

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті” коммерциялық емес
акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 621.39:004 (043)

Қолжазба құқығында

Серікқұлқызы Ділдар

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертацияның атауы

Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін
зерделеу

Дайындау бағыты

7М06201 – «Телекоммуникация»

Ғылыми жетекші
PhD докторы
қауымдастырылған профессор
Н.К.Смайлов

« 31 » 05 2023 ж.

Рецензент
PhD докторы,
ғылым жөніндегі проректор
Д.С. Жамангарин

« 31 » 05 2023 ж.

Норма бақылаушы
Т.ғ.м. аға оқытушы
Ж. Досбаев

« 31 » 05 2023 ж.

Алматы 2023



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті” коммерциялық емес
акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

7M06201 – «Телекоммуникация»



**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант *Серікқұлқызы Ділдар*

Тақырыбы: *«Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерделеу»
Университет ректорының «29» қазан 2021ж. №1753-м бұйрығымен бекітілген.
Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі: «8» маусым 2023 ж.*

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: 1) Оптикалық сымсыз байланыс жүйесінің тиімділігі; 2) 1550 нм толқын ұзындығында жұмыс жасайтын жабдықтар арқылы бос кеңістікте байланыс орнату; 3) Спутникаралық оптикалық сымсыз байланысты модельдеу
Магистрлік диссертацияда қарастырылатын сұрақтар, диссертацияның қысқаша мазмұны:

а) Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс;

ә) 1550 нм толқын ұзындығындағы жабдықтармен бос кеңістікте жұмыс жасау;

б) Оптикалық сымсыз байланысты бағдарламалық жүйелерде модельдеу;

в) COMSOL Multiphysics, MATLAB бағдарламаларында DWDM мультиплекстеу;

г)

Графикалық материалдар тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):
жұмыс презентациясы 15 слайдпен көрсетілген.

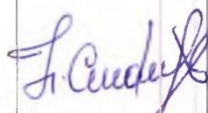
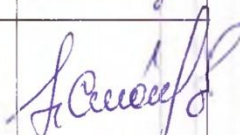
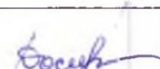
Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

1. Солнце.Х ; Канг.С.Н; Конг.М ; Алхазраги.О ; Го.Ю ; Уссейн.М; Венг.Ю ; Джонс.Б.Х.; Нг, ТК; Оои.Б.С. Обзор практических соображений и решений в области подводной беспроводной оптической связи. Дж. Лайтв. Технол. 2020, 38, 421–431.
2. Конг.Л.Н; тайский, НД; Ван.П; Дусит.Н ; В.К.Д; Чжу.Х. Сбор данных и беспроводная связь в Интернете вещей (IoT) с использованием моделей экономического анализа и ценообразования: обзор. Сообщество IEEE. Surv. Репетитор. 2016, 18, 2546–2590.
3. Чоудхури.М.З; Шахджалал.М; Ахмед.С; Jang.Y.M Системы беспроводной связи 6G: приложения, требования, технологии, проблемы и направления исследований. IEEE Open J. Commun. соц. 2020, 1, 957–975.
4. Уйсал.М ; Капсони.К.; Гассемлой.З.; Букувалас.А.С; Удвари.Э. Оптическая беспроводная связь: новая технология; Springer: Берлин/Гейдельберг, Германия, 2016 г.; стр. 1–634.

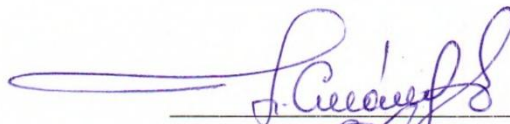
Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Бос кеңістік негізіндегі оптикалық байланыстың артықшылықтары	07.02.2023	орындалды
Атмосфералық әсерлердің бос кеңістіктегі оптикалық байланысқа кері ықпалы	24.03.2023	орындалды
Нақты оптикалық байланыс желісінің сигнал формасының бағдарламалық модельдері	20.04.2023	орындалды
Алынған компьютерлік модель көмегімен нәтижелерді талдау	26.04.2023	орындалды

Аяқталған магистрлік диссертациялық үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушысының қойған
қолдары

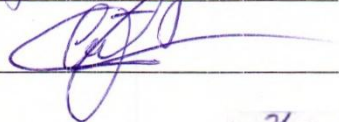
Бөлімдердің атаулары	Кеңесшілер (тегі, аты, әкесінің аты, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диссертация жұмысының тақырыбын талдау	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	15.02.2023 ж.	
Теориялық ақпарат	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	25.04.2023 ж.	
Норма бақылау	Досбаев Ж., ЭТЖҒТ каф. аға оқытушысы, т.ғ.м	01.06.2023 ж.	

Ғылыми жетекші



Смайлов Н.К.

Магистрант тапсырманы орындауға алды



Серікқұлқызы С.

Күні

« 31 » 05 2023 ж.

АНДАТПА

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс – тікелей байланыс үшін өте жоғары жылдамдықта ақпарат таратудың таптырмас шешімі. Соңғы уақытта бұл байланыс түрі дәстүрлі радиожилікті немесе микротолқынды байланыс арналарға қосымша ретінде және тар қосылу аралықтары үшін балама ретінде қолданылады.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс бірнеше себептердің, соның ішінде лицензияланбайтын спектр мен жарықтың тар ені есебінен кең қолданыс тапты және де оптикалық байланысты қолданатын сымсыз жүйелерде пайда болатын проблемалардың да шешіміне айналды. Себебі екі нүкте немесе аймақ арасындағы ақпарат тасымалында лазерлік жарық қолданылады. Мұндағы лазер көмегімен оптикалық талшық бойымен видео, аудио және жазбаша ақпарат тасымалданады.

АННОТАЦИЯ

Оптическая связь в свободном пространстве является незаменимым решением для передачи информации на очень высоких скоростях для прямой связи. В последнее время этот тип связи используется в качестве дополнения к традиционным радиочастотным или микроволновым каналам связи и в качестве альтернативы узким интервалам подключения.

Оптическая связь в свободном пространстве нашла широкое применение по нескольким причинам, в том числе за счет нелинейного спектра и узкой ширины света, и стала решением проблем, возникающих в беспроводных системах, использующих оптическую связь. Потому что лазерный свет используется для передачи информации между двумя точками или областями. С помощью лазера здесь по оптическому волокну транспортируется видео, аудио и письменная информация.

ANNOTATION

Optical communication in free space is an indispensable solution for transmitting information at very high speeds for direct communication. Recently, this type of communication has been used as an addition to traditional radio frequency or microwave communication channels and as an alternative to narrow connection intervals.

Optical communication in free space has found wide application for several reasons, including due to the nonlinear spectrum and narrow width of light, and has become a solution to problems arising in wireless systems using optical communication. Because laser light is used to transmit information between two points or areas. With the help of a laser, video, audio and written information is transported here via optical fiber.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	6
1 Бос кеңістік негізіндегі оптикалық байланыстың артықшылықтары мен кемшіліктеріне анализ жасау	7
1.1 Атмосфералық шашыраудың типтік параметрлері	7
2 Қызмет көрсетудің соңғы мильдегі қиындықтарына тап болатын кәдімгі сымсыз жүйелер проблемасын бос кеңістіктегі оптикалық байланыс арқылы шешу	19
2.1 Атмосфералық әсерлердің бос кеңістіктегі оптикалық байланысқа кері ықпалы	20
2.2 Сымсыз байланыс жүйесіндегі мәселелердің негізгі шешімі	22
2.3 Бос кеңістіктегі оптикалық байланыстың адам өміріндегі қауіпсіздік проблемалары	23
2.4 1310,1550 нм толқын ұзындығындағы радиациялық қуатты, байланыс диапазонын, қабылдау оптикасының диаметрін есептеу	24
2.5 Нақты оптикалық байланыс желісінің қабылдау соңында сигнал формасын модельдеу	29
3 Бос кеңістіктегі оптикалық байланысты COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесінде модельдеу	33
3.1 Optisystem программалық жүйесінде бос кеңістіктегі оптикалық байланыс көмегімен дерек алмасу моделін алу	37
3.2 Нәтижелерді талдау және компьютерлік модель	39
Қорытынды	47
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	49

КІРІСПЕ

Техникамен технология артқан сайын оптикалық байланыс ақпаратты жылдамырақ және қауіпсіз берудің жаңа тиімді жүйелерін берді және арттырады. Соңғы онжылдықтарда байланыс саласында ұзын талшықтардан сенімді сымсыз байланыс жүйесіне айналды.

Соңғы жетістіктер ғарыштық байланыста оптикалық сымсыз байланыс (OWC) технологиясын енгізу тұжырымдамасына жол ашты деуге болады. Жерсерік аралық байланыс – жерсеріктерді өзара қосу үшін жасалған OWC түрлерінің бірі бұл перспективті сымсыз технология өзіне тән сипаттамаларына байланысты келесі ұрпақ технологиясы болады деп күтілуде. Сондықтан оның жетілдірілуінен басқа, оның мүмкіндіктеріне деректердің жоғары жылдамдығы, өткізу қабілетінің жоғарылауы, реттелмейтін спектр, кедергілерге қарсы иммунитет, тасымалдау қауіпсіздігі және төмен жіберу қуаты кіреді.

Дегенмен де, алты мыңнан астам жер серігі жерді айналып жүреді, олардың саны жыл сайын артып келеді. Сондықтан, алдыңғы онжылдық OWC технологиясы бірнеше жақсартулардан өткенін көрсетті. Жерді айналып өтетін спутниктер санының артуы спутниктер арасында бір-бірімен байланысатын желілерді құрудың жаңа әдістерін әзірлеуді талап етеді. Демек, олардың арасында деректерді жіберіңіз, деректерді бірінен екіншісіне жіберіңіз, ең соңында оны станцияларға таратыңыз. Лазерлік спутниктік байланыс спутниктерді біріктіреді және деректерді жоғары жылдамдықта (бірнеше Гбит/с) мыңдаған километрге жіберуге мүмкіндік береді. Жақында OWC технологиясы ғарыштық байланысқа бейімделді. Әзірленген технология спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс деп аталады (Is-OWC) деп аталады. Жерді айналып өтетін спутниктер үшін бос кеңістіктік оптикалық байланыс олардың арасында байланыс әдісін ұсынады.

Оптикалық байланыс ақпаратты тасымалдауда жылдамырақ, тиімдірек және қауіпсіздірек қамтамасыз ететіні белгілі. Сымды байланыс арқылы сымсыз байланыс максималды өткізу қабілеттілігі, сенімділік, қауіпсіздік, ұтқырлық және т.б. тұрғысынан жақсы мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді. Сымсыз байланыс технологияларының жылдам дамуымен соңғы жылдары олар сымды қосылымдардың қажеттілігін ауыстырылып оырады. Is-OWC - бұл бос кеңістіктік оптикалық байланыс технологиясының ұсынылған қосымшаларының перспективалы технологиясы болып табылады.

Алдағы уақытта ғарышта жүзеге асады деп үміттенеміз. Қазіргі микротолқынды спутниктік жүйелерде ол арзан, сол себепті тиімді болып табылады. Деректерді таратудағы жоғары жетістіктерге қарамастан қолданушылар қарым-қатынас жасау одан да тезірек болғанын қалайды. Бірақ, деректерді жіберу немесе алу мүмкіндік саны артқан сайын ақпарат алмасудың тиімді болуын да ескерген жөн. Кең жолақты интернет желісі 256 Кбит/с жылдамдықта бір немесе екі бағытта ақпарат тасымалдау жылдамдығына ие ортақ қолданыстағы интернетке қосылуы көптеген аумақтарда қолжетімсіз және де заманауи әлемдегі басты проблемалардың

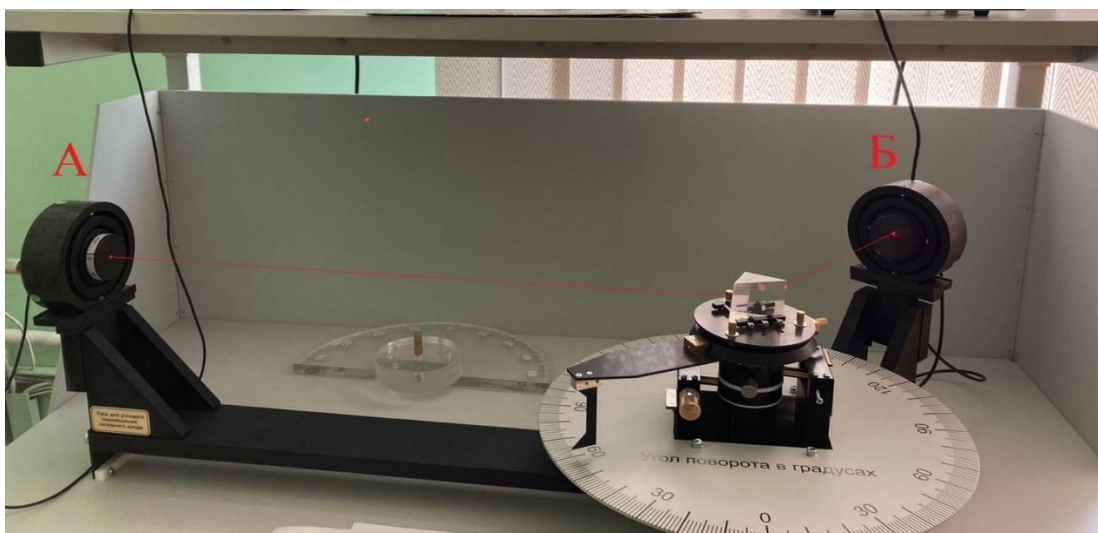
біріне айналуда. Қаладағы талшықты-оптикалық желілер үлкен шығын алып келетін құрылыс жүргізіліп жатырған аумақтарында сымсыз интернетке қол жеткізу сұранысқа ие [1][2][3]. Сымсыз байланыс талшықты оптикалық кабельдерді орнату мүмкіндігі шектеулі немесе мүмкін емес аумақтар үшін басты шешімге айналды. Оған мысал ретінде су қоймаларының артын, архитектуралық маңызды аймақтарды және де дәстүрлі демалыс орындарын жатқыза аламыз [4][5]. Байланыстың сымсыз түрі деректер таратуда баға төмендігін қамтамасыз етіп қана қоймай, сымды байланыспен салыстырғанда бірнеше артықшылықтарға ие болып табылады.

Алдыңғы дәуірде орын алған ақпараттың жылдам тасымалына деген мұқтаждық толқын ұзындығы 1 мм-ден 1 м-ге дейінгі ақпарат алмасудың электромагниттік шағылу арқылы іске асатын қысқа толқынды арналардың пайда болуына алып келді. Сипаты жағынан бұл қарапайым технология болатын. Қысқа толқынды шағылу мыс сым секілді өткізгішке жеткенде электрондар қозғалысы пайда болып, электр тогының пайда болуына әкеледі.

Бұл технология түрі радио, радарлар, ұялы телефон және де теледидар арналарында кеңінен қолданыс тапқан [6]. Деректерді беру технологиясы туралы айтып өтсек, қысқа толқындар сигналдарды бұрмалаусыз тікелей керекті жерге жеткізеді. Одан бөлек оларды спутниктерден немесе жергілікті таратқыштардан жердің кез-келген нүктесіне жіберуге болады. Дегенмен, мұндай байланысты қалыпты деңгейде ұстап тұру ірі қалалардағы радиожіліліктердің күшеюіне, олардың бөгеуілдерге төзімділігіне және құпия ақпараттың желіге тарап кетуіне байланысты қиындай түсуде. Сонымен қатар, қысқа толқынды байланыстың адам денсаулығына тигізетін зиянына, яғни қысқа толқынды сәулеленудің физикалық әсеріне байланысты оның қолданысы бүгінгі таңда шектеліп отыр. Мұндай электромагниттік толқындар молекулалар вибрациясын туғызады. Оған мысал ретінде су молекулаларының шеңбер бойымен қозғалып, үйкеліс әсерінен температурасының жоғарылауын айта аламыз.

Жылдам, әрі эффективті ақпарат тасымалынан туған қажеттілік жоғарыда айтылғандай кемшіліктері жоқ жаңа технологиялардың пайда болуына алып келді. Оптикалық сымсыз байланыс жүйесі, яғни бос кеңістіктегі оптикалық байланыс қысқа толқынды байланыспен салыстырғанда шектеулері едәуір аз болып келеді [7][8]. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс – екі нүкте арасындағы ақпарат тасымалын қамтамасыз ету үшін ашық кеңістіктегі оптикалық шағылуды қолданатын сымсыз оптикалық байланыс технологиясы. Оның басты компоненттеріне лазерлер немесе жарық диоды секілді таратқыштар, және де фотоприемник секілді қабылдағыштар жатады. 1-суретте екі нүкте арасындағы лазерлік байланыстың схемалық бейнесі көрсетілген болса, 2-суретте бірнеше объект арасындағы байланыс келтірілген. Заманауи желілер деректерді 8 км-ге дейінгі қысқа аралықтарға 100 Гбит/с жоғары өткізу қабілетімен тасымалдауға жол беретін бос кеңістіктегі оптикалық байланыс технологиясымен жұмыс жасайды [9]. Мұндай желілер ақпарат көзіне қосылған трансивер

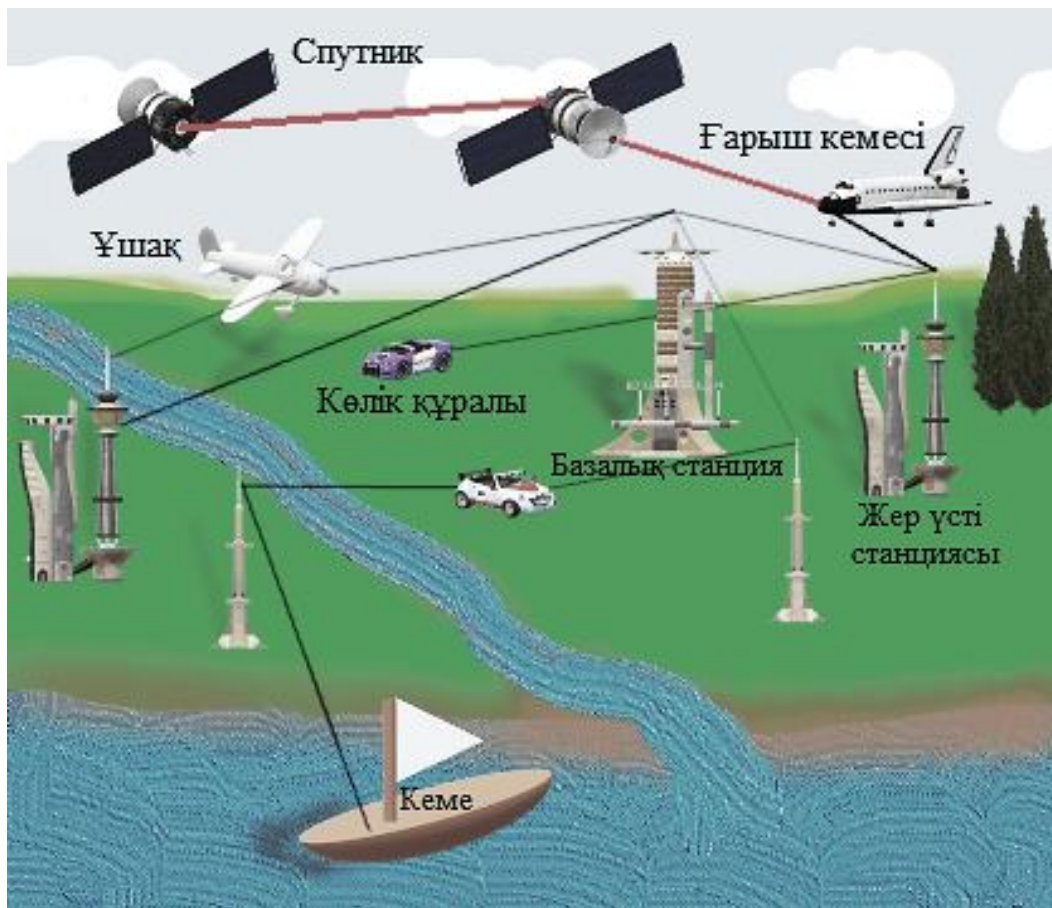
(приемопередатчик) есебінен екі бағытты болып саналады. (1.1 суретте көрсетілген)



1.1-сурет – Екі нүкте арасындағы лазерлік байланыстың схемалық бейнесі

Ашық ғарыш алаңындағы ауа немесе вакуум секілді кеңістіктегі байланыс желісі сәйкес оптикалық шағылу көздерін талап етеді. Оларды таңдау барысында толқын ұзындық диапазонын, шағылыстырғыш қуатын және электронды модульдеуші желімен өзара әрекеттесу параметрлерін ескерген жөн. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыстағы шағылудың толқын ұзындық диапазоны атмосфера секілді сигнал берілетін қоршаған орта қасиеттеріне сәйкес таңдалады. Бұл технология климат типіне, ауа-райына және физикалық өзгерістерге сезімтал [10]. Келесі басты проблема бос кеңістіктегі оптикалық байланыс қолданушылары мен бөгде адамдар үшін де ақпараттық қауіпсіздікті орнату [11][12].

