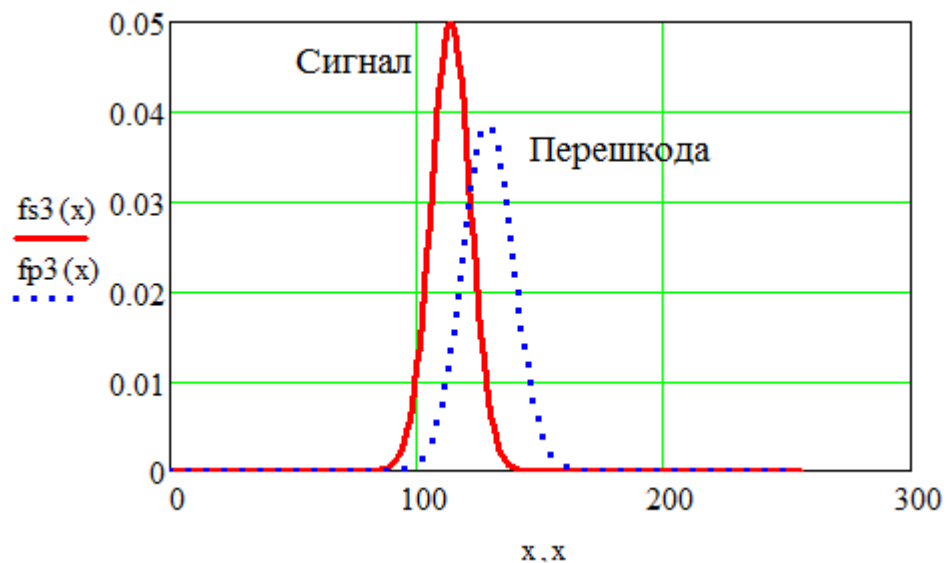


Рисунок 3.13 – Щільність ймовірностей перешкоди та ослабленого на 50% ІЧ-променя

$$d = 5.705 \cdot 10^{-12}, \quad f = 1. \quad (3.26)$$

Із результатів (рис. 3.13) зрозуміло, що ПЗЗ-матриця в такій ситуації не виявить ослаблений перешкодою ІЧ-промінь.

Проведемо розрахунки імовірнісних характеристик виявлення для випадку, коли роботу починає червоний лазер, промінь якого при такій перешкоді поглинається на 10% (рис 3.9):

$$\mu_c = 209.5, \quad \sigma_c = 10.2; \quad \mu_3 = 128.6, \quad \sigma_3 = 9.65. \quad (3.27)$$

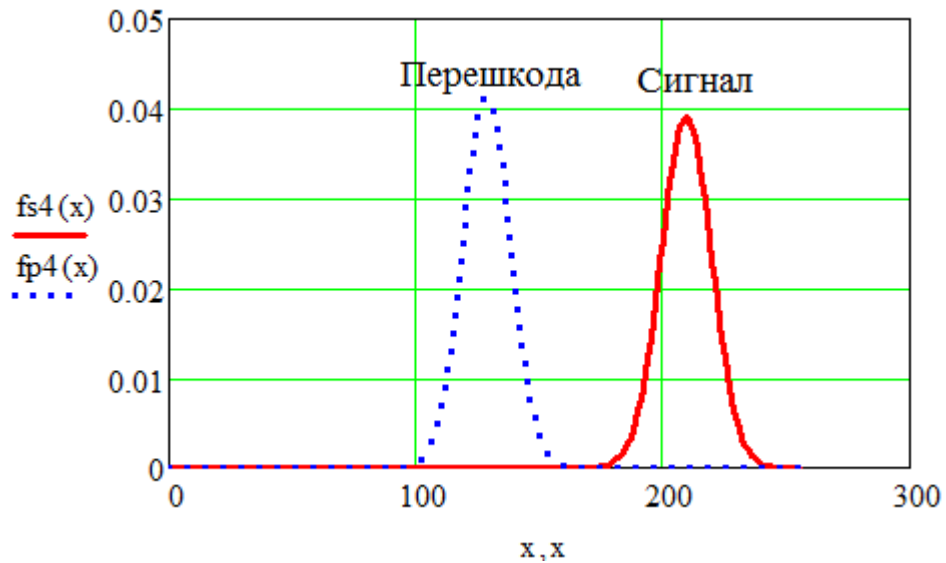


Рисунок 3.14 – Щільність ймовірностей перешкоди та ослабленого на 10% променя червоного лазера

