

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

Жалғас Мейрамбек Абайұлы

«Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B06201 - Телекоммуникациялар

Алматы 2025

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


ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТЖҒТ кафедра меңгерушісі
техн.ғыл.канд.
Е.Таштай
«30» _____ 2025 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына
әсерін зерттеу»

6B06201 – Телекоммуникациялар

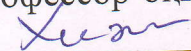
Орындаған:



М.А.Жалғас

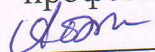
Рецензент:

ф.-м.ғ.к., Ғ.Дәукеев ат. АЭЖБУ
профессор-оқытушысы

 М.А.Хизирова

«30» мамыр 2025 ж.

Ғылыми жетекші
техн.ғыл.кандидаты,
ЭТЖҒТ каф. қауымдастырылған
профессоры

 М.А.Абдуллаев

«25» _____ 05 2025 ж.

Алматы 2025

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 ғарыш технологиялар кафедрасы

6B06201 – Телекоммуникациялар

БЕКІТЕМІН
ЭТ ж. ҒТ кафедра меңгерушісі
техн. ғыл. канд.
Е. Таштай
«01» 10.2025 ж.

Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА

Білім алушы: Жалғас Мейрамбек Абайұлы

Тақырыбы: «Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына
әсерін зерттеу».

Университет ректорының «29» қаңтар 2025 ж. № 26 П/Ө бұйрығымен
бекітілген

Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» мамыр 2025 ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: 1) Жұмыс жиілігі: 2.4 ГГц – 6 ГГц; 2)
Сигналдың өткізу қабілеті: 1 Гбит/с дейін; 3) Кедергі деңгейі: ≤ -100 дБм; 4)
Сәулелену диаграммасы: бағытталған және бағытталмаған; 5) Жұмыс
қашықтығы: 1–5 км; 6) Поляризация: тік, көлденең.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Қалалық ортадағы электромагниттік кедергілердің сипаттамаларын
зерттеу; б) Антенналардың өнімділігіне әсер ететін қоршаған орта факторларын
талдау (ғимараттар, ағаштар, көліктер); в) Қалалық аймақта сигналдың таралу
моделін әзірлеу; г) Кедергілердің әсерін азайтудың заманауи әдістерін зерттеу
(мысалы, адаптивті сәулелену және көпсәулелі тарату); д) Жаңа антенна
конфигурацияларын және орналасу стратегияларын ұсыну; е) MATLAB немесе
басқа бағдарламаларда қала жағдайындағы антенна өнімділігінің модельдерін
әзірлеу;

Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

1. Rappaport, T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. – 2nd Edition. – Pearson, 2002. – 704 бет.
2. Molisch, A.F. Wireless Communications. – 3rd Edition. – Wiley, 2022. – 888 бет.
3. Balanis, C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th Edition. – Wiley, 2016. – 1104 бет.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Қалалық ортадағы антенна- лардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторлар анықталады.	1.02.2025 ж. - 21.02.2025	<i>орындау</i>
Сигнал сапасын жақсарту үшін жана әдістер ұсынылды	21.02.2025 - 01.03.2025	<i>орындау</i>
Қалалық ортаға арналған антенна дизайны бойынша ұсынымдар берілді	01.03.2025 - 14.05.2025	<i>орындау</i>

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен
норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Т.ғ.к., ЭТЖҒТ каф.қауымдастырылған профессоры Абдуллаев М.А.	<i>2.02.25</i>	<i>Абд</i>
Теориялық ақпарат	Т.ғ.к., ЭТЖҒТ каф. қауымдастырылған профессоры Абдуллаев М.А.	<i>3.03.25</i>	<i>Абд</i>
Норма бақылау	ЭТЖҒТ каф.аға оқытушысы Досбаев Ж.М.	<i>22.05.25</i>	<i>Досбаев</i>

Ғылыми жетекшісі *Абд* М.А.Абдуллаев

Тапсырманы орындауға алған білім алушы *Жалғас* М.А.Жалғас

Күні « *1* » *02* 2025 ж.