Алғашқы қалааралық хабарламалар хабар тасушылар көмегімен жіберілді. Бірақ, бұл хабар тарату түрі өте баяу болып есептелінді. Физикалық хабар тарату жылдамдығын ұзарту мақсатында қолданушылар деректерді ауа арқылы, яғни көгершіндер мен басқа құстар көмегімен жіберуге тырысты. (1.2 суретте көрсетілген)



1.2 -сурет – Өртүрлі объектілер арасындағы оптикалық байланыс каналдарының схемалық көрінісі. Тар жарық көзімен берілетін лазерлік шағылулар қызыл түспен көрсетілген.

Африканың кейбір тайпаларында хабар арнайы аспаптарда таратылды. Бұл аспап түрлерін сөйлейтін дабыл (барабан) деп те атайтын. Ал солтүстік Америкада кей индиялық тайпалар хабар таратуда түгін сигналдарын пайдаланған. Тіпті 16 ғасырдың соңғы ширегінде түгін сигналдарын қайықтар кодталған жалаулар көмегімен қолданған. Бұл жүйелер шектеулі географиялық аймақтарда қолданылып, ғасырлар бойы даму нәтижесінде біз күнделікті қолданып жүрген заманауи хабар тарату технологияларына дейін қарқынды дамыды.

Оптикалық байланыс ерте кезеңнен бастау алды. Өткен өркениеттер кіші көлемдегі хабар тарату мақсатында айна, от шамшырақтарын (маяк) және де түгін сигналдарын пайдаланған [13]. Технологиялық даму бастамасы 1672 жылы Роберт Гук ұсынған акустикалық телефоннан басталды. Оның басты артықшылығы сым бойымен сигнал жіберуге арналғандығында болатын. Одан көп ұзамай 1792 жылы Клод Шапп үлкен арақашықтыққа кодталған хабар тарату идеясын ұсынды. Ал алғашқы электр телеграфтары 1823 жылы орыс ғалымы Шиллинг ұсынысы бойынша ойлап табылған болатын [14]. Жалпы телеграф дегеніміздің өзі хабарды электр энергиясы көмегімен ұзақ арақашықтыққа сым бойымен тарату. Кейіннен даму нәтижесінде сымды телеграфтар сымсыз күн телеграфтарына, яғни гелиографтарға ауыстырылды.

Біраз жылдардан соң оптикалық телеграф желісі барлық Еуропа бойынша тарады. Жарық ретрансляциялық станциялар қабылдауына ыңғайлы кодталған сигналдарды көруге арналған құрал ретінде қолданылады. 1835 жылы бір сымды телеграфтық жүйе іске қосылып бүкіл әлем бойынша электрлік байланыс жандана түсті. Кейін 1880 жылы Александр Грэм Белл жарық көзі көмегімен дыбыс таратуға арналған фотофон ойлап тапты. 1880 жылдың 3 маусым күні осы әдісті пайдаланып сымсыз телефон байланысы тарихындағы ең алғаш қоңырау шалынды.

Бүгінгі таңдағы лазерлік арналар жарық көзінің толқын ұзындығын модуляциялау арқылы хабарды ауада таратуға мүмкіндік береді. Әдетте бұл тәсілдер 100 Мбит/с немесе 1 Гбит/с жылдамдықта өткізу қабілетін ұсынады. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс талшықты-оптикалық желілер үшін резервтік қор ретінде пайдаланылады. Заманауи лазерлік арналарды дұрыс ортаға орналастырған жағдайда өткізу қабілеті 1 Гбит/с жылдамдықта 5000 м арақашықтыққа хабар таратуға болады.

1 Бос кеңістік негізіндегі оптикалық байланыстың артықшылықтары мен кемшіліктеріне анализ жасау

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс әлемдік деңгейдегі желілік байланысты ұсынатын кеңжолақты байланыс сұранысына ие. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйесі радиожиліктік спектрлер немесе спектр анализаторлары есебінен лазерлік жарықты анықтау мүмкіндігі жоқтығы есебінен радиожиліктік немесе басқа да сымсыз байланыс түрлерімен салыстырғанда қауіпсіз. Ақпарат тасымалын іске асыратын лазер жіңішке болғандықтан көзбен көру мүмкін емес. Одан бөлек деректің шифрланған болуы да ақпарат тасымалын қауіпсіз етеді. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс дерек таратудың жоғары жылдамдығымен бұрыннан қолданыстағы желілерде болған олқылықтарды жояды.

Өзге технологиялар секілді бұл оптикалық байланыс түрінің де өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері болады. Лазерді дұрыс орналастырған жағдайда ол қолданушыға жоғары сенімділік беріп, бағасы мен сапасы жағынан да алдыңғы қатардан орын алады.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс артықшылықтарына тоқталып өтсек. Бұл байланыс түрінің өткізу қабілеті жоғары және де бағасы жағынан талшықты оптикалық байланыспен салыстырғанда тиімдірек. Бос кеңістіктегі байланыс жоғары өткізу қабілеті бар жақын аралыққа хабар тарататын арналарды қамтамасыз етудің үнемді тәсілі болып табылады. Көптеген радио арналар лицензия талап ететіндіктен бұл байланыс түрі лицензиясыз жасалған. Одан бөлек байланыс толық дуплексті, яғни телефон, телеграф немесе радиобайланыс кезінде екі жақтағы қолданушылар арасында бір мезетте хабар қабылдауды қамтамасыз етеді. Алыс арақашықтыққа хабар таратқанда сымсыз немесе сымды байланыс жолында кедергілер кездеседі. Кедергілерге климаттық жағдайлар да жатады және де сол кедергіге төзімділігі жағынан сымсыз байланыс жоғары орын иеленіп отыр. Кедергіге жоғары төзімділік сәйкесінше таратылатын хабардағы қателер санының аз болуына әкеледі.

Лазерлік байланыс – қысқа аралықта жоғары өткізу қабілетімен дерек алмасудың үнемді тәсілі болып табылады. Және де мұндай байланыс қолданыс барысында сенімді, қауіпсіз, толық дуплексті қосылыс тудыра алады. Дегенмен бұл технологияның да өзіндік кемшіліктері бар. Басты кемшілігі – монтаж. Монтаждау барысында лазерлерді берік жазықтыққа орналастыру қажет. Лазермен дерек жіберу сапасы табиғат жағдайларына, әсіресе жаңбыр, тұман және т.б тәуелді. Дегенмен соңғы кезде атмосфералық жағдайларға да тәуелділік төмендеуде, яғни ауа-райының әсеріне қарамастан жіберілген дерек лазер бойымен қатесіз қабылдағышқа жіберіле береді. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс қолдану мерзімі басқа байланыс түрлерімен салыстырғанда әлдеқайда аз, шамамен 7-8 ғана жылды құрайды. Лицензиялаудың еркіндігі, яғни лицензия талап етпейтіндігі қондыру барысындағы административті қиындықтардың болмауын кепілдендіреді. Тағы бір артықшылықтарының бірі жіберілетін сигналда бит бойынша қате санының өте аз мөлшері болуы. Дегенмен, бос кеңістіктегі оптикалық

байланыстағы жіңішке лазер сәулесі кедергілерді бақылауда ұстауға және сырттан тыңдауға қарсы жоғары төзімділікке ие. Жіберілетін ақпарат жүйенің тіркелмеген желі қолданушылары үшін қолжетімсіз. Ал арнаға қосылудың кез-келген амалы дерек жіберу протоколдарына сәйкес жіберілетін ақпараттың құпиялылығының жоғары деңгейін қамтамасыз етеді [15]. Талшықты оптикамен салыстырғанда бос кеңістіктегі оптикалық байланыста кешігу 40 пайызға төмендейді. Бұл ауаның жарық жылдамдығы талшықты оптикалық кабельдегімен салыстырғанда 40 пайызға жоғары болатындығымен түсіндіріледі. Ақпараттың таралу жолына байланысты да қарастыратын болсақ екі нүкте аралығындағы түзу жол оптикалық талшық бойындағы қисық жолмен салыстырған қысқа әрі тезірек [16].

Байланыстың бұл түрі көбіне радиоарналармен салыстырылады, дегенмен, бос кеңістіктегі оптикалық байланыс өткізу қабілеті, орнату жылдамдығы мен шығындары жағынан едәуір жоғары бағаланады. Олардың әрекет ету аумағы бірнеше километрге дейін жетіп жатады. Осыған сәйкес оны дағдарыстық жағдай мен әскери байланыста да қолдана беруімізге болады. Сондай-ақ, бұл технологияны қолдану 1000 м аралыққа оптикалық талшықты орнатуға қарағанда әлдеқайда тезірек.

Жер бетіндегі оптикалық шашырауға, таралуға, сәулеленуге байланысты физикалық құбылыстарды анықтау үшін көп уақыт жұмсалды [17][18][19][20][21][22][23][24]. Барлық зерттеулер нәтижесі атмосфералық атомдар мен молекулалардың, одан бөлек табиғи немесе жасанды кедергі жасайтын факторлардың: жаңбыр, түтін, шаң-тозаң әсерінен болатындығы атап көрсетілген. Шындығында да жаңбыр мен қардың бос кеңістіктегі оптикалық байланысқа әсері бар, дегенмен, тропиктердегі тұман мен су буы деректерді беру қабілетін әлдеқайда төмендетеді. Ауада су молекулаларының болуы фотондардың (жарық бөлшектерінің) шашырау, сыну немесе сіңірілу әсерінен жұтылуы болатындығын көрсетеді. Яғни қабылданған сигналдың тығыздық қуаты төмен болуына, жоғалуына алып келеді. Бұл жаңбыр кезіндегі радиожиілікті сымсыз желілерге әсері секілді сигналдың толық өшуіне алып келеді. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс құстардың, ұшқышсыз ұшу аппараттарының немесе ұшақ секілді ауада қозғалатын заттардың әсерінен уақытша бұғатталып қалуы әбден мүмкін. Биік ғимараттар мен ағаштар ұзақ уақытқа бұғатталуға алып келеді [25].

1.1 Атмосфералық шашыраудың типтік параметрлері

Атмосфералық жағдайды өзгерту мүмкіндігі болмағандықтан бос кеңістіктегі оптикалық байланыста қолданылатын лазердің толқын ұзындығы сәйкесінше тандап алынады. Қазіргі таңда шамамен 0,8 мкм мен 1,5 мкм өткізу қабілетіне сәйкес диапазондар қолданылады. (1 кестеде көрсетілген)

Кесте 1.1 - Атмосфералық шашыраудың типтік параметрлері

Бөлшек типтері	Размер параметрі	Шашырау режимі
Ауа молекулалары	0,00074	Релей
Түтін бөлшектері	0,074 – 7,4	Релей - Ми
Тұман тамшылары	7,4 – 147,8	Ми - геометриялық
Жаңбыр тамшылары	740 - 7400	Геометриялық
Қар түйіршіктері	7400 - 37000	Геометриялық

Жоғарыда атап өтілген табиғи факторлар: жаңбыр, тұман, түтін, шаңнан Ми шашырауы орын алады. Бөлшектердің бетінде электрондар орналасатындықтан олар электромагниттік өрісті құрайды және электромагниттік сәуле шығарады. Олардың өз арасында әрекеттесуі Ми шашырауын немесе дифракцияны тудырады. Одан бөлек релейлік шашыраудан, фотондардың сіңуінен немесе қар мен өнеркәсіптік ластануларға байланысты қателіктер туындауы мүмкін. Зерттеулер нәтижесі бойынша тұман ең қауіпті ауа-райы.

Күннің бату уақыты мен шығу уақытында ақпараттың жіберіліп қабылдануына жауапты трансиверлер шығыстан батысқа бағытталған кезде бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйесін пайдалану мүмкіндігі жойылады.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс желілері мобильді телефонияның базалық трансиверлері арасындағы байланыс станциясы Base Transceiver Station (BTS), офистік ғимараттар арасындағы локальді желіні (LAN-LAN) Gigabit Ethernet және Fast Ethernet жылдамдықтарында қосу, құпия коммуникациялық желілерде (мысалы, медициналық, әскери, финанстық құпия желілер [26]), уақытша қосылуларда (мысалы, Олимпиядалық ойындар кезіндегі камерадан HD суреттердің үлкен экранға берілуі). Байланысты орнатушылар үшін ең басты проблема «соңғы миль» болған болатын [27,28]. Бұл ұғым байланыс операторының коммутаторы мен клиенттің маршрутизаторын бір-біріне қосу барысында пайда болатын проблеманы білдіреді. Байланыс құру сымды жолмен іске асырылғанда бұл өзекті мәселе болатын. Дегенмен бос кеңістіктегі байланыс талшықты оптикалық жылдамдықтағы қосылуларды іске асыруда бұл проблеманың шешіміне айналды. Ол бұзылулар мен зақымдалулардан кейінгі жағдайды жылдам қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Және де кейбір сымды желілер үшін резерв түрінде, яғни сымды желілердің жұмысы тоқтағанда іске қосылатын немесе олардың жұмысын толықтырып тұратын жүйе ретінде жұмыс атқара береді.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс орнату көп мөлшерде қаражат талап етеді, себебі оның құрылғыларының өзі 3000 – 10 000 долларға дейін тұруы мүмкін. Ал қуатты лазерлер адам өміріне зиянын тигізуі мүмкін, сондықтан оны қондыру үшін де білікті мамандар қажет болады. Деректерді тарату барысында таратқыш пен қабылдағыш сигналдарды қабылдай алатын аралықта орналасуы керек және ол аралықта ағаштар, ғимараттар орналасқан

жағдайда немесе құстар ұшқан кезде лазер жарығының таралуына кедергі келіп, хабар жетпей қалу ықтималдығы жоғары. Мұның өзі бұл технологияның кемшіліктерін көрсетіп, қарапайым факторлар әсерінен болатын жоғалулар мен шығындарды көсетеді.

Бос кеңістіктегі байланысты орнатуға арнап таңдалатын толқын ұзындықтары жоғарыда айтылып кеткендей тұман, жаңбыр секілді атмосфералық жағдайлардағы сәуленің өту қабілетіне байланысты болады [29]. Өшулік үш түрде кездеседі: Релейлік шашырау (молекула толқын ұзындығынан кіші) , Ми шашырауы (молекула толқын ұзындығымен салыстырмалы) және де селективті емес шашырау (геометриялық шашырау, яғни молекула толқын ұзындығы өлшемінен үлкен). Релейлік шашырау кезіндегідей ыдырау процесі толқын ұзындығына тікелей байланысты болғандықтан толқын ұзындығына аса назар аудару маңызды. Шашыраудың қай түрі үшін де толқын ұзындығы кіші болатын болса оның әлсіреуі де сәйкесінше көп болатыны белгілі. Атмосфералық жағайлардың ішінде тұман Ми шашырауын тудырса, үлкен қар ұлпалары геометриялық шағылуға себепші болады. Ал жаңбыр тамшылары селективті емес шашырауға алып келеді. Деректер тасымалына кедергі келтіретін басқа да құбылыстарға – түтін, құмды дауылдар мен бұлттарды жатқыза аламыз.

Ақпарат тасымалында таратқыш пен қабылдағыш арасында физикалықтан бөлек басқа да параметрлерін ескерген дұрыс. Мысалы, 780-880 нм толқын ұзындығында хабар тарату үшін көшкін фото диодтары, жарық диодтары, жартылай өткізгіш диодтар және лазерлер қолданылады. 1520-1600 нм толқын ұзындығында хабар тарату қабылдағышы да, таратқышы да қолжетімді. Бұл диапазонда индий галлий арсениді (InGaAs) [30] негізінде жасалған лазердің жартылай өткізгіш түрі қолданылады. Қазіргі таңда талшықты-оптикалық байланыс қолданылатындықтан лазерлер 1310, 1550 нм толқын ұзындықтарына арнап жасалған. Бұл сәулелер бос кеңістіктегі оптикалық байланыста да қолданыс тапты.

2 Сымсыз байланыс жүйелерінің проблемасын бос кеңістіктегі оптикалық байланыс арқылы шешу

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс ауа немес вакуумдық ортада дерек таратуға арналған. Ол талшықты оптикалық байланысқа сәйкес хабар тарату жылдамдығын ұсынғанымен бағасы жағынан қымбатқа түседі [31]. Қарапайым сымсыз байланыста деректерді жіберуде «соңғы миль» проблемасы өзекті мәселе екені айтылған болатын. Бұл мәселені жергілікті желіге (LAN) негізделген бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жоғары өткізу қабілеттілігі есебінен шеше алады. Жүйе оптикалық жүйеге ұқсас келеді. Онда негізгі қабылдағыш пен таратқыш элементтері ретінде модулятор, демодулятор, оптикалық көз, оптикалық детектор көрсетілген.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс желісінің өнімділігі алдымен орнату алаңының физикалық сипаттамаларына және климаттық жағдайларға байланысты. Атмосфераны кесіп өтетін жіберілетін оптикалық сәуле атмосфералық жағдайларға байланысты жұтылуы, шашырауы немесе ауысуы мүмкін. Жалпы, ауа райы жағдайлары мен көрінуді нашарлататын немесе төмендететін жағдайлар оптикалық байланыс жұмысына кері әсерін тигізеді.

Бұл технология қарапайым өмірде адамның көру деңгейімен салыстырғанда екі-үш есе қашықтықта ақпарат алмасуға қабілетті. Жүйенің жалпы өнімділігі арна теңдеуінен алынған арна қорының көмегімен сандық түрде анықталады. Бұл теңдеу кез келген радиожилік (РЖ) байланысы үшін біріктіру теңдеуіне ұқсайды.

Тасымалданған хабар қуатынан бастап қабылдау кезіндегі сигнал күшін салыстыру кезінде қуат төмендігі байқалған жағдайда арнаның барлық бұзылуларына анализ жасалады.

Бос кеңістікте арна таратқышынан шығатын оптикалық өрісте сәуленің кеңеюі барысында жоғалулар болады. Өнімділік параметрі қуат арқылы анықталады.

$$P_R = P_T \times G_T \times G_R \times A_{\text{жүйелік желі}} \quad (2.1)$$

Мұндағы, P_R [Вт] – алынған сигнал қуаты, P_T [Вт] – беру қуаты, G_T – тарату, қабылдау антеннасының күшеюі, G_R – қашықтықтағы жоғалулар, $A_{\text{жүйелік желі}}$ – жүйеге тәуелді шығындар.

Таратқыш саңылау толған кезде Гаусс сәулесіндегі таратушы антеннаның күшейту коэффициенті G_T :

$$G_T = \frac{32}{Q^2} \quad (2.2)$$

Мұндағы Q [рад] – жіберілетін сәуленің толық бұрышты алшақтығы e^{-2} .