$$d = 1, \quad f = 1. \quad (3.28)$$

Із результатів (рис. 3.14) зрозуміло, що ситуація стабілізується, ПЗЗ-матриця виявляє ослаблений перешкодою промінь червоного лазера.

3.5 Метод стабілізації величини відношення сигнал/шум

В основу методу покладено метод накопичення кадрів, що розглядається у роботах [9] [16] і полягає в збільшенні часу експозиції. Чим більшим буде час експозиції, тим більша кількість фотонів потрапить на ПЗЗ-матрицю, що дає змогу виявити ослаблений промінь. Накопичення кадрів призводить до зменшення дисперсії шуму і, як наслідок, до підвищення відношення сигнал/шум.

Використаємо метод для кадру, гістограма якого зображена на рис. 3.8, коли матриця не фіксує ІЧ-промінь в умовах туману. Проведемо накопичення десяти кадрів, адже гравець знаходиться не в статистиці, а постійно рухається. Розрахуємо імовірнісні характеристики виявлення.

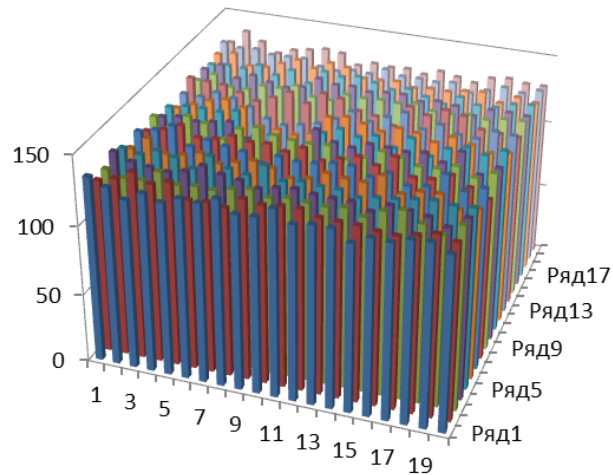


Рисунок 3.15 – Результат накопичення десяти кадрів

$$\mu_c = 114.2, \quad \sigma_c = 2.85; \quad \mu_3 = 128, \quad \sigma_3 = 3.5. \quad (3.29)$$

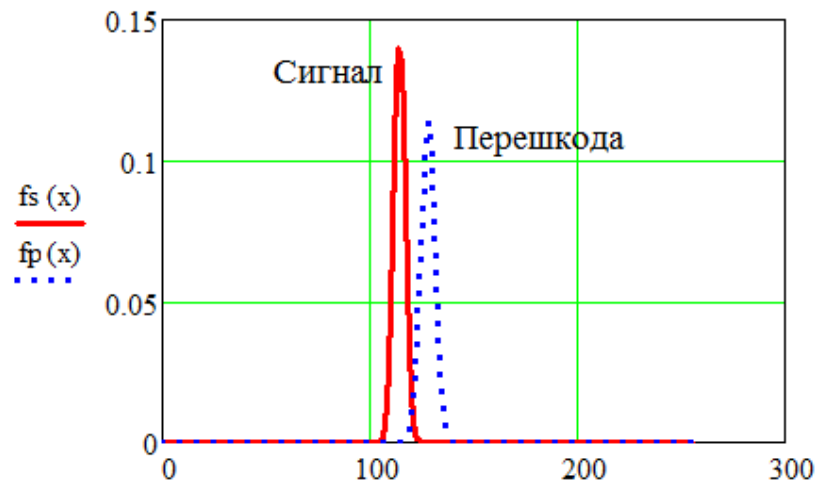


Рисунок 3.16 – Щільність ймовірностей після накопичення кадрів

$$d = 0, \quad f = 1. \quad (3.30)$$

Розрахуємо відношення сигнал/шум, використовуючи значення 3.29 та формулу 2.1.