АНДАТПА

Осы жұмыста алынған нәтижелер телекоммуникациялық жүйелерді жобалау мен жаңғыртуда, сонымен қатар қалалық аймақтарда жоғары сапалы байланыс қызметтерін қамтамасыз ету үшін практикалық нұсқаулар әзірлеуде қолданыла алады.

Қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторларды анықтап, оларды азайту немесе бейімдеу бойынша тиімді әдістерді ұсыну. Жұмыстың міндеттері:

- Қалалық ортаның физикалық ерекшеліктерін (ғимарат биіктігі, тығыздығы, материалдық қасиеттері) сипатталды.
- Қалалық ортада антенналардың тиімділігін арттыруға бағытталған техникалық шешімдерді ұсынылды. Жүргізілген зерттеулер негізінде ұсыныстар әзірленді.

АННОТАЦИЯ

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при проектировании и модернизации телекоммуникационных систем, а также при разработке практических рекомендаций по обеспечению высококачественных услуг связи в городских районах.

Выявить основные факторы, влияющие на производительность антенн в условиях городской среды, и предложить эффективные методы их уменьшения или адаптации. Задачи работы:

- Характеризовались физические особенности городской среды (высота здания, плотность, материальные свойства).
- Были предложены технические решения, направленные на повышение эффективности антенн в городской среде. На основе проведенных исследований были выработаны рекомендации.

ANNOTATION

The results obtained in this work can be used in the design and modernization of telecommunication systems, as well as in the development of practical recommendations for ensuring high-quality communication services in urban areas.

The main objectives were to identify key factors affecting antenna performance in urban environments and to propose effective methods for mitigating or adapting to these factors. Objectives of the work:

- The physical characteristics of the urban environment (building height, density, material properties) were described.
- Technical solutions aimed at improving antenna efficiency in urban settings were proposed. Based on the conducted research, recommendations were developed.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	7
1 Қалалық ортада сымсыз байланыс жүйелерінің тиімділігін арттыру	9
1.1 Қалалық ортада антенналардың өнімділігін зерттеу әдістері	10
1.2 Антенналардың түрлері мен сипаттамалары	14
1.3 Қалалық ортаның антенналардың өнімділігіне әсері	14
1.4 Антенналардың өнімділігін арттыру әдістері	14
2 Қалалық ортада антенналардың өнімділігін зерттеу әдістері	17
2.1 Қалалық ортада радиотолқындардың таралу модельдері және антенна тиімділігі	17
2.2 Антенналар өнімділігін модельдеу және бағдарламалық құралдарды қолдану	18
2.3 Антенналардың өнімділігін эксперименттік зерттеу және сигнал сапасын талдау	20
2.4 Кедергілердің әсерін азайтудың заманауи әдістерін зерттеу	22
2.5 MATLAB бағдарламасында қала жағдайындағы антенна өнімділігінің модельдерін әзірлеу	24
3 Тәжірибелік зерттеу нәтижелері және оларды талдау	27
3.1 Өлшеу шарттары	27
3.2 Негізгі нәтижелер	27
3.3 Секторлық және көпсәулелі антенналардың салыстырмасы	27
3.4 Қалалық ортаның әсерін талдау	27
3.5 Қашықтыққа байланысты сигнал деңгейі мен өткізу қабілетін графикалық талдау	28
3.6 Жаңа антенна конфигурацияларын және орналасу стратегияларын ұсыну	30
3.7 Сигнал сапасын жақсарту үшін ұсынылатын жаңа әдістер	34
3.8 Қалалық ортаға арналған антенна дизайны бойынша ұсынымдар	37
Қорытынды	38
Пайдаланылға әдебиеттер тізімі	39

КІРІСПЕ

Қазіргі заманда ақпараттық-коммуникациялық технологиялардың дамуымен бірге сымсыз байланыс жүйелеріне деген сұраныс артып келеді. Әсіресе, урбанизация қарқыны күшейген ірі қалаларда сенімді әрі жоғары жылдамдықтағы байланыс қызметтерін қамтамасыз ету өзекті мәселелердің біріне айналды. Бұл жағдайда антенналардың өнімділігі шешуші рөл атқарады, өйткені олар сигналдың берілу сапасын, қамту аймағын және жүйенің жалпы тиімділігін айқындайды.