G_R диапазонындағы алшақтық жоғалуы L сызығының таралу алшақтығына байланысты анықталады.

$$G_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 \quad (2.3)$$

Одан бөлек, қабылдау антеннасының телескопиялық апертурасы бар күшейтілуі антенна диаметрі D көмегімен анықталып, келесі формуламен есептеледі:

$$G_R = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (2.4)$$

$A_{\text{жүйелік желі}}$ қалған жүйеге тәуелді жоғалуларды көрсетеді. Мұнда телекоптағы жоғалулар, желі сәкес келмеуінің әсерінен жоғалулар, бақылағыш жүйелердегі жарықтың бөлінуі секілді жоғалулар кіреді.

Атмосфералық әсерлердің болмауынан желі қоры [Дб] келесідей өрнектеледі:

$$M_{link} = P_R - S_r \quad (2.5)$$

Мұндағы, P_R [дБм - децибел-милливатт] алынған қуат логарифмдік өлшем бойынша белгіленуі керек. S_r [дБм] қабылдағыштың сезімталдығы – қабылдағыштан күтілетін сипаттамаларға қол жетуін қамтамасыз ететін қуат [32].

2.1 Атмосфералық әсерлердің бос кеңістіктегі оптикалық байланысқа кері ықпалы

Атмосфералық әсерлер, яғни құбылыстар хабар таратушы лазердің қозғалысына әсері көп екені белгілі. Тұман жағдайында лазерлік жарық берілуі мүмкін емес. Себебі кейде қатты тұман жағдайында өшулік бірнеше ондаған Дб/км- ге тең болады. Ал ашық аспан кезінде аэрозоль мен ауада болатын молекулалардың әрекетінен әлсірейді.

Әдетте, бұлт немесе қалың тұман немесе тұман арқылы берілу мүмкін емес, себебі әлсіреу бірнеше ондаған дБ/км-ден асады. Сигнал ашық аспан жағдайында ауа молекулалары мен аэрозольдар әсерінен болатын әлсіреу салдарынан әлсірейді.

L қашықтықтан өткен лазерлік жарықтың өткізу коэффициенті Бер заңымен өрнектеледі. Бер заңы параллель орналасқан бірнеше жарық жұтатын бір түсті беттерден лазерді өткізу арқылы оның біртіндеп әлсіреп жоғалып кететіндігін есептеуге негізделген.

$$T = \exp(-a_s \times (\lambda) \times L[\text{км}]) \quad (2.6)$$

Экстинкцияның оң әсері ($a_s \times (\lambda)$) қоршаған орта экстинкция деңгейін сипаттайды. Экстинкция – қоршаған ортада шашырау немесе жұтылу әсерінен жарықтың әлсіреуі. Атмосфералық микрогаздар әрқайсысы көп жіңішке жұтылу жолақтарынан тұратын қатты және кең жолақтар тудырады.

Жолақтардағы спектрлік таралу негізінде 0,3 мкм-ден 14 мкм-ге дейінгі [32] аралықта спектрді бағалай отырып, жіберілген сәуленің төмен жоғалуы кезіндегі атмосфералық өткізу терезінің мәнін есептеп шығаруға болады.

Лазерлік жарықты таратқанда жұтылудан бөлек шашырау да болатынын ескерген жөн. Оны Релейлік шашырау коэффициентімен көрсетуге болады. Биіктік пен толқын ұзындығы көбейген сайын шашырау эффектісі азаяды.

Атмосфералық турбуленттілік дегеніміз – температураның, қысымның, жел бағыты мен жылдамдығының өзгеруіне байланысты пайда болатын атмосфераның бір қасиеті. Вакуум арқылы таралған лазерлік сәуле осы турбуленттілік әсерінен фазалық және амплитудалық өзгерістерге ұшырайды. Бұл өзгерістердің салдарынан атмосфералық сыну көрсеткішінің де өзгерісі бақыланады. Соған байланысты жылу градиенттерін күцфн ретінде қарастыруға болады. Атмосфера турбуленттілігі бүгінгі таңда көп зерттелген. Оны зерттеудің логарифмдік қалыпты турбуленттілік сияқты моделі бар. Көптеген модельдердің ішінде ерекше көзге түскен себебі онда математикалық амалдарды өңдеуде ыңғайлылығында. Бірақ, турбуленттіліктің өте аз, яғни әлсіз деңгейін бір ғана шашырау болғанда сипатауға ғана арналған. Ұзын байланыс диапазондарында шашырау саны бірнешеу болған сайын толқын күшейе түсіп, логарифмдік қалыпты модель жарамай қалады.

Модуляция процесіне негізделген турбуленттіліктің гамма-моделінде атмосферада болатын лазерлік жарық таралу жолында пайда болатын үлкен әрі кіші өлшемдегі әсерлер жауапты деп есептеледі. Мұнда таратқыш пен қабылдағыш арасындағы аймақ Френель аймағы деп аталады. Негізі Френель аймағы дегеніміз – сол екі нүкте арасындағы көру сызығы ізінің айналасындағы эллиптикалық аймақ. Френель аймағы сигналдарды қабылдағышқа тасымалдауға көмектеседі. Бұл аймақтағы кішкене құйынды әсерлер аз мөлшердегі сигнал берсе, сәйкесінше, үлкен құйынды әсерлер сигналдың үлкен масштабты әсерін тудырады. Френель аймағының кіші әсерлерә шашырау тудыратын болса, үлкен әсерлері сыну тудырады. Кішкене масштабтағы әсерлер үлкен масштабтағылармен модуляцияланатындықтан сәулелену кезінде екі бір-біріне тәуелсіз процесстер I_x пен I_y көбейтіндісі ретінде өрнектеледі.

$$I = I_x \times I_y \quad (2.7)$$

Мұндағы I_x пен I_y үлкен және кіші турбулентті құйыннан туындайтын процесстер.

Қарапайым тілде сцинтилляция – қоршаған ортада жолығатын заттардың сыртқы факторлар әсерінен протондармен, кванттармен, зарядталған бөлшектермен әрекет етуі әсерінен болатын қысқа ұзақтықтағы жарық шығару құбылысы. Алыс қашықтықта орналасқан таратқыштардан сигналды қабылдайтын қабылдағышқа бағытталған жарық қарқындылығының өзгерісін атмосфералық жылтыр арқылы бақылауға болады. Қабылдағышқа жеткен сигнал жолында температураның ауысуы сыну көрсеткішіне тигізетін

әсері жеткілікті. Сыну көрсеткішінде кездесетін өзгерістер жарық сәулесінің бөліктерін жанға қарай бұратын атмосфераның кішкене линзалары ретінде көрсетіледі. Бұл тербелістегі уақыт мөлшері жарықтың ауаны кесіп өтетін уақытына тең.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс арнасының басты мәселелерінің бірі трансиверлерді, яғни қабылдап таратқыштарды теңестіру болып келеді. Арна таратқыштары қарама-қарсы бөлікте орналасқан қабылдағыштың тар саңылауына бағытталған лазерлік жарықты жіберуі керек. Қалыпты жағдайда бос кеңістіктегі оптикалық байланыста бір емес бірнеше жарық сәулелері бір мезетте жіберіледі және олардың әрқайсысы диаметрі жағынан 5 см-ден 8 см-ге дейін жетіп 1 м-ден 5м-ге дейінгі арақашықтықты қамти алады. Ауада немесе вакуумда орналасқан оптикалық байланыс проблемасы көру қабілетінің шектеулілігіне байланысты қиындай түседі. Яғни, таратқыштан келген сигнал қабылдағыштың "қабылдау конусына" жетпейтіндіктен сигнал әлсіреуі, шатасуы, жоғалуына алып келеді.

Бос кеңістікті жолдағы шығындар дегеніміз – кедергілер мен шағылысулар болмаған кездегі бос кеңістікте сигнал қуатының әлсіреу қүбылысы.

Қалыпты жағдайда бос кеңістік ретінде ауа қарастырылады. Бұл шығындардың пайда болуы жабдықтың толыққанды жетілдірілмегендігіне, антенналардың күшейткіштігінің төмен болуымен байланысты орын алады.

Бос кеңістікті жолдағы шығындар (арна ұзындығының әсері) келесі өрнек бойынша сипатталады:

Бос кеңістіктегі жолдағы шығындар теңдеуі (FSPL) және арна ұзындығының әсері төменде келтірілген :

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2.8)$$

2.2 Сымсыз байланыс жүйесіндегі мәселелердің негізгі шешімі

Ауада жарық көзімен таралатан ақпараттың барлық типтері оңай, әрі жылдам қосылуға себепші бола алады. Осыған байланысты ол "соңғы миль" мәселесін шешудің жолдарын ұсына алады. Жоғарыда бос кеңістіктегі оптикалық байланыста болатын басты мәселелерді көрсеттік.

Макро деңгейдегі арна сигнал-шу қатынасының төмен болу болмауына байланысты жұмыс істеп тұруы да, істемеуі де мүмкін. Арна тұрақты жұмыс атқармаған жағдайда сигнал ақауы бар арнаны айналып өтіп, балама каналдар арқылы тасымалдануы мүмкін. Бұл желілік деңгейдегі шешім ретінде қабылданады. Дегенмен, сымсыз оптикалық арналар ерекше назар аударуды талап етеді.

Сигнал өткізу қабілеті ауа-райына байланысты төмендеген кезде немесе сигнал әлсіреген жағдайда қателер саны көбейе түсуі мүмкін. Бұл кезде дерек тасымалын тоқтатып, қоршаған орта кедергілері бәсеңдеп жойылған сәтте қайта қалпына келтірген тиімді. Дегенмен, оптикалық байланыста дерек

тасымалы жоғары жылдамдықта жұмыс жасағандықтан оны аз уақытқа өшірудің өзі көп мөлшердегі жадты талап етеді.

Жадтағы ақпаратты қалыпа ұстап тұру үшін электрондық және оптикалық буфер қажет болады. Ал арнаның өткізу қабілеті төмендей отырып жұмысы тоқтатылмаған болса жоғары басымдылықтағы деректер тасымалданып, төмен аңыздылықтағы деректер тасымалы уақытша тоқтатылады. Мысалы ақпараттың электронды поштадағы сүзгіленуі секілді. Бұл дегеніміз жоғары деңгейдегі хабарлар тасымалы, дыбыстық деректер тасымалы басымдыққа ие болады деген сөз.

Желілік деңгейде дерек тасымалының соңғы милыіндегі мәселелердің шешіміне деректерді қайта жіберуді жатқыза аламыз. Бұл тәсіл қабылдау мүмкін болмаған кезде немесе ақау анықталу ықтималдығы пайда болған кезде қолданылуы мүмкін.

Қайта беру әдісін атмосфералық турбуленттілік жағдайында қолданған тиімді. Себебі, деректерді қайта жіберу оның дұрыс жетуін қамтамасыз етеді [32].

Барлық түйіндерді бір желіге біріктіру желінің бір тармағы істен шыққан мезетте басқа тармақтар арқылы хабар тарату арна жұмысын жеңілдетеді. Трансиверлер арасын жабу үшін арналар жеткілікті жұмыс жасаған кезде ғана жергілікті желінің кемтіктерімен күресуге болады. Трафиктегі өзге талаптарды ескере отырып ең тиімді бағытты (маршрутты) таңдауға болады. Оның бағытын өзгерту үшін екі аралық арасындағы таратқыштар мен бағыттағыш технология параметрлерін өзгерту қажет. Резерте қосымша байланыс жолдарын жоғары деңгейде қамту байланыс төмендеген аумақтарда желілерді қайта жіберуге мүмкіндік береді.

2.3 Бос кеңістіктегі оптикалық байланыстың адам өміріндегі қауіпсіздік проблемалары

Сымсыз оптикалық байланыс арналарында басты қауіпсіздік проблемасы – көз. Мамандардың арнаны орнату барысында қолданылатын телескоптар мен бинокльдерде таратылатын сәулені бақылауда ұстау кезінде ғана емес, жіберілген лазер жарығының жолын кездейсоқ адамдам кесіп өткенде лазердің көзге келтіретін зиянды әсерлері бар. Соған сәйкес лазердің сәулеленуінің қауіпсіз параметрлері IEC 60825 [33] халықаралық стандартында көрсетілген. Зиянды әсерлер лазердің импульс ұзақтығына, толқын ұзындығына, өлшеміне байланысты болады.

Оптикалық жарықтан адамның көз торы зақымдануы мүмкін. Бұл әсерлер адамның көру мүмкіндігінің ұзақ мерзімге немес уақытша жоғалуына соқтырады. Толқын ұзындықтары 1400 нм-ден 400 нм-ге дейінгі лазер сәулесін адам денесі қарқынды түрде қабылдайды, сондықтан жарық көзге көп зиян келтірмейді.

Зерттеу нәтижелеріне сәйкес бос кеңістіктегі оптикалық байланыс 1550 нм мен 800 нм толқын ұзындығында болса, сәйкесінше, ондағы қуат тығыздығы 100 мВт/см² пен 2,0 мВт/см²-қа тең болады. Осыған сәйкес

өткізгіш линзаға арналған лаер қуатын арттыруға болады. Мысалы, диаметрі 100 мм линзадағы 800нм толқын ұзындығы үшін лазер қуатын 160 мВт-қа дейін, ал 1550 нм үшін 8Вт-қа дейін арттыруға болады. Бұл дегеніміз толқын ұзындығы 1550 нм-ге тең болғанда 800 нм-ге тең болғанмен салыстырғанда сәуле шығару қуаты 50 есеге артып түседі [34].

Көз қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін көрінетін жарық немесе ультракүлгін байланыс жарықтары пайдаланылмайды, себебі олар адам денсаулығына қауіптірек. Сондықтан алыс инфрақызыл сәулелер пайдаланылады.

Көздің шыны бөлігі 400-ден 1400 нм дейінгі толқын ұзындығы үшін мөлдір болып көрінеді. Дегенмен, 1400 нм-ден жоғары толқын ұзындығындағы инфрақызыл сәулелер үшін жарық көздің шыны қабатына өтпейді, сол себепті адам көзіне келтіретін зияны аз.

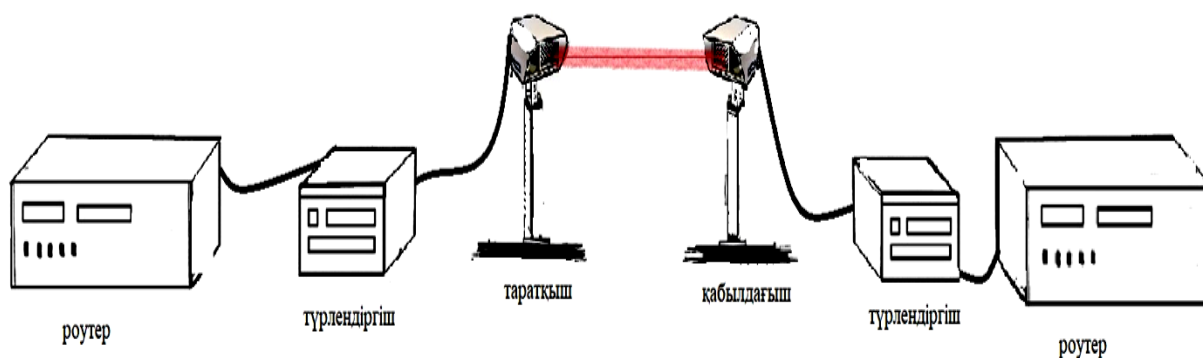
Көз алмасының зақымдалуы аз мөлшерде болсын мүмкін болғанымен, көзге лазердің әсер етуі үшін әлдеқайда көп қуат қажет. Алайда 1400 нм-ден жоғары толқын ұзындығында жұмыс жасайтын бос кеңістіктегі оптикалық байланыс желісі 850 нм толқын ұзындығында жұмыс жасайтын желімен салыстырғанда 100 есеге дейін күшті бола алады, бірақ адам денсаулығы үшін зиянсыз болуы мүмкін.

1400 нм толқын ұзындығындағы жұмыс жасайтын лазерлерге қол жеткізу қиын әрі олар бағасы жағынан да басқа лазерлерден асып түседі. Бірақ уақыт өте 1550 нм толқын ұзындығында жұмыс жасайтын жаңа лазерлерді қолданатын жабдықтар бос кеңістіктегі оптикалық байланыс желісінде өндірілген.

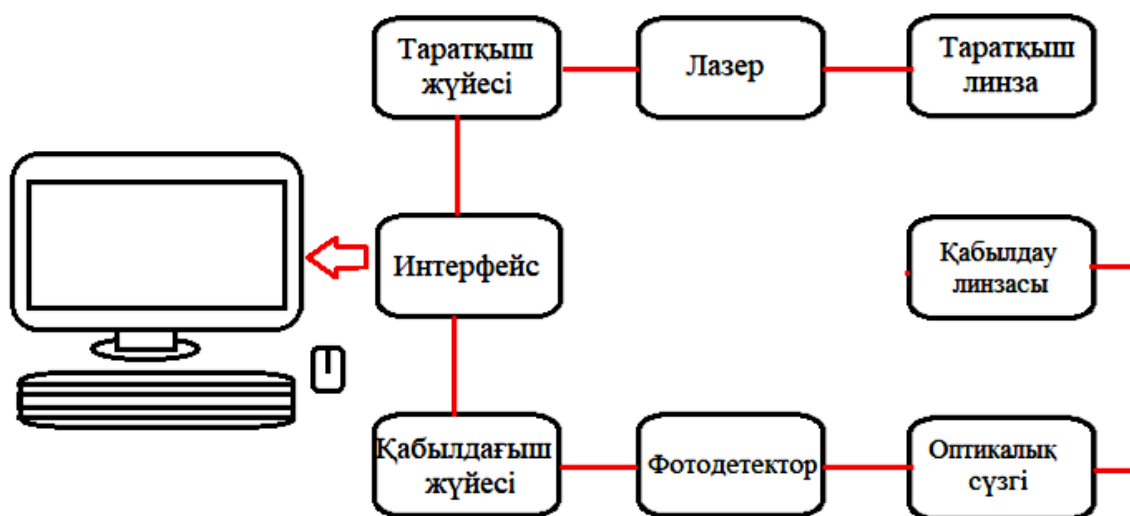
2.4 1310,1550 нм толқын ұзындығындағы радиациялық қуатты, байланыс диапазонын, қабылдау оптикасының диаметрін есептеу

Сымсыз оптикалық байланыстың телескопиялық линзасы бар лазері фотонды детекторға бағытталады. Ауада оптикалық байланысты тарату принципі теледидарды пульт көмегімен алшақтан басқаруға ұқсас келеді.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс 3-суретте көрсетілгендей таратқыш пен қабылдағыш арасындағы толық дуплексті байланысты қамтамасыз ететін қарапайым схемадан тұрады. Таратқыш та, қабылдағыш та компьютерге немесе телекоммуникациялық желіге тікелей қосылады. Бұл технология өз арасында бірмодалы және көпмодалы талшықты оптикалық кабельдер арқылы немесе коаксиалды кабельдер арқылы жалғанады. (2.1 суретте көрсетілген)



2.1-сурет – Екі нүкте арасындағы бос кеңістіктегі оптикалық байланыс технологиясы бойынша деректерді беру схемасы.



2.2-сурет – Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйесінің блок-схемасы

Кеңістіктегі оптикалық байланыс қабылдағышының өзіндік құрылымдық схемасы 2.2 суретте келтірілген.

Бұл схема екі блоктан тұрады: лазерді таратқыш және оптикалық сәулені қабылдағыш. Оптикалық сәле тек қана лазер емес, одан бөлек жарық диодты шамнан немес бірнеше лазер көзінен тұруы мүмкін. (2.2 суретте көрсетілген)

Қысқа қашықтықтағы сымсыз оптикалық байланыста [35] жартылай өткізгіштер мен светодиодтар қолданылады. Ал алыс қашықтыққа хабар тарататын оптикалық жүйелерде тік қуысты беттік сәуле шығаратын лазер орнатылады.

Жарық диодты шамдармен салыстырғанда лазерді қолданған тиімді [36]. Себебі, лазер қуаты мен жіберу жылдамдығы жоғары. Кеңістіктегі оптикалық байланыс арнасындағы дерек тарату жылдамдығы сол құрылғының өндірушісіне тікелей байланысты болады. Телекоммуникациялық протокол нөлге қайтарылатын (RZ) және қайтарылмайтын (NRZ) модуляциялары бар сымсыз оптикалық байланыс арналарына сәйкес таңдалып қолданылады.