$$\varphi = \frac{114.2}{3.5} = 32.6 \quad (3.31)$$

Із рис. 3.15, 3.16 видно, що корисний сигнал не виражений явно, матриця його не зафіксує, але відношення сигнал/шум збільшилося. Така стабілізація можлива лише в тому випадку, коли відношення сигнал/шум для одного кадру не буде менше 10.

Висновок. Таким чином, моделювання та розрахунки показали, що ослаблений туманом ІЧ-промінь не буде реєструватися матрицею, адже відношення сигнал/шум не перевищує мінімального значення, запрограмованого в блоці обробки даних. Підтверджено, червоний лазерний діод відновлює параметр відношення сигнал/шум, імовірність виявлення цього променя на фоні перешкоди зростає.

Запропонований метод накопичення дійсно стабілізує величину відношення сигнал/шум, але на кінцевій гістограмі корисний сигнал не виражений явно. Розрахована ймовірність його виявлення близька до нуля.

ВИСНОВКИ

Відповідно до мети і поставлених завдань в атестаційній роботі були розглянуті найпопулярніші сценарії квест-кімнати лазертаг, основа якого, з технічної точки зору, – передача та прийом оптичного сигналу, його обробка.

На підставі зробленого огляду, розроблено власний сценарій квесту, який ускладнюється несподіваною появою ефектів, що додає гри видовищності та захвату, але, в той же час, погіршує роботу приймально-передавальної системи.

Щоб розібратися, як сильно поява перешкоди у вигляді туману заважає проходженню променя, було проведено дослідження факторів, що впливають на передачу оптичного сигналу. Визначено, частинки води поглинають майже половину випромінювання запропонованої довжини хвилі (ІЧ-діапазон, $\lambda = 940$ нм, що робить лазер потайним для суперника).

При вирішенні цієї проблеми в структурну схему, яка реалізує сценарій, було додано блок розрахунку характеристик прийнятих сигналів по критерію величини відношення сигнал/шум, ймовірностей правильного виявлення та появи помилкової відмітки. Цей блок налаштований на певні мінімальні значення, не отримуючи яких система не буде працювати. У разі нестачі необхідної потужності променя, в роботу вступає імпульсний червоний лазерний діод, який має відновити роботу до моменту, коли перешкода зникне.

Для підтвердження описаних процесів та припущень проведено моделювання відгуку фотоприймача для усіх можливих етапів сценарію. Розраховано величину відношення сигнал/шум та імовірнісні характеристики виявлення сигналу на тлі перешкоди.

Доведено, що у випадку поглинання туманом ІЧ-променя, відношення сигнал/шум не перевищує мінімального значення, що реєструється блоком обробки; імовірність правильного виявлення рівна нулю.

Встановлено роль червоного лазерного діода, використання якого в умовах перешкоди дозволяє відновити величину відношення сигнал/шум до мінімально допустимої.

Таким чином, завдання вирішені в повному обсязі, мета досягнута – розроблено алгоритм передачі та прийому оптичного сигналу в умовах нового сценарію квест-кімнати, доповненого ефектами.