Алайда қалалық ортаға тән факторлар – биік ғимараттар, тар көшелер, металл конструкциялар, көлік қозғалысы және тұрғындар тығыздығы – радиотолқындардың таралуына елеулі кедергілер келтіреді. Сигналдың шағылуы, жұтылуы және көп сәулеленуі сияқты құбылыстар антенналардың жұмыс тиімділігін төмендетіп, байланыс сапасына теріс әсер етеді. Сондықтан қалалық ортаның ерекшеліктерін ескере отырып антенна жүйелерінің жұмысын зерттеу және оңтайландыру заманауи байланыс инженериясының маңызды міндеттерінің бірі болып табылады.

Бұл дипломдық жұмыстың мақсаты – қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторларды талдау және оларды азайту немесе бейімдеу әдістерін ұсыну. Зерттеу барысында заманауи антенналық технологиялардың мүмкіндіктері, радиотолқындардың таралу модельдері және урбанизация әсерінен туындайтын проблемаларды шешу тәсілдері қарастырылады.

Жұмыстың өзектілігі қазіргі таңда қала тұрғындарының сымсыз байланысқа деген жоғары сұранысымен және цифрлық экономиканың дамуына байланысты байланыс сапасына қойылатын талаптардың күшеюімен түсіндіріледі. Сонымен қатар, 5G және болашақ 6G желілері сияқты жаңа буын технологиялардың енгізілуі қалалық ортада антенналық жүйелердің жұмыс тиімділігін арттыруды қажет етеді.

Осы жұмыста алынған нәтижелер телекоммуникациялық жүйелерді жобалау мен жаңғыртуда, сонымен қатар қалалық аймақтарда жоғары сапалы байланыс қызметтерін қамтамасыз ету үшін практикалық нұсқаулар әзірлеуде қолданыла алады.

Қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторларды анықтап, оларды азайту немесе бейімдеу бойынша тиімді әдістерді ұсыну.

Жұмыстың міндеттері:

- Қалалық ортаның физикалық ерекшеліктерін (ғимарат биіктігі, тығыздығы, материалдық қасиеттері) сипаттау;
- Радиотолқындардың таралу процестеріне қалалық ортаның әсерін талдау;
- Әртүрлі антенна типтерінің (микрожасушалық, макрожасушалық, смарт-антенналар және т.б.) өнімділігін зерттеу;

– Қалалық ортада антенналардың тиімділігін арттыруға бағытталған техникалық шешімдерді ұсыну;

– Жүргізілген зерттеулер негізінде ұсыныстар әзірлеу.

Зерттеу нысаны. Қалалық орта жағдайында жұмыс істейтін сымсыз байланыс желілеріндегі антенналық жүйелер.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы. Қалалық ортада антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторлар кешенді түрде талданды;

Радиотолқындардың таралу ерекшеліктеріне байланысты антенналарды оңтайлы орналастыру және бейімдеу бойынша ұсыныстар жасалды;

Антенна тиімділігін арттыруға бағытталған практикалық әдістер жүйеленді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы. Зерттеу нәтижелері телекоммуникациялық компанияларға, желі жобалаушыларға және қалалық инфрақұрылымды дамыту саласындағы мамандарға антенналық жүйелерді тиімді орналастыру мен оңтайландыруда пайдалы болуы мүмкін.

1 Қалалық ортада сымсыз байланыс жүйелерінің тиімділігін арттыру

Қалалық орта жағдайында сымсыз байланыс жүйелерінің тиімділігін қамтамасыз ету – қазіргі заманғы телекоммуникация саласының негізгі міндеттерінің бірі. Бұл бағыттағы ғылыми зерттеулер көбінесе радиотолқындардың таралу заңдылықтарын, антенналық жүйелердің сипаттамаларын және қалалық инфрақұрылымның әсерін зерттеуге бағытталған.

Антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторлар ретінде ғимараттардың биіктігі мен материалдық қасиеттері, көше конфигурациясы, көлік құралдарының қозғалысы және халықтың тығыздығы сияқты параметрлер қарастырылады. Әсіресе жоғары жиілікті (мысалы, 2,6 ГГц және одан жоғары) сигналдардың таралуында көпсәулелі таралу, көлеңкелену және жұтылу сияқты құбылыстар айқын байқалады [1].

Зерттеулер көрсеткендей, қала ортасындағы тығыз құрылыс радиожиілік спектрінің қолданысын шектейді және байланыс арналарының өткізу қабілетін төмендетеді. Осыған байланысты байланыс желілерінде көп деңгейлі архитектуралар (макрожасуша, микрожасуша, пикожасуша және фемтожасуша желілер) қолданылуда. Бұл шешімдер әртүрлі масштабтағы қамту аймақтарын қамтамасыз ету арқылы байланыс сапасын арттыруға мүмкіндік береді [2].

Бұдан бөлек, смарт-антенналық технологиялар мен көпсәулелі бағыттаушы антенналар (beamforming) қолдану арқылы қалалық ортадағы кедергілер мен интерференцияны азайту жолдары белсенді түрде зерттелуде. Мұндай жүйелер сигналды нақты бағыттау және адаптивті басқару мүмкіндігін қамтамасыз етеді, бұл өз кезегінде деректерді беру жылдамдығы мен сенімділігін арттырады [3].

Қалалық ортаның байланыс сапасына әсерін модельдеу үшін әртүрлі радиотолқын таралу модельдері әзірленген. Солардың ішінде Okumura-Hata, COST-231 және 3GPP 3D Urban Macro (UMa) модельдері кеңінен қолданылады. Бұл модельдер қалалық ортадағы нақты жағдайларды ескеруге және антенналарды орналастыруды оңтайландыруға мүмкіндік береді [4].

Жалпы, қазіргі әдебиеттерде антенналардың өнімділігін арттыру үшін қолданылатын әдістерді үш негізгі бағытқа бөлуге болады:

- физикалық ортаға бейімделу (антенналарды оңтайлы орналастыру);
- антенналық технологияларды жетілдіру (көпсәулелі және MIMO жүйелері);
- жүйелік шешімдерді қолдану (гетерогенді желілер, кіші жасушалар).

Әдеби шолудың келесі бөлімдерінде осы бағыттар бойынша жүргізілген негізгі зерттеулер мен олардың нәтижелері егжей-тегжейлі қарастырылады.

1.1 Радиотолқындардың таралу модельдері

Қалалық орта жағдайында радиотолқындардың таралуын дәл болжау үшін арнайы математикалық модельдер қолданылады. Бұл модельдер антенналардың

камту аймағын, сигнал әлсіреу деңгейін және байланыс сапасын алдын ала бағалауға мүмкіндік береді.

Okumura-Nata моделі ең кең таралған эмпирикалық модельдердің бірі болып табылады. Бұл модель бастапқыда Жапонияның ірі қалаларында жүргізілген эксперименттік өлшеулерге негізделген. Ол антенна биіктігіне, жиілік диапазонына (150–1500 МГц) және базалық станция мен қабылдағыш арасындағы қашықтыққа байланысты сигналдың жол бойындағы шығынын (path loss) есептеуге мүмкіндік береді [5].

Okumura-Nata моделі – радиотолқындардың таралуын сипаттайтын ең алғашқы және кеңінен қолданылатын эмпирикалық модельдердің бірі. Бұл модель 150–1500 МГц жиілік диапазонында жұмыс істейтін ұялы байланыс жүйелерінің сигнал әлсіреуін (path loss) бағалау үшін қолданылады.

Okumura-Nata моделі алғаш рет жапон ғалымы Ёсихиса Окумура жүргізген эксперименттік өлшеулер негізінде әзірленген. 1968 жылы Токио қаласының әртүрлі аймақтарында жасалған тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде радиотолқындардың қалалық, ауылдық және ашық кеңістіктегі таралу ерекшеліктері тіркелген. Кейіннен бұл нәтижелерді Хата 1980 жылы математикалық өрнекке келтіріп, модельді жеңілдетілген түрде ұсынды.