Сәуле алшақтығының болуы арақашықтық өсуіне байланысты сәуле диаметрінің өсуіне алып келеді. Қуат тығыздығының таралуы сәуленің таралу бағытына перпендикуляр жазықтықта орналасқан Гаусс таралуымен анықталады. Ол сәуле эффективті қабылдау ауданынан үлкен болатын қабылдағыш жазықтығында жарықтандырылған аймақ жасайды. Жазықтықтардың әсерінен сәулелік қуат әлсірейді. Одан бөлек қоршаған орта мен атмосфералық жағдайлар сәулені сіңіру немесе шашырату әсерінен қуат шығынын тудырады.

Қабылдағышқа жеткен сәуле қуаты келесі формула бойынша өрнектеледі [37]:

$$P_{\text{қабылдағыш}} = P_{\text{таратқыш}} \times \frac{D_{\text{қабылдағыш}}^2}{(\theta R)^2} \times \tau \quad (2.9)$$

Мұндағы, $P_{\text{таратқыш}}$ – таратқыштың сәулелену қуаты, $D_{\text{қабылдағыш}}$ – қабылдағыш оптикасының диаметрі, R – қабылдағыш пен таратқыш арақашықтығы, θ – сәуленің таралу бұрышы, τ – атмосфераның өткізу коэффициенті.

Жүйе жазықтықтағы сәуле фокусын дұрыстау үшін фотодиод детекторын пайдаланады. Оптикалық жүйе қамтитын үлкен аймақ үшін өте қарқынды сигналдар пайдаланылады. Үлкен аумақтық оптикалық жүйелерде кіші аумақты фотодиодтар мен жарқыраудың (жыпылықтау) азаюы есебінен қолдану тиімді. Қабылдау жүйесінде саңылаулар болған жағдайда фотондар ағынының әсерінен «апертураның орташалануы» орын алады. Саңылау жеткілікті мөлшерде үлкен болса жарқырау (жыпылықтау) линзаның жоғарғы бетіне түседі. Сол себепті байланыс диапазоны келесі формулаға сәйкес болады:

$$D_{\text{қабылдағыш}} = \sqrt{R\lambda} \quad (2.10)$$

Бұл формула толқын ұзындығындағы жоспарланған байланыс диапазонына линза диаметрі сәйкес келу керектігін көрсетеді. Сондықтан, диапазоны 1 км сызықтың толқын ұзындығы $\lambda = 10$ мкм, ал қабылдау линзасының диаметрі 10 см-ге жетпейтіндей болуы тиіс. Ал үлкен диаметрді пайдаланатын бос кеңістіктегі оптикалық байланыс таратқыштары мен қабылдағыштарының салмағы және бағасы сәйкесінше артып отырады. Бұл дегеніміз мұндай сымсыз оптикалық байланыс хабар таратуда үлкен жылдамдықты пайдалануға мүмкіндік бермейді дегенді білдіреді.

Таңдап алынғын толқын ұзындығының диапазоны 1310-1550 нм аралығында болғандықтан сол аралықтан толқын ұзындығы таңдалады. Таратқыш пен қабылдағыш арасындағы байланыстың максималды диапазоны 850 нм үшін шамамен 1600 м, 1000 нм үшін 1900 м және 1550 нм үшін 2500 м болуы керек. Өте төмен өшулігіне байланысты және таратқыш пен детектордың жоғары сапалы компоненттері арқасында 1550 нм толқын ұзындығы бос кеңістіктегі оптикалық байланысты зерттеуге сәйкес келеді.

Сонымен толқын ұзындығы $\lambda = 1550$ нм ($1,55 * 10^{-6}$ м) тең деп алатын болсақ, жоғарыда айтылғандай таратқыш пен қабылдағыш арасындағы арақашықтық $R = 2500$ м тең. Бұл дегеніміз байланыс диапазоны келесі мәнге тең болады:

$$D_{\text{қабылдағыш}} = \sqrt{R\lambda} = \sqrt{2500 \text{ м} \times 1,55 * 10^{-6} \text{ м}} \approx 0,062 \text{ м} \quad (2.11)$$

1550 нм толқын ұзындығындағы компоненттерге сигнал жіберуші қуатты арттыруға арналған күшейткіштер және WDM – ге жарамды жартылай өткізгіш лазерлік технология.

Белгілі бір диаметрлі сәулелену көзі оптикалық линза арқылы өтіп оптикалық сигнал тудырады. Сәуленің таралу бұрышы 2-ден 10 миллирадиан [мрад] аралығына тең. Таралу бұрышы аз сәулелерді оптикалық байланыстың бағыттаушы және тұрақтандырушы жүйелермен жабдықталғандарында ғана қолдануға болады. Ал қарапайым жүйелерде үлкен таралу бұрышы бар сәулелер қолданылады. Бұл таңдаулар жүйенің атмосфералық сыну кезінде де, тірек құрылысының тербелісі кезінде де жұмыс жасап тұруға көмектеседі. Ол сымсыз оптикалық байланыс орнатудың және қызмет көрсетудің шығындарын азайтады. (2 кестеде көрсетілген)

Кесте 2.1 Сәуленің таралу бұрышының таралу диапазонына тәуелділік кестесі

Сәуленің таралу бұрышы (θ)	Диапазон
0,5 мрад	~1,0 км
2,0 мрад	~2,0 км
4,0 мрад (~ ¼ градус)	~2,9 км

Миллирадиан мәндерін градуспен есептеу үшін $1^{\circ} \approx 17$ мрад өрнегін пайдаланамыз. Сәуленің таралу бұрышы 2 миллирадианнан [мрад] басталатындықтан осы мән таңдап алынып, оның градустық өлшемі есептеледі. Егер, $1^{\circ} \approx 17$ мрад болса, 2 мрад пропорция арқылы есептегенде $\theta = 0,117^{\circ}$ – қа тең екендігі анықталады. Ал, атмосфераның өткізу мүмкіндігі (τ) жүйенің жылдамдығына тең.

Таңдап алынған бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйесі офистік ғимараттар арасындағы локальді желіні (LAN-LAN) Fast Ethernet жылдамдығында қосады деп есептейтін болсақ, атмосфераның өткізу мүмкіндігіміз Fast Ethernet жылдамдығына сәйкес келеді ($\tau = 10 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}} = 10^7 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$). (3 кестеде көрсетілген)

Кесте 2.2 - Таратқыштан шығарылатын оптикалық қуаттың сигнал жылдамдығына тәуелді кестесі

Таралу жылдамдығы (Мбит/с)	Оптикалық таралу қуаты
0,1	3×10^{-3} Вт
0,5	$5,8 \times 10^{-3}$ Вт
1	8×10^{-3} Вт
5	1×10^{-2} Вт
10	2×10^{-2} Вт
50	3×10^{-2} Вт

3-кестеге сәйкес Fast Ethernet жылдамдығына сәйкес келетін мәндегі ($\tau = 10 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}$) оптикалық таралу қуаты $P_{\text{таратқыш}} = 2 \times 10^{-2}$ Вт тең екені анықталды. Қабылдағыш қуатын ($P_{\text{қабылдағыш}}$) анықтауда барлық белгісіз элементтердің сандық мәні табылғандықтан орындарына қоямыз:

$$P_{\text{қабылдағыш}} = P_{\text{таратқыш}} \times \frac{D_{\text{қабылдағыш}}^2}{(\theta R)^2} \times \tau \quad (2.12)$$

$$P_{\text{қабылдағыш}} = 2 \times 10^{-2} \text{ Вт} \times \frac{(0,062 \text{ м})^2}{(0,117^0 \times 2500 \text{ м})^2} \times 10^7 \frac{\text{бит}}{\text{с}} \quad (2.13)$$

$$P_{\text{қабылдағыш}} = 0,008 \text{ Вт} \quad (2.14)$$

$$P_{\text{шығыны}} = P_{\text{таратқыш}} - P_{\text{қабылдағыш}} = 2 \times 10^{-2} - 0,0089 = 0,011 \text{ Вт} \quad (2.15)$$

Таратқыштан шыққан сигнал қуаты қабылдағышқа жеткенге дейін сәл болса да шығындалғанын, яғни қуат мөлшерінің азайғанын көріп отырмыз.

Бос кеңістікте лазерлік сәуле шекті мөлшердегі бит бойынша қателік жиілігімен жұмыс жасап тұруы үшін $P_{\text{қабылдағыш}}$ қабылдағыш қуаты шу қуатынан жоғары болуы тиіс. Қабылдау қуаты минимум деңгейіне $P_{\text{қабылдағыш min}}$ сәйкес болғанда байланыс диапазоны келесі формуламен анықталады:

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{таратқыш}}}{P_{\text{қабылдағыш min}}} \times \frac{D_{\text{қабылдағыш}}}{\theta} \times \sqrt{\tau}} \quad (2.16)$$

$$R = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-2}}{0,0089} \times \frac{0,062}{0,117} \times \sqrt{10^7}} = 2512 \text{ м} \approx 2500 \text{ м} \quad (2.17)$$

Ары қарай сигнал модуляцияланып, генерацияланып өзгерген оптикалық сигнал оптикалық сүзгіден, линзадан, салқындау және қоректену

жүйесі бар фотодиодтан, шуыл деңгейі төмен сигналдар күшейкіштен өтіп барып қабылдағышқа келіп түседі.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйесінің қабылдағышына пайдалы сигнал лазерінің жарығынан бөлек кедергі күшейтетін фондық жарықтар да түседі. Нәтижесінде сигналдың шу қуатына қатынасы төмендейді.

Оптикалық жүйе қабылдағышына дейін жететін фондық сәулелену қуаты объективтің көру мүмкіндігіне және де оның апертурасына байланысты болады. Сигнал қуатының кедергі қуатына қатынасын жақсарту мақсатында қабылдағыш оптикалық фильтрмен жабдықталған. Бұл фильтр берілетін сигнал жолын жауып тұратын $\Delta\lambda$ жолағының спектральді диапазонын кішірейтеді. Кедергі көздерін оқшаушау кедергіні азайтудың тағы бір тәсілі болып табылады. Мысалы, жақын инфрақызыл диапазонда байқалатын күн сәулесінің әсерінен туындайтын кедергіден қорғану жолы ретінде бос кеңістіктегі оптикалық байланысты көлеңкеге орнату мәселенің шешімі болады.

Сигналды өңдеу схемасында қабылданған сигнал күшейтіліп, демодуляцияланады, содан кейін интерфейске жіберіледі.

Бос кеңістіктегі оптикалық трансиверлері кеменің ең жоғарғы бөлігіндегі желкендердің қасында, құрылымдық элементтерде және зәулім ғимараттарда орналастырылатындықтан жел соғуына төзімді болып келеді.

Байланыстың жоғалып кетуін болдырмау мақсатында автоматты бақылау жүйелері орналастырылып, жүйенің сәуле бағыты мен тұрақты жұмыс жасауын лазерлік бақылап отырады. Қабылдағыштан ең мықты сигналды анықтау үшін автоматты бақылау жүйесі арқылы орнын өзгертеді. Оған арнайы диодты қозғалыс датчигі бар фотоқабылдағыштар мен үш жазықтыққа бұрылуға, қозғалуға мүмкіндік беретін топсалары көмектеседі.

Кеңістіктегі оптикалық байланыс желісінде оптикалық таратқыш/қабылдағыш [38] есебінен жылу қолданыла алады. Бұл $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі салқын ауа температурасында жұмыс жасауға, оптикалық линзалардың бетін мұз қабаты жаппауына себепші болады.

2.5 Нақты оптикалық байланыс желісінің қабылдау соңында сигнал формасын модельдеу

Диссертациялық жұмыстың эксперименттік бөлігі бос кеңістіктіктегі оптикалық байланысты тәжірибе жүзінде бақылауға бағытталған (2.3-суретте көрсетілген).



а



ә



б

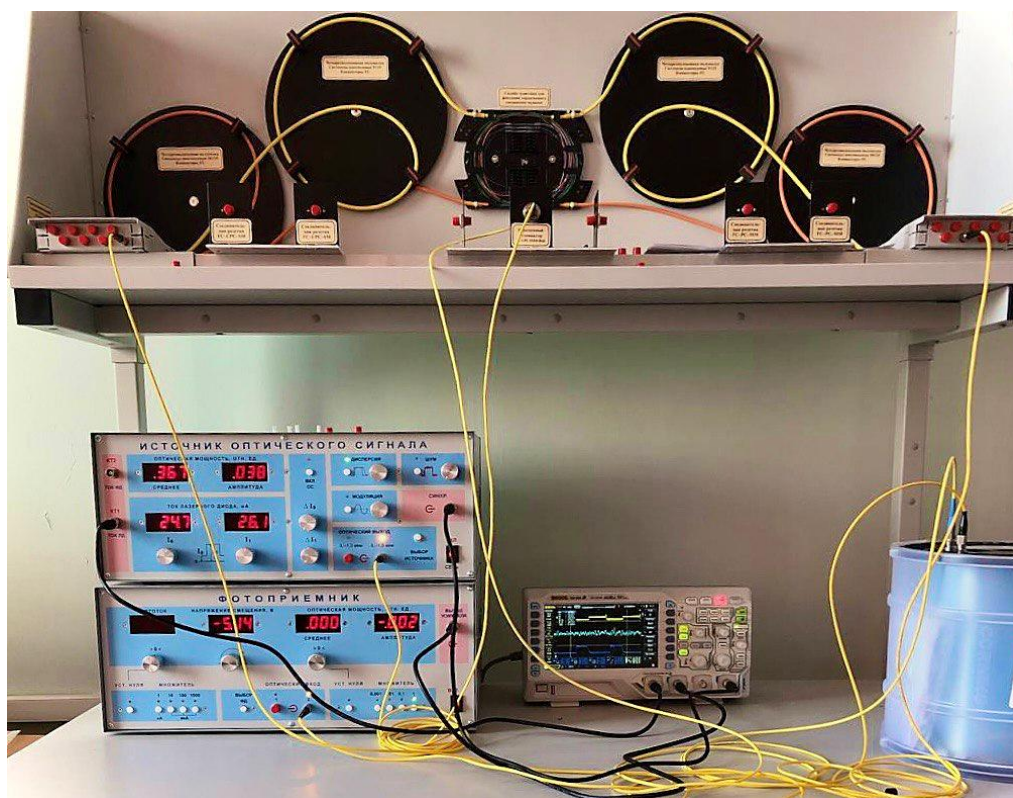


в

2.3-сурет – Эксперимент барысында қолданылатын элементтер: а) ұзындығы 3 метр FC/UPS-SM - 3m –FC/UPS бір модальды талшықты сымы; ә) 220V / 50Hz желісінен қуат көзі бар оптикалық тестер – ОТ; б) "оптикалық сигнал көзі" электрондық блогы-ИОС (Источник оптического сигнала); в) "фотоқабылдағыш" электрондық блогы– ФП (Фотоприемник)

Мұндағы басты мақсат оптикалық сигналдың нақты параметрлерін есептеу және алынған нәтижелерге сүйеніп зертханалық қондырғыда байланыс моделін алу (6-суретте көрсетілген).

Бастапқыда оптикалық сигнал көзі (ИОС) мен фотокабылдағыш(ФП) элементтерін бастапқы күйге сағат тіліне қарсы бұрау арқылы келтіріп, іске қосамыз. Бұл кезде оптикалық сигнал көзі электронды блогында "модуляция", "дисперсия", "шу" батырмалары іске қосулы еместігіне көз жеткізу маңызды. Себебі бұл батырмалар қосулы болған жағдайда соңында алатын осциллограф нәтижесі бастапқы мәннен сұлбасы жағынан өзгеше бейнеге ие болады. Сигнал оптикалық сигнал көзінен шығатындықтан оның шығысындағы сигналға сәйкес толқын ұзындығы (λ) таңдалады. Диссертациялық жұмыста барлық тәжірибелер 1550 нм толқын ұзындығында жүргізіліп жатқандықтан 1,5 мкм-ге сәйкес оптикалық шығыс таңдалады. Нәтижесінде токтың бастапқы мәнін " I_0 " өзгерту арқылы "оптикалық қуат" терезесі лазерлік диод шығаратын қуаттың орташа және амплитудалық мәніне сәйкес келетін "орташа" және "амплитуда" сандық индикаторлары өзгеріп отыратынын көре аламыз. Қуат өзгерісін оптикалық тестер арқылы бақылау үшін оптикалық сигнал көзінің шығысы мен тестер кірісін алғашында таңдап алған бір модальды оптикалық сым арқылы байланыстырамыз. Одан соң тестерді оптикалық сигнал көзі жұмыс жасайтын толқын ұзындығына ауыстырамыз.



2.4-сурет – Оптикалық сызықтық жол моделінің блогы

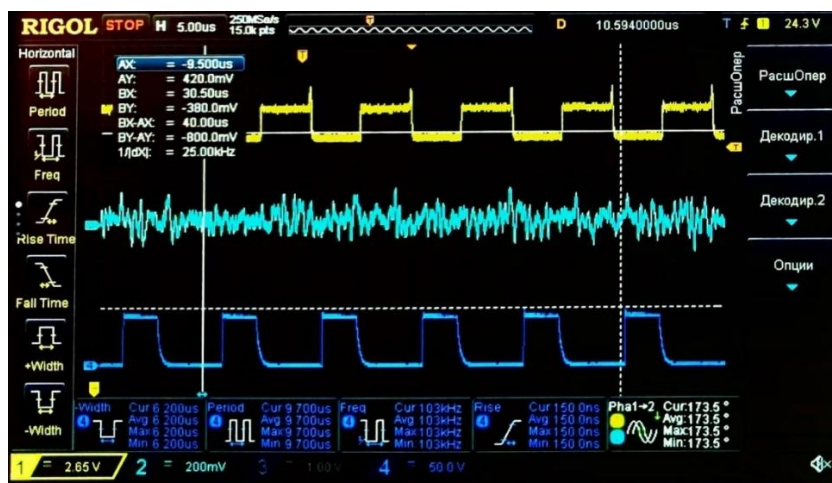
Оптикалық сигнал көзінде лазерлік диод тогының " I_0 " мәнін өзгерту арқылы тестердегі қуат мәнінің орташа мәнін тұрақты ретінде орнатып алып, алдағы уақытта өзгеріссіз қалдыру қажет. Ол үшін электронды блоктағы " I_0 " мәні 0,1мА мен 50 мА аралығын қамтитындықтан орташа мәні ретінде 24,7 мА алынып, сәйкесінше тестерде шыққан қуатты $P = 4.84$ dBm

тұрақтандырып аламыз. Осыдан кейін тестерден "нөлді орнату" деңгейіне өтеміз. Бұл жағдайда құрылғының кірісіне кіретін оптикалық қуат деңгейі нөлге тең болады. Оның дисплейінде 0 дБ мәні пайда болады.

Нақты оптикалық байланыс желісінің қабылдау жолының соңындағы сигнал формасын модельдеу сұлбасын осциллографтан алу үшін оптикалық талшықты сымды фотоқабылдағыш электрондық блогының 2 кірісінен ажыратып 20 дБ айнымалы аттенюатордың кірісіне қосамыз. (6 суретте көрсетілген)

Модельдеу нәтижесінде желіде өшуліктер пайда болатыны анық. Соған байланысты өзіміз таңдап алатын оптикалық байланыс арақашықтығы (L) мен өшулік коэффициенті (α) арқылы желі өшулігін анықтау мүмкіндігі бар:

Аттенюатор шығысын талшықты сым көмегімен қалыпқа келтіруші катушка кірісімен байланыстырамыз. Сым мен катушка типі (бірмодалы,көпмодалы) модельденетін желі типіне сәйкес таңдалады. Біздің жағдайымызда сары түсті бірмодалы талшықты сым. Ал катушканың шығысын басқа бірмодалы сым арқылы коммутациялық қорапшаның кез-келген бір кірісімен қосамыз. Платаның қарама-қарсы бөлігінде екінші коммутациялық қорапша бар.