Практична значущість роботи полягає в комплексному дослідженні приймально-передавальної системи оптичного зв'язку в квест-кімнатах та факторів, які впливають на функціонування цієї системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сценарии игры лазертаг. URL: <https://www.lasertag-ataka.ru/scenarios.html> (дата обращения: 01.10.2020).
2. Мисакян Д. Все о дым-машинах и гейзерах. 2020. 11 июня. URL: <https://misakyan.com/blog/smoke-machines/> (дата обращения: 01.10.2020).
3. Forpost. Оборудование для внеаренного лазертага. Инструкция по эксплуатации. 2019. 3 мая. URL: <https://lasertag.ru/support-forpost/manual/> (дата обращения: 01.10.2020).
4. Иванов Ю. Аналоговые устройства приема и передачи сигналов по ВОЛС. URL: http://www.tzmagazine.ru/jpage_print.php?uid3=531 (дата обращения – 26.10.2020).
5. ВОЛС: основные характеристики и сферы применения. URL: <https://pue8.ru/kabelnye-linii/548-vols-osnovnye-kharakteristiki-i-sfery-primeneniya.html> (дата обращения – 26.10.2020).
6. Преимущества и недостатки АОЛС. URL: https://studwood.ru/1695057/tehnika/preimuschestva_nedostatki_aols (дата обращения – 26.10.2020).
7. Основы построения оптических систем передачи. URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volokonno-opticheskie-sistemy-peredachi/1-osnovy-postroeniya-opticheskikh-sistem-peredachi> (дата обращения – 26.10.2020).
8. Кононюк А. Е. Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта кн.3, ч.4. К.: Освіта України, 2017. – С. 93–101, 371–375.
9. Патров Д. О., Стрелкова Т. А. Исследование методов увеличения дальности тепловизионных систем // Monografia pokonferencyjna science, Research development # 22 Technics and Technology. 30–31.10.2019, pp. 32–35 London, 2019.
10. Эффект Доплера. URL: https://www.webmath.ru/poleznoe/fizika/fizika_153_formuly_jeffekta_doplera.php (дата обращения – 30.10.2020).

11. Лазерная безопасность. URL: https://stormoff.ru/mediacenter/articles/article_66/ (дата обращения – 30.10.2020).
12. Лазерный диод U-LD-650543A. URL: <https://www.datasheets360.com/pdf/-6793539540112467685> (дата звернення – 09.11.2020).
13. Инфраредный диод TSAL6100. URL: <https://www.vishay.com/docs/81009/tsal6100.pdf> (дата звернення – 09.11.2020).
14. Тепловизионная IP камера Hikvision DS-2TD2617-10/P. URL: <https://pipl.ua/ru/hikvision-ds-2td2617-10-p/> (дата обращения – 09.11.2020).
15. ПЗС-матрица Sony ICX-404AL. URL: https://geosalon.kiev.ua/ru/binokli/pribori_nochnogo_videnija_opisanie/pzs_matrica.html (дата обращения – 09.11.2020).
16. Стілкова Т. О. Дисертація на здобуття доктора технічних наук зі спеціальності 05.11. 07 «Оптичні прилади та системи». – ХНУРЕ, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Київ, 2017.
17. Люмены, канделы, ватты и фотоны. Различные единицы – различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС. URL: <http://www.videoscan.ru/page/714> (дата обращения – 16.11.2020).
18. Адаменко Є. І., Стрілкова Т. О. Розробка та дослідження приймально-передавальної системи оптичного зв'язку в квест-кімнатах // Monografia rokonferencyjna Science, research, development # 34 Technics and technology. 30–31.10.2020, pp. 45–47 Paris, 2020.
19. Милинкис Б. М. Петров В. М. Атмосферная лазерная связь // ИНФОРМОСТ – Радиоэлектроника и Телекоммуникации. 2001. № 5(18).
20. Дмитриев А. Л. Оптические системы передачи информации / Учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 96 с.
21. Волков В. Г. Беспроводные оптические системы связи // Спецтехника и связь – Электротехника, электронная техника, информационные технологии. 2012. №3.

22. Титарь В. П. Лазерные системы связи с открытым резонатором // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». Харків, 2016. Вип. 25, С. 38–47.

23. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Пристрої інтегральної опто- фото- та акустoeлектроніки» для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», спеціалізації Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої / ХНУРЕ; розроб. Т. О. Стрілкова. – Харків, 2019.

24. G. G. Lema Free space optics communication system design using iterative optimization // Journal of Optical Communications. 2020.

25. Новиков О. С. Волоконно-оптические линии связи и перспективы их развития // Молодой учёный. 2020. № 23(313). С. 129–132.