2.5-сурет – Нақты оптикалық байланыс желісінің қабылдау жолының соңындағы сигнал формасын модельдеуде осциллограф көрсетуі

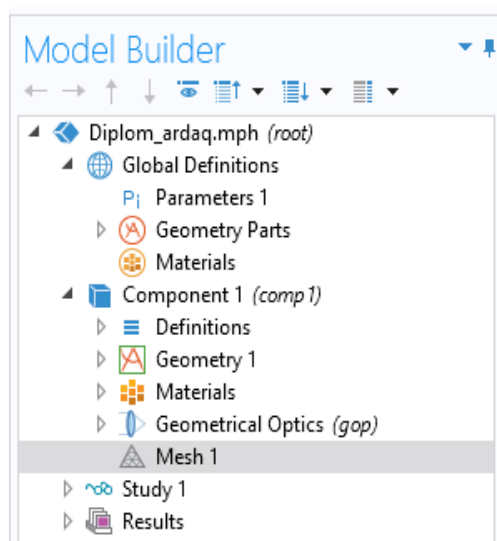
Бір ұшы оптикалық тестерге жалғанған талшықты сымды екінші коммутациялық қорапшаның сегіз кірісіне алма – кезек қосамыз. Сегіз кірістің тек біреуіне қосқанда ғана тестер мәнінің ауытқығанын көреміз. Бұл оптикалық қуаттың тек сол қосқышта ғана бар екенін және алдағы сұлбалар содан алынатындығын білдіреді (7-суретте көрсетілген).

$$A(\text{дБ}) = \alpha \left(\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right) \times L(\text{км}) = 0,43 \times 40 = 17,2 \text{ дБ} \quad (2.18)$$

3 Бос кеңістіктегі оптикалық байланысты COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесінде модельдеу

COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесін ғалымдар мен инженерлер зерттеу нәтижелерін, схемаларын, конструкцияларын, процестерін модельдеу мақсатында пайдаланады. Бұл программада өзара байланысты немесе жеке процестерді сипаттап көрсетуге болады. Бағдарлама электромагниттік, құрылымдық, жылу, сұйықтық, акустикалық, химиялық процестерді модельдеуге арналған. Және оның қолданбалары қатарына үлгі, пайдаланушы интерфейсі, есептерді жатқыза аламыз.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс тар лазер бойымен екі нүкте арасында хабар таратуға негізделгендіктен қарапайым лазердің таралу құбылысын COMSOL Multiphysics бағдарламасының Ray Optics (сәулелік оптика) бөлімінде зерттейміз (8-суретте көрсетілген). Сәулелік оптиканы қолданудың өзіндік жоғары жиілікті электромагниттік модельдеуде, дифракция әсері аздығында, толқын ұзындығы бойынша модельдеу толқындық оптика модулімен енгізілуінде артықшылықтары бар. Сәулелік оптиканы зерттеу келесі деңгейлерден тұрады:



3.1-сурет – COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесінің жұмыс алаңы

Геометрия (Geometry)

- Кірістірілген примитивті пайдалану
- Сәулелік оптика модулінің кітапханаларын пайдалану

Физика (Physics)

- Геометриялық оптика интерфейсі пайдаланады
- Материал моделін таңдау мүмкіндігі
- Материалдар арасындағы шекара параметрлерін беру
- Сәуле шығару мүмкіндіктері
- Оптикалық материалдар кітапханасы

- алтыполярлы, цилиндрлік, тікбұрышты, тұрақты емес
 - Тек физика интерфейсінде пайдаланылатын беттер торды қажет етеді
- Оқу (Study)

Top (Mesh)

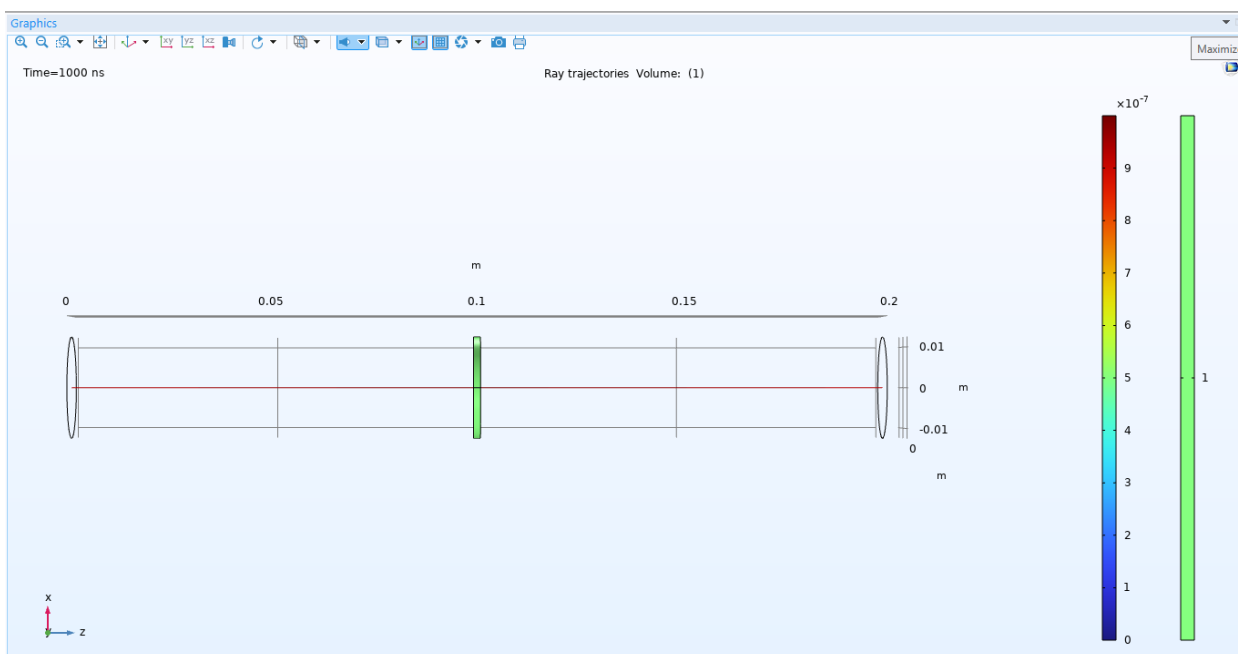


- Сәуле тіреулері зерттеуін іске қосу
- Нәтижелер (Result)
- сәулелер мен дақтардың диаграммалары

Жұқа сәулесі бар лазерлік резонатор екі бет арасындағы линзадан тұрады. Оның объективпен арақашықтығы $f=0.5$ [м], ал сәуленің түсу бұрышы $\theta = 1 \times 10^{-3}$ градус [39]. Comsol бағдарламалық жүйесінде сәулелік оптиканың 3 Д моделін құру барлық бөлімдер арасынан оптика бөлімін таңдап, сәулелік оптиканы геометриялық оптика арқылы бейнелеумен жүзеге асады (9-суретте көрсетілген). Одан соң оқу деңгейінен беттермен сәуленің әрекеттесуін бақылайтын оптикалық жүйені зерттеуге арналған сәулелік бақылау таңдалып алынады. Глобалды анықтамаларына кейбір қажетті параметрлерді енгізіп аламыз: (4 кестеде көрсетілген)

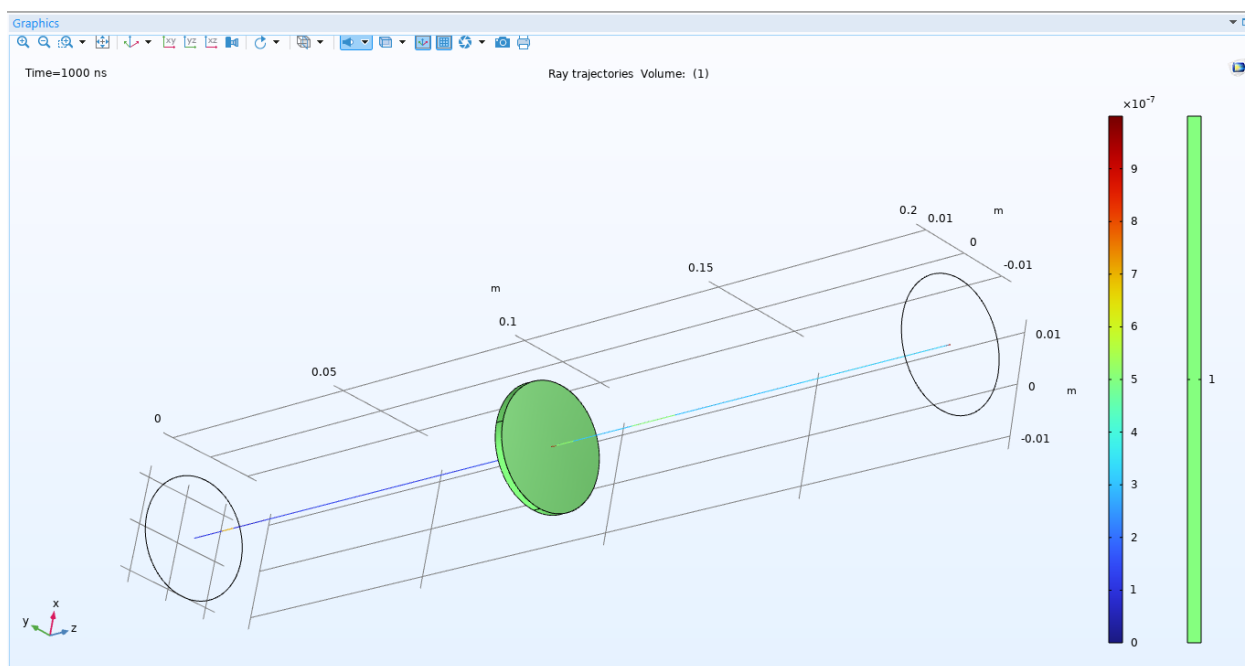
Кесте 3.1 – Сәулелік оптика бейнесінің параметрлері

L	0.1[м]	0.1 м	Айна мен линза арасындағы қашықтық
D	25[мм]	0.025 м	Айна диаметрі
f	0.5[м]	0.5 м	Линзаның фокустық ұзындығы
n	1.5	1.5	Линза индексі
R	$f*2*(n-1)$	0.5 м	Қисықтық радиусы
θ	1e-3[град]	1.7453E-5 рад	Сәуленің шығу бұрышы
TO	1[us]	1E-6 s	Максималды уақыт



3.2-сурет – COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесінде 3Д сәулелік оптика моделінің тік көрінісі

Геометриялық деңгейден екі сфераны және қосымша кітапханадан 3Д модельдегі сфералық тең дөңес линза таңдап алынады. Екі цилиндр радиусын $D/2$, ал биіктігін 10 мм тең етіп аламыз. Бірінші цилиндрдің жазықтық бойынша орналасуы $[0, 0, -10]$ болса, екіншісінікі $[0, 0, 2*L]$. Сәулелік оптика бейнесінің параметрлері көрсетілмеген жағдайда бағдарлама модельді құрастыруда қате береді. Геометриялық оптикада толқын ұзындығы бойынша сәуленің монохроматты таралуы іске асырылады және де екінші сәуленің максималды саны 0-ге тең болады. Себебі өзге сандарды қойған жағдайда сәуле саны артып кетеді. Ортаңғы линза дайындалатын материал индексі 1,5 тең екені кестеде көрсетілген болатын.



3.3-сурет – COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесінде 3Д сәулелік оптика моделінің қиғаш көрінісі

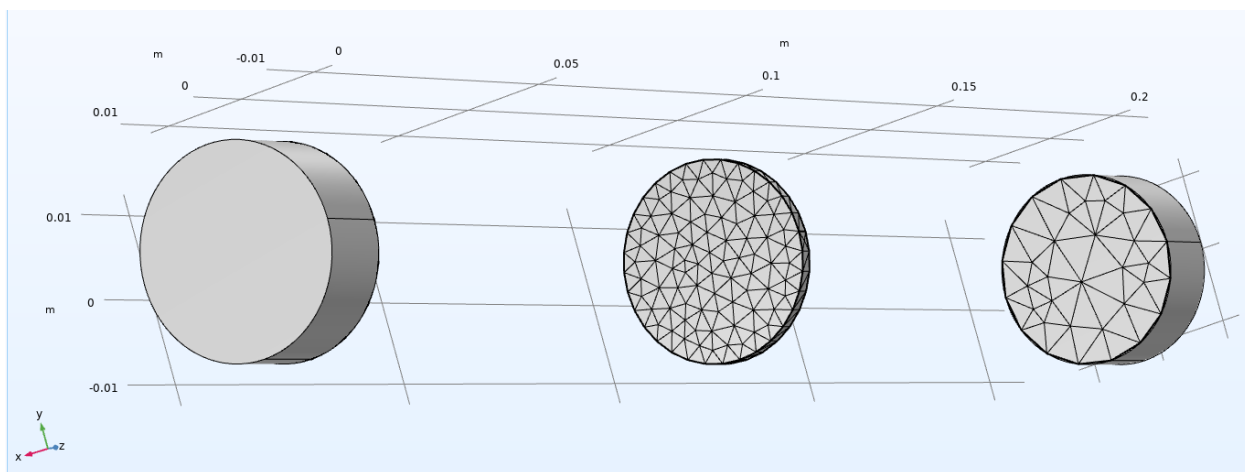
Индексі немесе сыну коэффициенті 1.5, 1.6, 1.74 мәні линзаның қалыңдығын білдіреді. Коэффициент неғұрлым жоғары болса, линза соғұрлым жұқа болады. Біздің жағдайымыздағыдай индексі 1.5 болатын линза стандартты линзалардеп аталады. Индекс 1.6 – жұқа және жеңіл линзалар (10-суретте көрсетілген).

Вакуумдық толқын ұзындығы $\lambda = 660$ нм. Геометриялық оптика деңгейінде екі цилиндрдің ішкі беттеріне айна орнатылады. Тек физика интерфейсінде пайдаланылатын беттен тұрғандықтан модельдің физикалық басқарылатын тор бейнесі алынады. Геометриялық оптиканы модельдеуде тор салу үшін 2Д немесе 3Д модельдегі тегіс беттер таңдап алынады. 3Д модельдің шеткі бөліктеріне жақын орналасқан элементтердің шеткі қабаттарынан алшақ орналасқан элементтерімен салыстырғанда қателер болу қаупі жоғары. Физикалық интерфейс бөлімінен сәулелердің шығуы және таралуын (Ray

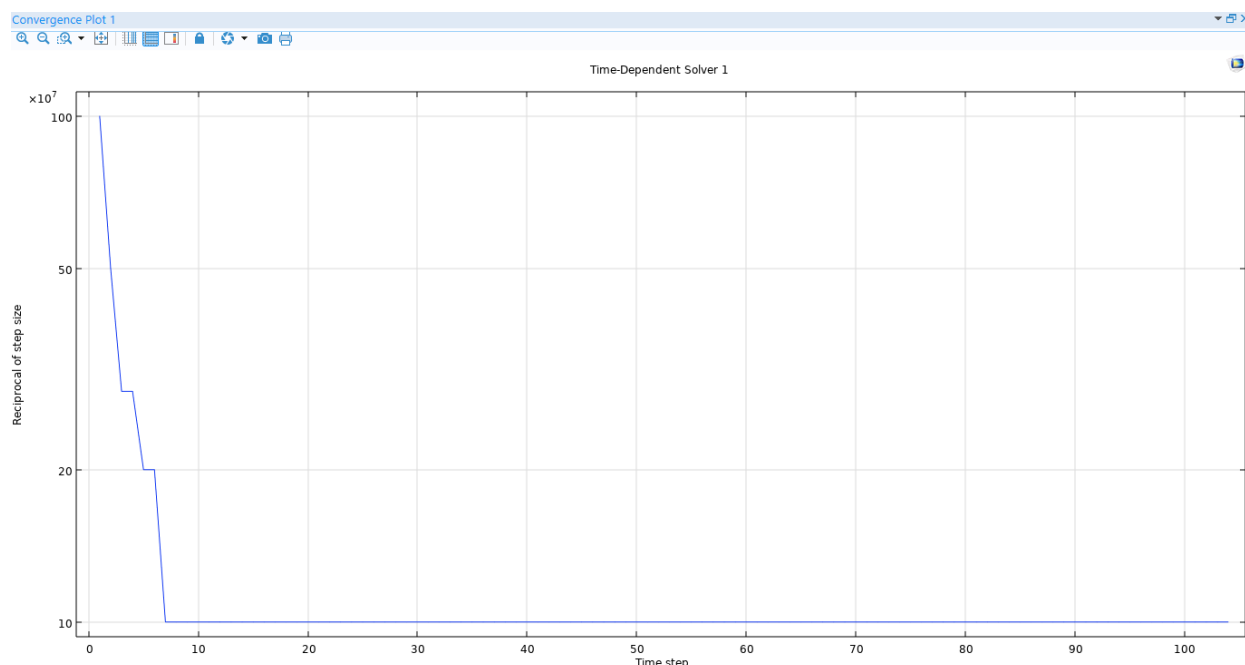
Release and Propagation) таңдау арқылы дискретизация қателігін азайту мүмкіндігі бар.

Алайда егер геометрия жылу ықпалына немесе өзге де деформация түрлеріне ұшыраған жағдайда сәулелердің шығуы және таралуы функциясы модель дәлдігін жоғарылатуға көмектесе алмайды.

Келесі оқу бөлімінің басты бөлігі – сәулелік бақылау (11-суретте көрсетілген). Тор бөлімінде пайда болған нүктелер бірінші цилиндрден шығатын сәулелерді бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін. Әсіресе, пайда болатын лазер сәулесінің траекторияларын біріктірумен айналысады.



3.4-сурет – Сәулелік оптиканы зерттеудің тор деңгейі



3.5-сурет – Лазердің таралуының қадам мөлшері мен уақытқа тәуелділік графигі

Тор құрау барысында өріс құраушылары есептеліп тор нүктелеріне жинақталады. Бағдарламаға өріс қажет болған жағдайда, ол жақын арадағы

торды іздеп, интерполяция жасайды. Бұл дегеніміз белгілі бір жолмен оның мәндерінің қол жетімді дискретті жиынына сәйкес кейбір функцияның белгісіз аралық мәндерін табу. Егер бағдарлама қажетті мәнді анықтай алмаса, модель жаңа тор нүктесін есептеп, ақпараттарды сақтап жасап шығарады.

Жоғарыда келтірілген график COMSOL Multiphysics бағдарламалық жүйесінен алынған (12-суретте көрсетілген). Онда лазердің таралуының қадам мөлшері мен уақытқа тәуелділік графигі көрсетілген. График бойынша уақыт өтуіне орай қадам саны минимум деңгейге жетті. Бұл сәуленің қабылдағышқа жеткенге дейін белгілі деңгейде әлсіреп, қабылдау нүктесіне жеткенде жұтылатынын көрсетеді.

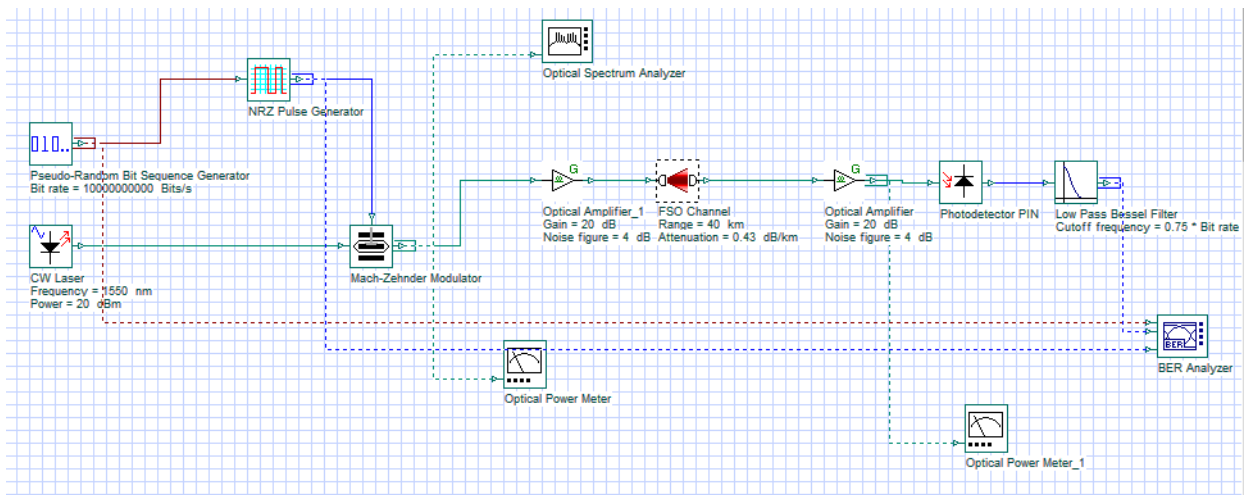
Бұл нәтижелер байланыс ауқымын, таратқыштың алшақтық бұрышы мен диафрагмасының жоғарылауымен геометриялық шығындардың да артатынын көрсетті. Бірақ біз қабылдағыштың диафрагма диаметрінің ұлғаюымен геометриялық шығындар азайғанын анықтадық. Жалпы өшулік байланыс аумағының кеңуімен, көру мүмкіндігінің төмендеуімен және толқын ұзындығының төмендеуіне байланысты өсті.

3.1 Optisystem программалық жүйесінде бос кеңістіктегі оптикалық байланыс көмегімен дерек алмасу моделі Нәтижелерді талдау және компьютерлік модель

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыста дерек алмасудың жұмыс жасау принципін Optisystem программалық жүйесінде бақылау келесі схема бойынша іске асырылады (2.11-суретте көрсетілген).

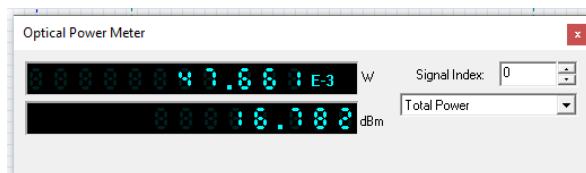
Таратқыш өз кезегінде кездейсоқ биттік жүйелілік генераторынан (PRBS Generator), импульс генераторынан (NRZ Pulse Generator), лазерлік сәуледен (CW laser) және модулятордан (Mach – Zehnder Modulator) тұрады. Жинақталған схемада кездейсоқ биттік жүйелілік генераторында 10 Гбит/с жылдамдықта кодталған ақпарат тасымалы мен толқын ұзындығы 1550 нм, ал қуаты 20 дБм болатын модуляцияланған лазер жарығы сипатталады.

Модуляцияланған лазер жарығы бос кеңістіктегі оптикалық байланыс арнасы (FSO Channel) бойында 40 км арақашықтыққа таратылмас бұрын оптикалық күшейткіштің (Optical Amplifier) 20 дБ күшейту коэффициентіне сәйкес күшейтіледі. Күшейтілген сигнал арна арқылы қабылдағышқа тікелей бағытталады. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыста екі телескоптан тұратын кіші жүйе бар. Олардың арасында 5см және 20 см – ге орналастырылған қабылдағыш пен таратқыштың апертуралары қабылданатын сигналда атмосфералық жағдайларға сәйкес өшуліктер анықталған жағдайда өшулікті анықтауға мүмкіндік береді.

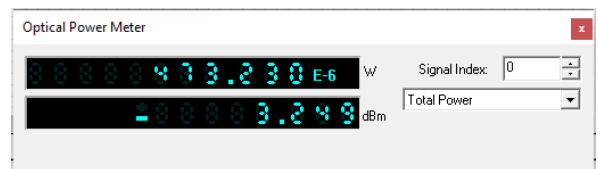


3.6-сурет – Optisystem программалық жүйесінде бос кеңістіктегі оптикалық байланыс көмегімен дерек алмасу моделі [40]

Оптикалық қуат өлшегіш тартқыштағы және қабылғыштағы қуатты дБм – мен де, Вт – пен де есептеп көрсетеді (14-суретте көрсетілген).

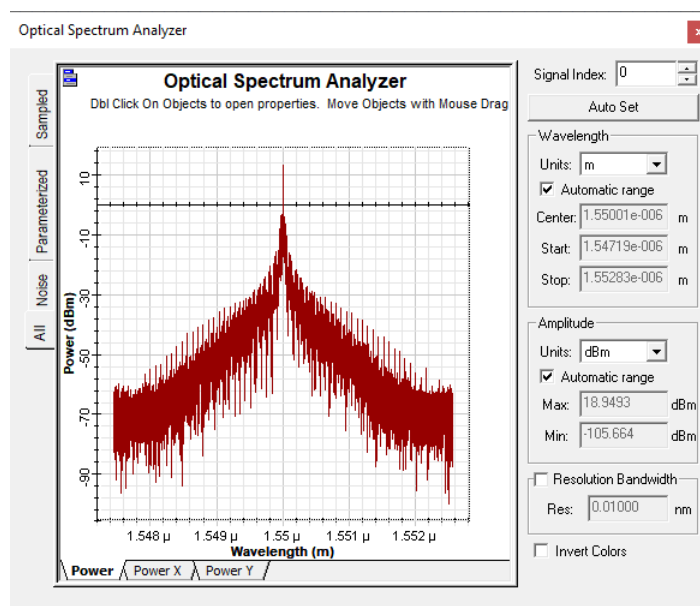


а



ә

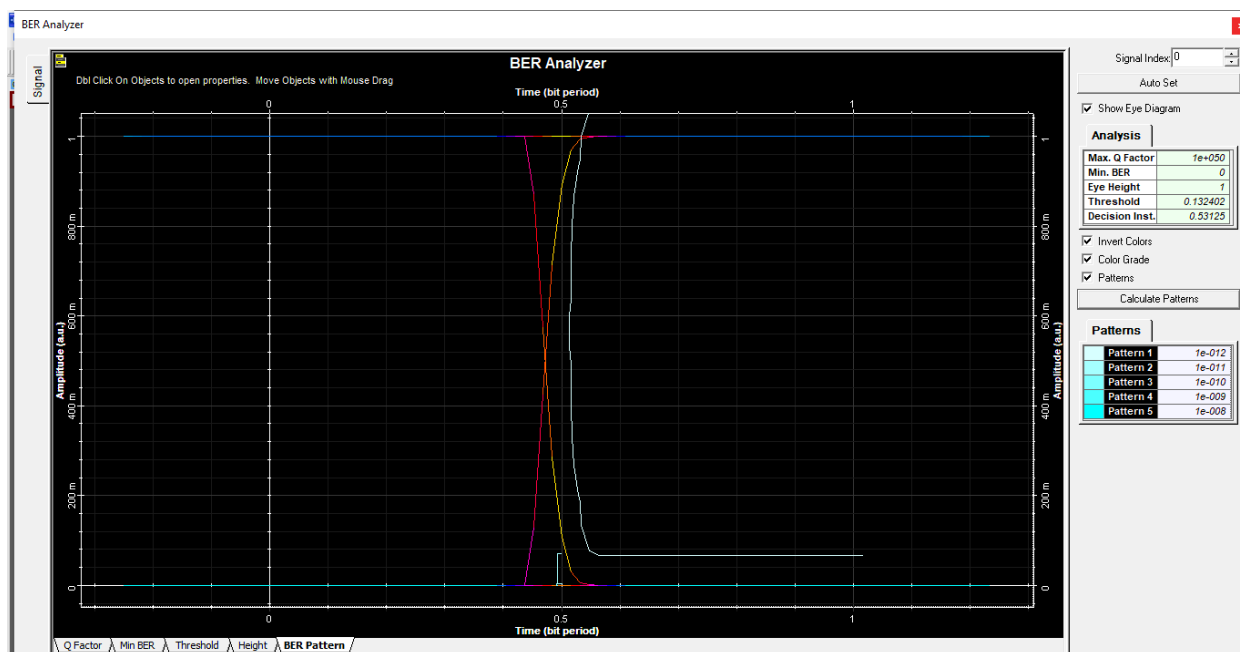
3.7-сурет – Оптикалық қуат өлшегіш: а) таратқыш қуаты, ә) қабылдағыш қуаты



3.8-сурет – Оптикалық спекторының толқын ұзындығы мен қуатқа тәуелді графигі

Алғашқы схема параметрлерінде өшулік 0,43 дБ/км ретінде белгіленеді. Оптикалық сигнал төмен жиілік фотодетектор сүзгісінің (Photodetector) шығысынан қабылданып, сигналдарды сыртқы шудан сүзуді. Бұл модельдеуде үш түрлі визуализатор қолданылады: оптикалық қуат өлшегіш (Optical Power Meter), оптикалық спектр анализаторы (Optical Spectrum Analyzer), бит қателіктерінің жиілігі анализаторы (BER Analyzer). Оптикалық спектр анализаторы бос кеңістіктегі оптикалық байланыс спекторының толқын ұзындығы мен қуатқа тәуелді графигін ұсынады (15-суретте көрсетілген).

Бит қателіктерінің жиілігі анализаторы шу қуатының спектрлік тығыздығының бір битке жұмсалатын энергия функциясына қатынасы ретінде есептейді. Анализатор өз кезегінде көз диаграммасын құрады (16-суретте көрсетілген). Схема нәтижесіне сәйкес бос кеңістіктегі оптикалық байланыс моделінде жарық таралуының кедергісіз көздік диаграммасы төменде көрсетілген. Жүйе жиі кездесетін басты проблема тұман жағдайында хабар тарату екені атап өтілген болатын. Мұндай атмосфералық жағдайда құрылған модель өшулікті 0,43 дБ/км тең етіп қабылдайды.



3.9-сурет – Бос кеңістіктегі оптикалық байланыстың көз диаграммасы

3.2 Нәтижелерді талдау және компьютерлік модель

Бұл бөлімде DWDM негізіндегі Is-OWC жүйесінің архитектурасы ұсынады. Нәтижелер бөлімінде жүйе өнімділігі бағаланады және қол жеткізілген нәтижелер талқыланады. Соңында, соңғы бөлім диссертациялық жұмысқа қойылған талаптар аяқталады және берілген графиктер бағытты айқындалады.

Opti-system және MATLAB [41, 42] бағдарламалық жасақтамасында модельденген is-OWC негізіндегі DWDM мультиплекстеу схемасы 17-суретте көрсетілген. Бұл жүйеде 16 арна 1538,98 нм-ден 1566,31 нм-ге дейінгі әртүрлі

толқын ұзындығына негізделген спутниктік оптикалық таратқыш арқылы жасалады. Толқын ұзындықтары DWDM (ITU grid спецификациясы) төмен байланыс арналары арасындағы стандартты қашықтықта 1,58 нм арналар арасындағы қашықтыққа ие. Дизайн келесі бөліктерден тұрады:

1. 16 арна бойынша 10 Гбит/с деректер генераторы (барлығы 160 Гбит/с).

2. NRZ, лазер және мультиплексор негізіндегі импульс генераторы (ол 16 толқын ұзындығын мультиплекстейді).

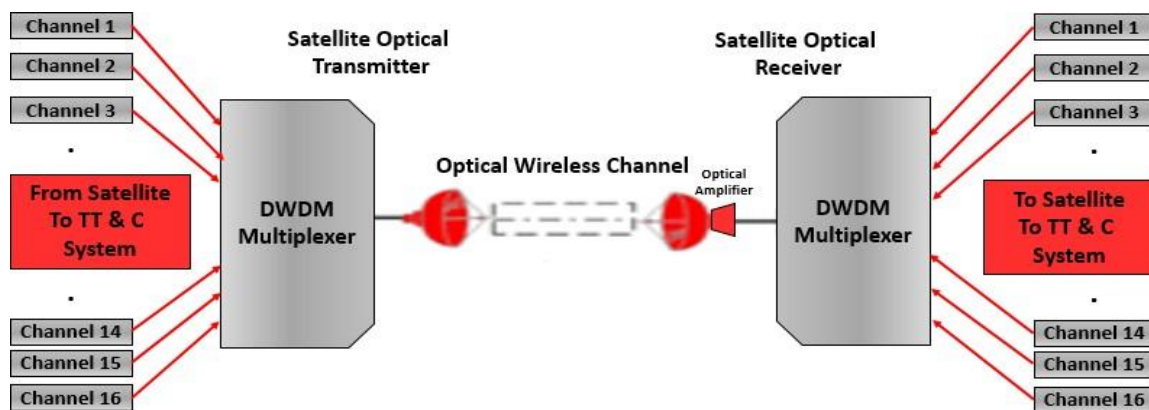
3. TX лазерінің қуаты 30 дБм-ге (3.3-кестеде көрсетілгендей) және 5 дБ-ден кейінгі оптикалық күшейткішке орнатылған.

Opti-system және MATLAB [41, 42] бағдарламалық жасақтамасында модельденген IS-OWC негізіндегі DWDM мультиплекстеу схемасы 17-суретте көрсетілген. Бұл жүйеде 16 арна 1538,98 нм-ден 1566,31 нм-ге дейінгі әртүрлі толқын ұзындығына негізделген спутниктік оптикалық таратқыш арқылы жасалады. Толқын ұзындықтары DWDM (ITU grid спецификациясы) төмен байланыс арналары арасындағы стандартты қашықтықта 1,58 нм арналар арасындағы қашықтыққа ие. Дизайн келесі бөліктерден тұрады:

1. 16 арна бойынша 10 Гбит/с деректер генераторы (барлығы 160 Гбит/с).

2. NRZ, лазер және мультиплексор негізіндегі импульс генераторы (ол 16 толқын ұзындығын мультиплекстейді).

3. TX лазерінің қуаты 30 дБм-ге (3.3-кестеде көрсетілгендей) және 5 дБ-ден кейінгі оптикалық күшейткішке орнатылған.



3.10-сурет – IS-OWC жүйесі арқылы DWDM арналары арналары

Кесте 3.3 – DWDM-IS-OWC жүйесі үшін пайдаланылатын параметрлер

Жоқ.	Параметрлер	Мән
1	IS-OWC арнасының қашықтығы	2000-7000 км
2	IS-WOC толқын ұзындығы	1550 нм
3	Бит жылдамдығы	160 Гбит/с
4	Оптикалық күшейткіш (күшейту)	5 дБ
5	Жалпы арналар	16 арна

6	Импульстік генератор	NRZ
7	Қабылдағышты көрсету қатесі	1,1 мкрад
8	Таратқышты көрсету қатесі	1,1 мкрад
9	Қабылдағыш апертурасының диаметрі	15 см
10	Таратқыштың апертурасының диаметрі	15 см
11	Қосымша шығындар	5 дБ
12	Арна аралығы	1,58 нм
13	ТХ лазері қуат	30 дБм

Таратқыш пен қабылдағыш сәйкесінше диаметрі 15 см және 15 см апертурасы бар оптикалық антеннасы бар OWC арнасымен пішінделген. Сонымен қатар, біз OWC арнасын ғарыш кеңістігі деп санадық. Келесі математикалық теңдеу Is-OWC арнасын сипаттайды [33,34] мұндағы әрбір параметр 3.4-кестеде анықталған.

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R (4\pi Z) G_T G_R L_T L_R$$

Кесте 3.4 Теңдеу элементтерін сипаттау

Элемент	Сипаттама
PT	Таратқыштың оптикалық қуаты
η_T	Оптикалық таратқыштың тиімділігі
η_R	Оптикалық қабылдағыштың тиімділігі
Z	Таратқыш пен қабылдағыш арасындағы қашықтық
LR	Қабылдағышты көрсететін жоғалту коэффициенті
LT	Таратқышты көрсететін жоғалту коэффициенті
GR	Қабылдағыш телескопты күшейту
GT	Таратқыш телескоптың күшеюі
λ	Толқын ұзындығы

Біз жіберуші де, алушы да антенналар қосымша жоғалтулармен (мысалы, қате көрсету) және оптикалық тиімділік 1-ге тең идеалды деп есептейміз. Келесі теңдеу сигнал жоғалуларын көрсетеді [35].

$$R_L(\lambda/4 \pi D)^2$$

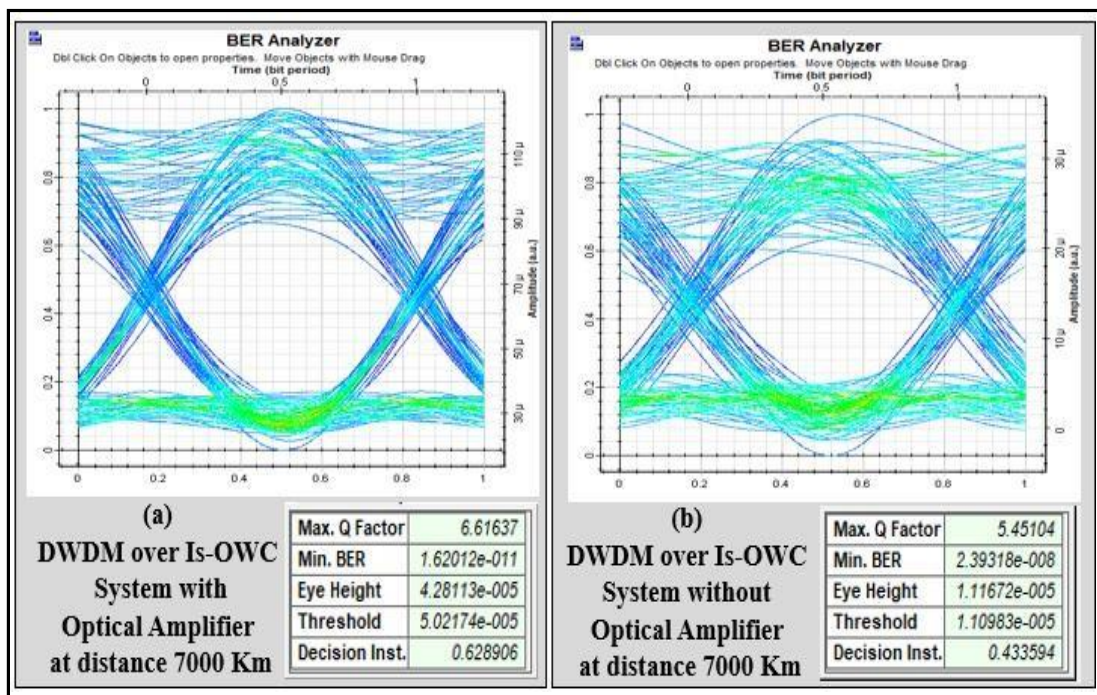
Мұндағы D қабылдағыш пен таратқыш арасындағы қашықтықты білдіреді. Сонымен қатар, 16 спутниктік оптикалық қабылдағыштар жарықты электр тогына түрлендіру үшін қолданылады. Сонымен қатар, біз электр сүзгісі ретінде Low Pass көтерілген косинус сүзгісін қолданамыз. Соңында,

біздің жүйенің өнімділігі көз диаграммалары, BER және Q-факторы арқылы бағаланады +

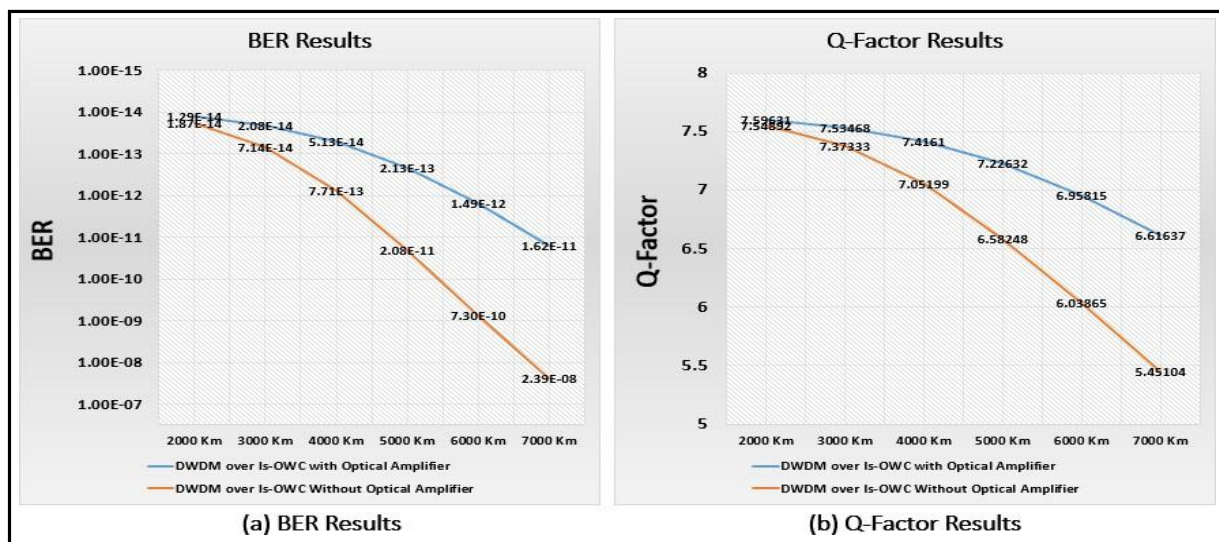
160 Гбит/с дейінгі сыйымдылығы бар 7000 км қашықтыққа негізделген DWDM 16 арналы Is-OWC жүйелерінің өнімділік өлшемдері көз диаграммаларына, BER, оптикалық спектрге және Q-факторға негізделген. Бағалауды екі бөлікке бөлеміз. Бірінші бөлімде біз оптикалық күшейткіштің Is-OWC жүйесіне әсерін зерттейміз. Нақтырақ айтқанда, біз оптикалық күшейткіші бар және онсыз Is-OWC жүйесі арқылы DWDM нәтижелерін суреттейміз. 18-суретте оптикалық күшейткішті пайдаланбас бұрын көз диаграммаларының, BER және Q-фактор өлшемдерінің нәтижелері көрсетілген. Күшейткішті пайдаланғаннан кейін көз диаграммасын ашық көз және анық деп есептейміз. 7000 км қашықтықта оптикалық күшейткішті пайдаланбас бұрын BER және Q-фактор сәйкесінше $1,62E-11$ және $6,61637$ құрайды. Ал күшейткішті қолданбай, олар сәйкесінше $2.39E-08$ және 5.45104 болды. 19-сурет 2000 км-ден 7000 км-ге дейінгі Is-OWC бастапқы қашықтығы бойынша оптикалық күшейткіші бар және онсыз DWDM негізіндегі BER және Q-Factor нәтижелерінің нәтижелерін суреттейді. 18 және 19-суреттерден біз Is-OWC үстіндегі DWDM минималды қуаты бар оптикалық күшейткішті пайдалана отырып, батпалы нәтиже береді деген қорытынды жасауға болады. Бөлімдерде 2000 км-ден 7000 км-ге дейінгі әртүрлі қашықтықтағы оптикалық күшейткіштерді қолдану арқылы жүйеміздің BER және Q-факторын бағалаймыз. 20 және 21-суреттер қашықтықтағы 16 арнаның Is-OWC бойынша DWDM үшін орташа BER және Q-факторының өнімділік өлшемін көрсетеді. Сонымен қатар, 6 және 7-суреттерде көз диаграммасы 7000 км қашықтықтағы барлық арналар үшін ашық және анық. Is-OWC үстіндегі DWDM минималды қуаты бар оптикалық күшейткішті пайдаланып, батпалы нәтиже береді деп қорытынды жасауға болады. Екінші бөлімде 2000 км-ден 7000 км-ге дейінгі әртүрлі қашықтықтағы оптикалық күшейткіштерді қолдану арқылы жүйеміздің BER және Q-факторын бағалаймыз. 20 және 21-суреттер қашықтықтағы 16 арнаның Is-OWC бойынша DWDM үшін орташа BER және Q-факторының өнімділік өлшемін көрсетеді. Сонымен қатар, 22 және 23-суреттерде көз диаграммасы 7000 км қашықтықтағы барлық арналар үшін ашық және анық. Is-OWC үстіндегі DWDM минималды қуаты бар оптикалық күшейткішті пайдаланып, батпалы нәтиже береді деп қорытынды жасауға болады. Қарастырып отырған 2000 км-ден 7000 км-ге дейінгі әртүрлі қашықтықтағы оптикалық күшейткіштерді қолдану арқылы жүйеміздің BER және Q-факторын бағалаймыз. 4 және 5-суреттер қашықтықтағы 16 арнаның Is-OWC бойынша DWDM үшін орташа BER және Q-факторының өнімділік өлшемін көрсетеді. Сонымен қатар, 22 және 23-суреттерде көз диаграммасы 7000 км қашықтықтағы барлық арналар үшін ашық және анық. 20 және 21-суреттер қашықтықтағы 16 арнаның Is-OWC бойынша DWDM үшін орташа BER және Q-факторының өнімділік өлшемін көрсетеді. Сонымен қатар, 6 және 7-суреттерде көз диаграммасы 7000 км қашықтықтағы барлық арналар үшін ашық және анық. 20 және 21-суреттер қашықтықтағы 16 арнаның Is-OWC бойынша DWDM үшін орташа BER және Q-факторының өнімділік өлшемін

көрсетеді. Сонымен қатар, 22 және 23-суреттерде көз диаграммасы 7000 км қашықтықтағы барлық арналар үшін ашық және анық.

Жоғарыда келтірілген нәтижелерден жүйе 160 Гбит/с жылдамдықты 2000 км-ден 7000 км-ге дейін жақсы сапамен тасымалдай алады деген қорытынды жасауға болады. Соңында, 23-сурет, 1,1 мкрад таратқышты көрсету қателігінің астындағы біріктірілген арналардың оптикалық спектрі. Демек, қабылдағыштағы оптикалық сигналдың қуат деңгейінің төмендеуі.

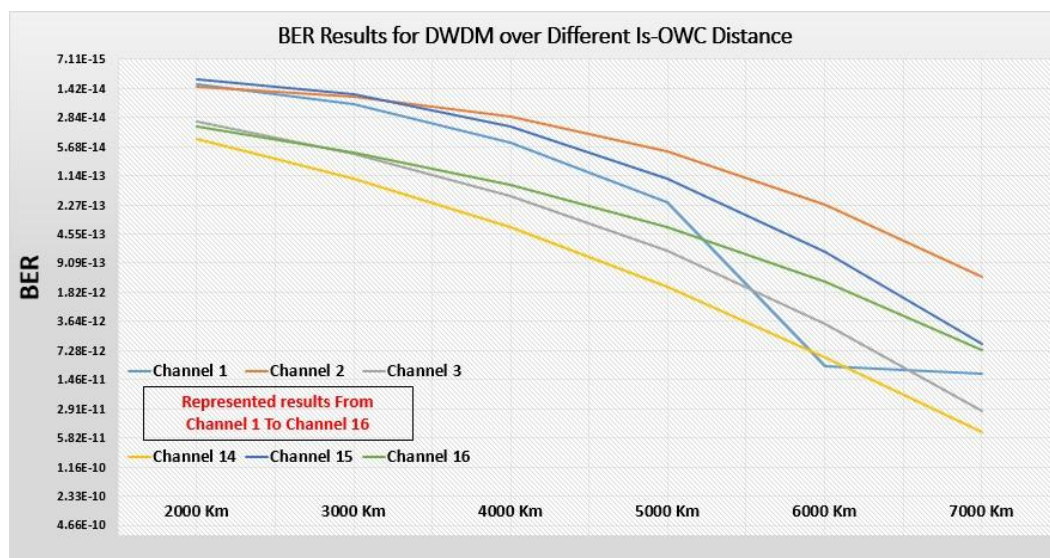


3.11-сурет – (а) 7000 км қашықтықта оптикалық күшейткіші бар Is-OWC жүйесі бойынша DWDM (b) 7000 км қашықтықта оптикалық күшейткішсіз Is-OWC жүйесі арқылы DWDM үшін көз диаграммалары, BER және Q-фактор өлшемдері.

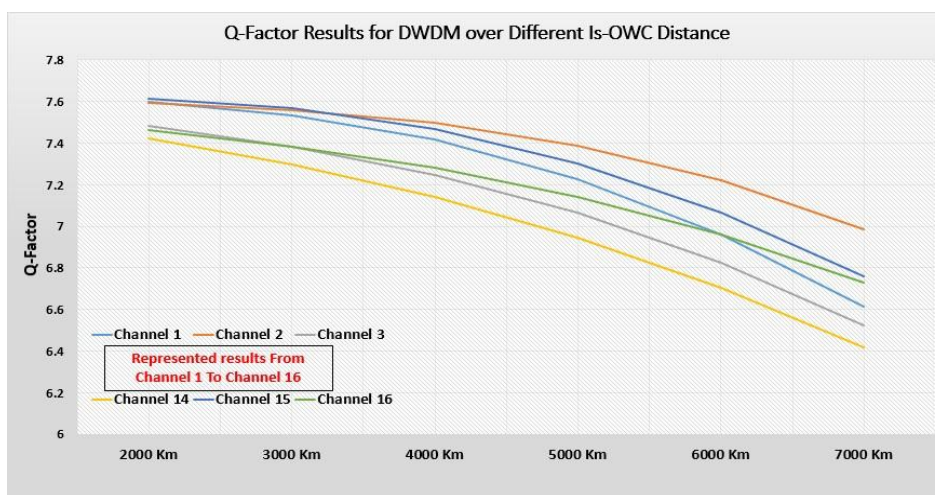


3.12-сурет – Оптикалық күшейткіші бар және жоқ DWDM негізіндегі

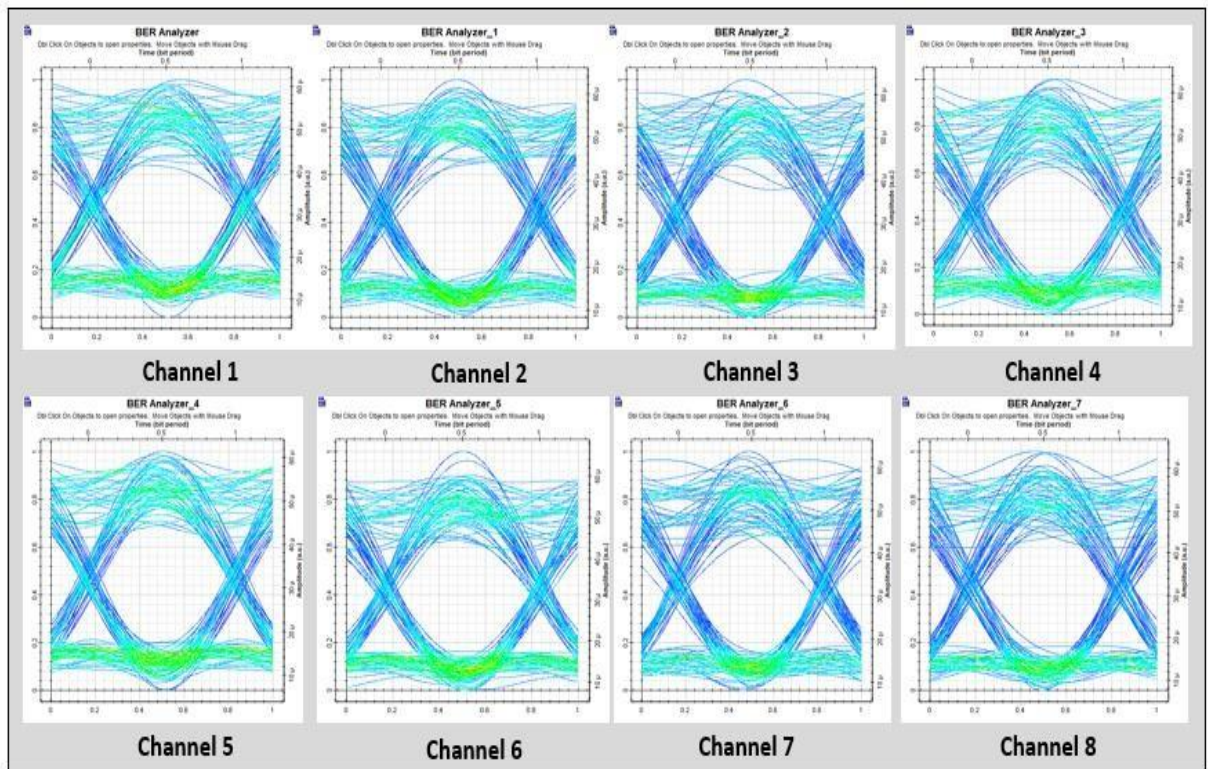
BER және Q-фактор нәтижелері әртүрлі IsOWC қашықтығында



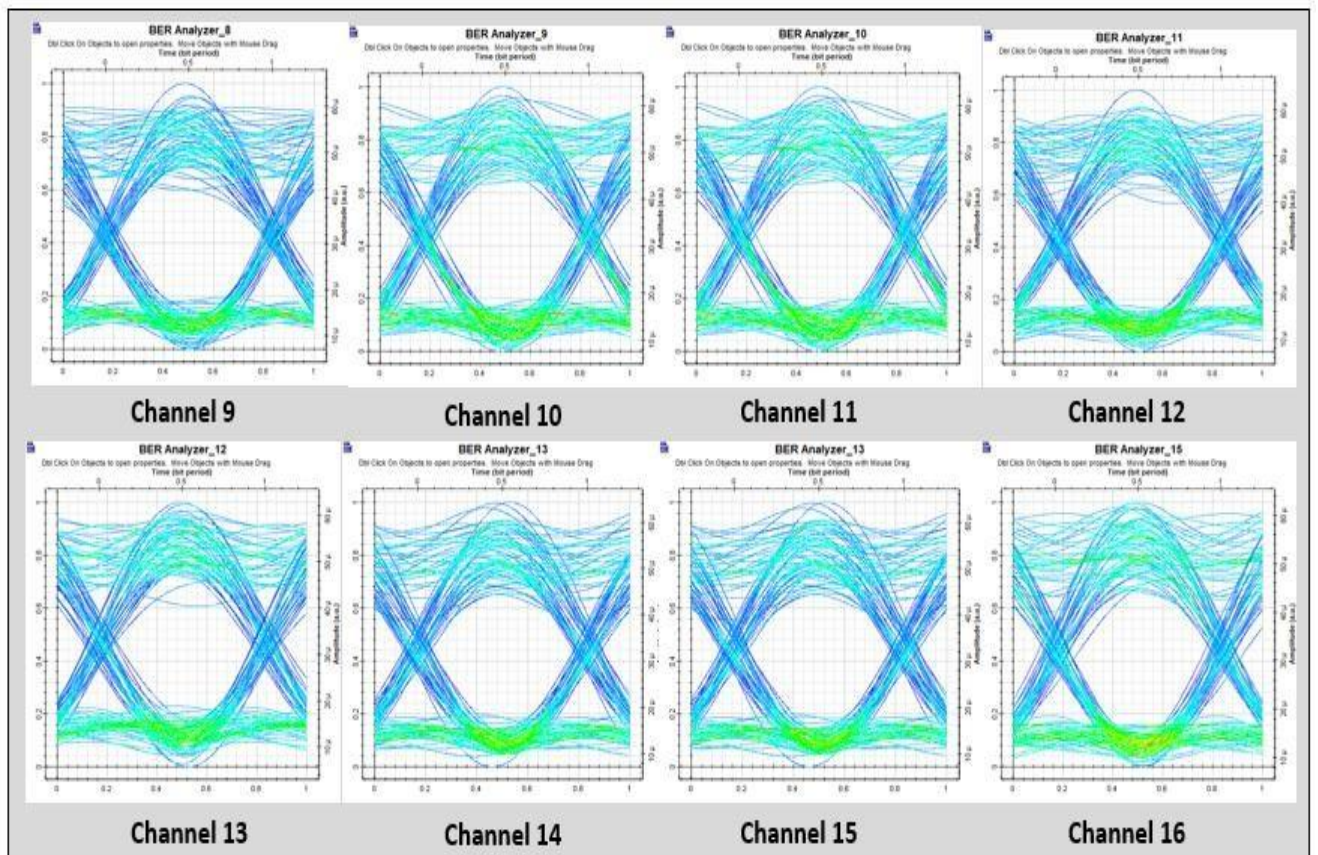
3.14-сурет – Әртүрлі is-owc қашықтығындағы dwdm үшін BER нәтижелері



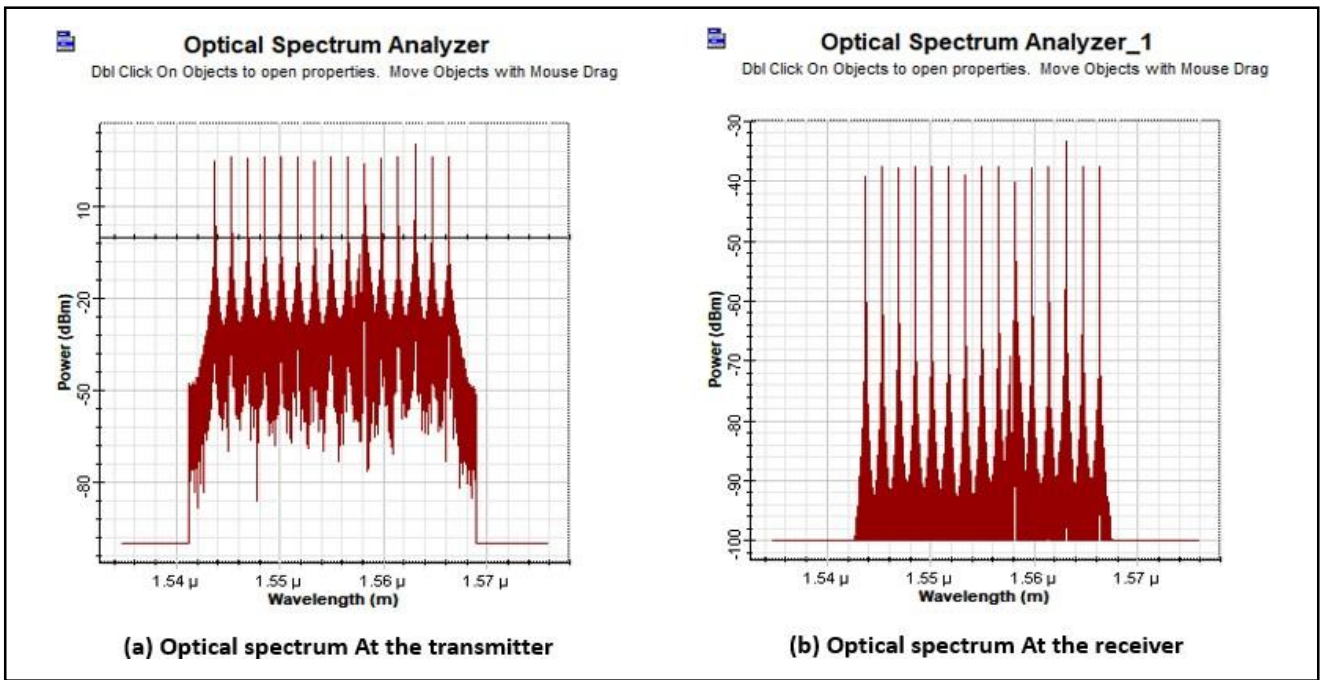
3.15-сурет – Әртүрлі is-owc қашықтығындағы dwdm үшін Q-фактор нәтижелері



3.16-сурет – 1 арнадан 8 арнаға дейін өлшенген көз диаграммалары



3.17-сурет – 9 арнадан 16 арнаға дейін өлшенген көз диаграммалары



3.18-сурет – 1,1 мкрад жіберу қателігінің әсерінен оптикалық спектр.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыста хабар тарату дамығандықтан байланыс жүйесінде пайда болатын өзекті мәселелердің шешімін іздеу басты мақсатқа айналды. Бұл жобада кәсіби әдебиеттерден үзінділер келтірілді. Қарастырған тақырыбымыз соңғы миль мәселесімен бетпе-бет келетін сымсыз жүйелер шеше алмайтын проблемаларды шеше алатындығы туралы айтылып өтті. Жобаның басты өзектілігі ретінде арна өнімділігі, атмосфералық турбуленттілік әсері туралы ақпарат берілді.

Жылдан жылға спутниктер саны артып келеді, бұл жоғары өткізу қабілеттілігімен тиімді байланыс үшін олардың арасында желілерді құрудың маңызды мәселесін тудырады. Демек, олардың арасындағы деректерді қалай беру керек, деректерді бірінен екіншісіне беру және соңында оларды жердегі станцияларға тарату. Бұл мақалада біз is-OWC негізіндегі 16 арналы DWDM деректер жылдамдығын зерттеп, талдадық. Өнімділікті бағалау біздің жүйенің ең аз қуатты оптикалық күшейткіштің көмегімен 7000 км байланыс арнасы арқылы 160 Гбит/с жылдамдықпен деректерді жібере алатынын көрсетті. Тасымалдау кезінде бағыттау қателігі қолайлы талшық пен сапа кезінде 1,1 мкр жетуі мүмкін. Осылайша, біздің зерттеуіміз ғарыштық байланыста оптикалық сымсыз байланыс жүйесін пайдалану тиімді болды.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс қысқа қашықтықтағы кең жолақты қосымшалар үшін сенімді шешім ретінде қолдануға болатын балама ретінде қарастырылады. Осы тарауда біз бос кеңістіктегі оптикалық байланыс технологиясының тұжырымдамаларын, осы техникаға математикалық көзқарасты қысқаша ұсындық. Практикалық бөлімде біз оптикалық желіні зерттеу үшін университет ұсынған жаңа ағымдағы технологияларды қолдана отырып, бос кеңістіктегі оптикалық байланысты қарастырдық. Бұл жағдайда жалпы ыдырау екі параметрге байланысты: шашырау және геометриялық жоғалту. Сондай-ақ, жауын-шашынның бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйесінің жұмысына әсері соншалықты аз екендігі көрсетілді, сондықтан оны елемеге болады. Толқын ұзындығы 1550 нм болуы басқа толқын ұзындықтарынан өзгеше, өйткені ол атмосфералық турбуленттілікке сезімталдығы аз және адам көзіне зиянсыз. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйелерінің берілу тиімділігін арттыру үшін толқын ұзындығы 1550 нм пайдаланылып, таратқыш пен қабылдағыш арасындағы қашықтық азайтылды.

Лазердің басты сипаттамалары бос кеңістіктегі оптикалық жүйеде бірнеше артықшылықтарымен ерекшеленеді. Мысалы, тар сәуле жоғары кеңістіктік селективтілікке кепілдік береді, сондықтан басқа арналарға кедергі келтірмейді, жоғары жылдамдықта дерек тарату оның барлық орталарда қолдануға мүмкіндік береді. Сол себепті оның жұмыс режимінде лицензия қажет емес. Ал көлемі жағынан кіші, әрі салмағының аз болуы оны мобильді желілермен байланыстыру мүмкіндігін ұсынады.

Оптикалық байланыс – ғарыш аймағында сұранысқа ие желі технологиясы. Атмосфералық кедергілер әсерінен қабылдағышта сигнал

бұрмалануы туындайды, дегенмен, жаңа технологиялардың көмегімен бұл мәселелерді жоюға болады.

Жарық үлкен көлемдегі ақпаратты жылдам беру құралы болғандықтан, ол үнемді, икемді, тез орналастырылады және жоғары оптикалық өткізу қабілеттілігін кепілдендіреді.

Деректерді беруді жақсарту қажеттілігі зерттеулерді және жаңа технологияларды қолдануды ынталандырады. Электр кабельдері мен оптикалық талшықтарға негізделген тәсілдер көптеген шектеулерге ие болғандықтан, кабельсіз технология жасалды.

Сәулелену көздерін таңдау екі негізгі факторға сәйкес жүргізілуі керек, яғни атмосфераның берілу қасиеттері және көздің қауіпсіздігі. Бұл арналардың максималды диапазоны тарату және қабылдау жүйелерінің қасиеттерімен, сондай-ақ ауа-райы жағдайымен анықталады. Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс сенімділігін арттыру үшін бірнеше шешімдер қолданылады, олардың ішінде пакеттік берілісті автоматты түрде қалпына келтіру, тиісті деректер ағынын беру хаттамалары, лазерлік сәуленің бағыттау және тұрақтандыру жүйелері немесе автоматты күшейту жүйелері. Басқаларына импульстік сигналдардың пішінін қалпына келтіру жүйелерін, оптикалық жүйелерді жылыту элементтерін, адаптивті оптикалық жүйелерді және көп сәулелі жүйелерді пайдалану жатады.

Бос кеңістіктегі оптикалық байланыс арналарын жасаушыларға практикалық кеңес-олар жеке арналардың компоненттеріне қойылатын талаптарды көрсетуі керек. Бұл қажетті беру жылдамдығын және оптикалық сигналдың тиісті қуатын қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Басқа маңызды факторларға оптикалық арнада деректер ағынын берудің тиісті хаттамасын таңдау және таратушы және қабылдаушы жүйелердің өзара орналасуын автоматты түрде бақылау рәсімін қолдану жатады. Қолданыстағы жүйелердің маңызды кемшілігі-олар қатал ауа-райына, атап айтқанда тұманға сезімтал.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. 2 Солнце, Х .; Канг, СН; Конг, М .; Алхазраги, О .; Го, Ю .; Уссейн, М .; Венг, Ю .; Джонс, Б.Х.; Нг, ТК; Оои, Б.С. Обзор практических соображений и решений в области подводной беспроводной оптической связи. Дж. Лайтв. Технол. 2020, 38, 421–431.
2. 3 Бюро публикаций Европейского Союза. Доступно в Интернете: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d7952782-9aea-11e6-868c-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-150221638> (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).
3. 4 Конг, Л. Н.; тайский, HD; Ван, П.; Дусит, Н .; В, КД; Чжу, Х. Сбор данных и беспроводная связь в Интернете вещей (IoT) с использованием моделей экономического анализа и ценообразования: обзор. Сообщество IEEE. Surv. Репетитор. 2016, 18, 2546–2590.
4. 5 Чоудхури, МЗ; Шахджалал, М .; Ахмед, С .; Jang, YM Системы беспроводной связи 6G: приложения, требования, технологии, проблемы и направления исследований. IEEE Open J. Commun. соц. 2020, 1, 957–975.
5. 7 Уйсал, М .; Капсони, К.; Гассемлой, З.; Букувалас, АС; Удвари, Э. Оптическая беспроводная связь: новая технология; Springer: Берлин/Гейдельберг, Германия, 2016 г.; стр. 1–634.
6. 9 Парида, С.; Маджи, С .; Das, SK Wireless Powered Microwave and mm Wave Networks Communication Networks— Обзор. В материалах Международной конференции по изобретательским вычислительным технологиям (ICICT), Коимбатур, Индия, 26–28 февраля 2020 г.; стр. 98–102.
7. 10 Каушал, Х .; Джайн, ВК; Кар, С. Оптическая связь в свободном пространстве; Springer: Гургаон, Харьяна, 2017 г.; стр. 1–209.
8. 11 Klotzkin, DJ Введение в полупроводниковые лазеры для оптической связи; Springer: Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 2020 г.; стр. 1–285.
9. 12 Хан, МТА; Шемис, Массачусетс; Алхазраджи, Э.; Рагеб, АМ; Эсмаил, Массачусетс; Фатхаллах, НА; Алшебейли, С.А.; Хан, MZM Оптическая беспроводная связь на скорости 100 Гбит/с с использованием лазера Quantum-dash L-диапазона. На конференции по лазерам и электрооптике Pacific Rim; Оптическое общество Америки: Вашингтон, округ Колумбия, США, 2017 г.; стр. 1–3.
10. 13 Малик, А .; Сингх, П. Оптика свободного космоса: текущие приложения и будущие задачи. Междунар. Дж. опт. 2015, 2015, 945483.
11. 14 Хуанг, Х .; Чен, Дж.; Чен, Х .; Хуанг, Ю .; Ли, Ю .; Песня, Ю.; Фонтейн, Северная Каролина; Риф, Р.; Ван, М. Безопасная оптическая связь в свободном пространстве с помощью усиленного спонтанного излучения (ASE). Материалы конференции и выставки по оптоволоконной связи, Сан-Диего, Калифорния, США, 8–12 марта 2020 г.; стр. 1–3.
12. 15 Алтунибат, С.; Месле, Р .; Караке, К. Безопасная гибридная оптическая и миллиметровая связь на основе индексной модуляции в свободном пространстве. IEEE транс. Вех. Технол. 2020, 69, 6325–6332.

13. 17 Агравал, врач общей практики; Аль-Амри, доктор медицины; Эль-Гомати, М.; Сухайл, З.М. (ред.) Оптика в наше время. В оптической связи: ее история и недавний прогресс; Springer: Чам, Швейцария, 2016 г.; стр. 1–504.
14. 18 Доусон, К. Электромагнитная телеграфия: ранние идеи, предложения и аппаратура. В истории техники; Холл, Р.А., Смит, Н., ред.; Издательство Bloomsbury: Лондон, Великобритания, 2016 г.; стр. 113–142.
15. 21 Фудзивара, И.; Коибучи, М.; Одзаки, Т.; Мацутани, Х.; Казанова, Х. Расширение сети высокопроизводительных вычислений с малой задержкой оптическими каналами в свободном пространстве. В материалах 21-го Международного симпозиума IEEE по высокопроизводительной компьютерной архитектуре, Бурлингем, Калифорния, США, 7–11 февраля 2015 г.; стр. 390–401.
16. 22 Датч, САВ; Фэй, НАБ. Устойчивость линии FSO дальнего действия при воздействии тропической погоды. науч. фр. 2019, 7, e00243.
17. 23 Сигель, Т.; Чен, С. Исследования оптической связи в свободном пространстве в реальных атмосферных условиях. Провод. Перс. коммун. 2020.
18. 24 Шривастава, Д.; Каур, Г.; Сингх, Г.; Сингх, П. Оценка вредного воздействия атмосферы на систему оптической связи в свободном космосе для погоды в Дели. Дж. опт. коммун. 2020
19. 25 Ислам, АН; Маджумдер, С.П. Влияние атмосферной турбулентности на характеристики BER оптической линии CDMA FSO с приемником SIK. Оптик 2019, 179, 867–874
20. 26 Уммуль, КР; Ануар, MS; Рахман, А.К.; Рашиди, СВМ; Альджунид, С.А. Эффективность связи FSO из-за атмосферной турбулентности за счет использования нового подхода модуляции с двойным диффузором. Междунар. Дж. Заявл. англ. Рез. 2017, 12, 1416–1420.
21. 27 Гровер, М.; Сингх, П.; Каур, П. Уменьшение эффектов мерцания в системе WDM FSO с использованием многолучевого метода. Дж. Телекоммун. Инф. Технол. 2017, 2, 69–74.
22. 28 Фу, Х.; Ван, П.; Лю, Т.; Цао, Т.; Го, Л.; Цинь, Дж. Анализ производительности системы связи PPM-FSO с лавинным фотодиодным приемником по каналам атмосферной турбулентности с усреднением апертуры. заявл. Опц. 2017, 56, 6432–6439.
23. 29 Кришнан, П. Анализ производительности систем FSO по каналу атмосферной турбулентности для погодных условий Индии. В турбулентности и родственных явлениях; Барилле, Р., изд.; IntechOpen: Лондон, Великобритания, 2019 г.
24. 30 Рахман, А.К.; Джулай, Н.; Рашиди, СВМ; Замхари, Н.; Сахари, СК; Мохтадзар, НАА; Шарип, MRM Влияние дождевой погоды на передачу оптической связи в свободном пространстве. Индоны. Дж. Электр. англ. вычисл. науч. 2019, 14, 303–310.
25. 33 Лазерная оптика. Доступно в Интернете: <http://www.laseroptronics.com/index.cfm/id/57-66.htm> (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).

26. 37 Мир лазерного фокуса. Доступно в Интернете: <https://www.laserfocusworld.com/fiber-optics/article/16556480/freespace-links-address-the-lastmile-problem> (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).
27. 38 Каймак, Ю.; Рохас-Сесса, Р.; Фэн, Дж.; Ансари, Н.; Чжоу, МС; Чжан, Т. Обзор механизмов сбора, отслеживания и наведения для мобильной оптической связи в свободном пространстве. Сообщество IEEE. Surv. Репетитор. 2018, 20, 1104–1123.
28. 39 Алими, ИА; Муга, штат Нью-Джерси. Простая и надежная оптическая связь в свободном пространстве на основе разнесения при передаче для сетей 5G и выше. Опц. коммун. 2020, 476, 126306.
29. 40 Миколайчик, Дж.; Белецкий, З.; Бугайски, М.; Пиотровски, Дж.; Войтас, Дж.; Гаврон, В.; Сабра, Д.; Прокопюк А. Анализ развития оптики свободного космоса. Метроль. Изм. Сист. 2017, 24, 653–674.
30. 42 Берар, П.; Кутюр, М.; Сеймур, Р. Дж. Коэффициент избыточного шума кремниевого лавинного фотодиода с передней и задней подсветкой. В технологиях распознавания изображений: материалы, устройства, системы и приложения VII; Curran Associates, Inc.: Ред-Хук, Нью-Йорк, США, 2020 г.
31. 43 Шридхара К., «Оптическая связь в свободном пространстве», Международный журнал
32. «Оптическая связь в свободном пространстве: основные проблемы и их возможное решение», С. Бабани, Ю. С. Абдулмалик, А. Абдулазиз, АЗ Локо, М. М. Гаджибо, Международный журнал научных и инженерных исследований, том 5, выпуск 7, июль 2015 г. 37
33. Международная электротехническая комиссия. Доступно в Интернете: <https://webstore.iec.ch/publication/62424> (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).
34. IEC 60825-1:2014 — Безопасность лазерных изделий — Часть 1: Классификация оборудования и требования. Доступно в Интернете: https://infostore.saiglobal.com/preview/98701189622.pdf?sku=861160_saig_nsai_nsai_2048777 (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).
35. Зафар, Ф.; Бакаул, М.; Партибан, Р. Связь в видимом свете на основе лазерных диодов: на пути к связи гигабитного класса. Сообщество IEEE. Mag. 2017, 55, 144–151.
36. Новости энергетического дозора. Доступно в Интернете: <https://energywatchnews.com/laser-li-fi-ten-times-faster-led-li-fi/> (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).
37. Оптическая связь в свободном пространстве. Доступно в Интернете: <https://encyclopedia.pub/entry/2967> (по состоянию на 10 ноября 2020 г.).
38. Беспроводная световая пуант. Доступно в Интернете: <https://www.lightpointe.com/> (по состоянию на 25 сентября 2020 г.).
39. Моделирование лучевой оптики в COMSOL Multiphysics. Доступно в Интернете: <https://www.comsol.ru/video/the-basics-of-ray-optics-modeling-in-comsol-multiphysics>

40. Введение в оптику свободного пространства (Optisystem).
Доступно в Интернете: <https://www.youtube.com/watch?v=K0mqoDKdl-4> (по состоянию на 26 декабря)

41. M. Release, "The mathworks," Inc., Natick, Массачусетс, Америка
Құрама Штаттары, том. 488, 2013 ж.

42. A. Ghazi, S. Aljunid, A. Fareed, SZS Idrus, CM Rashidi, A. Al-Dawoodi, et al., "Performance Analysis of ZCC-Optical-CDMA over SMF for Fiber-to-Home Access Network, «Физика журналында: Конференциялар сериясы, 2020, 1-бет. 022013.

СЫН - ПІКІР

Диссертациялық жұмыс

Серікқұлқызы Ділдар

7M06201- Телекоммуникация

Тақырыбына: **Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерделеу**

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Диссертациялық жұмыста Серікқұлқызы Ділдар бос кеңістіктегі оптикалық байланыстың негізгі сипаттамалары мен басты параметрлерін, соның ішінде радиациялық қуатты, байланыс диапазонын, қабылдау оптикасының диаметрін есептеуді іске асырды. Диссертациялық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде зерттелген ғылыми жұмыстың негізгі тақырыптары мен бағыттары анықталды. Бұл жобада кәсіби әдебиеттерден үзінділер келтіріліп, оның артықшылықтары мен кемшіліктеріне талдау жасалынды.

Екінші бөлімде 1310,1550 нм толқын ұзындығындағы радиациялық қуатты, байланыс диапазонын, қабылдау оптикасының диаметрін есептедік.

Үшінші бөлімде бос кеңістіктегі оптикалық байланысты COMSOL Multiphysics, Optisystem бағдарламалық жүйесінде модельдеп, дерек алмасу моделі алынды.

Бұл дипломдық жұмыс жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғары дәрежеде жазылған, алынған нәтижелер ақпаратты өңдеп тарату технологиялардағы ғылыми бағытқа жауап береді.

Жұмыс бағасы

Жалпы, диссертациялық жұмыс “өте жақсы” (А-, 93%) деген бағаға, ал магистрант Серікқұлқызы Ділдар 7M06201 – Телекоммуникация мамандығы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензент

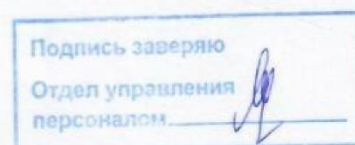
PhD докторы,

ҚазТБҰ оқу-әдістемелік

жұмыс жөніндегі проректоры

Жамангарин Д.С. Жамангарин

«31» 05 2023 ж.



**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ
ПІКІРІ**

диссертациялық жұмыс

Серіккұлқызы Ділдар

7M06201- Телекоммуникация

Тақырыбына: **Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерделеу**

Серіккұлқызы Ділдар диссертациялық жұмысты бос кеңістіктегі оптикалық сымсыз байланысты белгіленген толқын ұзындықтарында зерделеуге арнады. Бұл жұмыстың практикалық бөлімінде бос кеңістіктегі оптикалық сымсыз байланысты зерделеу мақсатында университет ұсынған жаңа технологияларды, атап айтқанда, COMSOL Multiphysics, OptiSystem және Matlab бағдарламаларында қажетті зерттеулер жүргізіліп нәтижелері алынды.

Диссертациялық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде зерттелген ғылыми жұмыс бойынша негізгі тақырыптар мен ғылыми жұмыс бағыты анықталды. Зерттелген тақырып негізіндегі ғылыми әдебиеттерге шолу жасалынды және үзінділер келтірілді.

Екінші бөлімде бос кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйелерінің берілу тиімділігін арттыру мақсатында толқын ұзындығы 1550 нм пайдаланылып, таратқыш пен қабылдағыш арасындағы қашықты азайтуға жұмыс жасалынды.

Үшінші бөлімде бос кеңістікте ақпарат алмасудың 3Д моделі COMSOL Multiphysics, OptiSystem және Matlab бағдарламаларында алынды.

Магистрант Серіккұлқызы Ділдар диссертациялық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс жасау қабілетін көрсетті. Диссертациялық жұмыс «94/А/өте жақсы» деп бағаланды, ал магистрант Серіккұлқызы Ділдар 7M06201-«Телекоммуникация» мамандығы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші
ЭТжҒТ каф. PhD докторы,
қауымдастырылған профессор

Н.Қ.Смайлов

«31» 05 2023ж.



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Серікқұлқызы Ділдар

Тақырыбы: Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерделеу

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 9.8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 4.9

Дәйексөз (35): 0.6

Әріптерді ауыстыру: 27

Аралықтар: 11

Шағын кеңістіктер: 80

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

6.06.2023
Күні

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Серіккұлқызы Ділдар

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерделеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 9.8

Коэффициент Подобия 2: 4.9

Микропробелы: 80

Знаки из других алфавитов: 27

Интервалы: 11

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

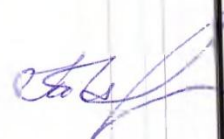
Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

6.06.2023

Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Серіккұлқызы Ділдар

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Спутникаралық оптикалық сымсыз байланыс жүйесін зерделеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 9.8

Коэффициент Подобия 2: 4.9

Микропробелы: 80

Знаки из здругих алфавитов: 27

Интервалы: 11

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

6.06.2023
Дата

Марселия С.А.
проверяющий эксперт