Модель сигналдың жоғалуын (path loss) есептеуді келесі негізгі параметрлерге сүйене отырып жүзеге асырады:

- Базалық станция антеннасының биіктігі (30–200 м аралығында);
- Қабылдаушы антеннаның биіктігі (1–10 м аралығында);
- Базалық станция мен қабылдаушы арасындағы қашықтық (1–20 км диапазонында);
- Ортаның түрі (үлкен қала, орташа қала, ауылдық аймақ).

Okumura-Nata моделі бойынша жалпы жол шығыны мынадай түрде анықталады:

$$L = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10} d \quad (1.1)$$

мұндағы L - жол шығыны (dB);

f - жиілік (МГц);

h_b - базалық станция антеннасының биіктігі (м);

h_m - қабылдағыш антеннаның биіктігі (м);

d - қашықтық (км);

$a(h_m)$ - қабылдағыш антенна биіктігінің түзету коэффициенті.

Түзету коэффициенті $a(h_m)$ қала өлшеміне қарай анықталады. Үлкен қалалар үшін жоғары жиіліктерде арнайы түзетулер қолданылады:

Үлкен қалалар үшін:

$$a(h_m) = 3.2(\log_{10}(11.75h_m))^2 - 4.97 \quad (1.2)$$

Орташа және кіші қалалар үшін:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (1.3)$$

Okumura-Hata моделінің артықшылықтары:

- Пайдалануға жеңіл және қарапайым есептеледі;
- Нақты өлшеулерге негізделген, сондықтан 2G және 3G дәуіріндегі қала жағдайларына жақсы сәйкес келеді;
- Қалалық, ауылдық және ашық кеңістіктер үшін арнайы коэффициенттер қарастырылған.

Шектеулері:

- Жиіліктері 1500 МГц-тен жоғары жүйелер үшін дәлдігі төмендейді (мысалы, қазіргі 5G желілеріне сәйкес келмейді);
- Биік ғимараттар арасындағы күрделі көпсәулелі таралу құбылыстарын толық ескере алмайды;
- Тек жазық және біртекті рельефке арналған (таулы немесе күрделі рельефтер үшін қосымша түзетулер керек).

Қолдану салалары: Okumura-Hata моделі ұялы байланыс желілерін бастапқы жобалау кезінде базалық станциялар арасындағы қашықтықты жоспарлау, антенна биіктігін анықтау және байланыс қамту аймағын бағалау үшін қолданылады. Бұл модель GSM, UMTS жүйелерінің ерте кезеңдерінде ең сенімді модельдердің бірі болды.

COST-231 моделі жоғары жиіліктер үшін (500-2000 МГц) және еуропалық қалалардың ерекшеліктерін ескере отырып әзірленген. Бұл модель ғимараттардың тығыздығы жоғары аймақтардағы таралу ерекшеліктерін жақсы сипаттайды және 2G/3G желілерін жобалау кезінде кеңінен қолданылған[6].

COST-231 моделі – қалалық орта жағдайында радиотолқындардың таралуын болжауға арналған кеңінен қолданылатын эмпирикалық модельдердің бірі. Бұл модель Okumura-Hata моделінің негізінде әзірленген және жоғары жиілік диапазондары мен еуропалық қала ортасының ерекшеліктерін ескеруге бейімделген.

COST (European Cooperation in Science and Technology) - 231 жобасы аясында жасалған бұл модель GSM және бастапқы 3G желілерінің жиілік диапазоны (500-2000 МГц) үшін әзірленді. Негізгі мақсат - ірі қалалардағы биік ғимараттармен сипатталатын тығыз салынған аудандарда радиотолқындардың таралуын нақты сипаттау.

COST-231 моделі арқылы сигналдың жол шығыны (path loss) мынадай формуламен есептеледі:

$$L = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + C \quad (1.4)$$

мұндағы L - жол шығыны (dB);

f - жиілік (МГц) (500–2000 МГц диапазонында);

h_b - базалық станция антеннасының биіктігі (30–200 м);
 h_m - қабылдағыш антеннаның биіктігі (1-10 м);
 d - базалық станция мен қабылдағыш арасындағы қашықтық (1-20 км);
 $a(h_m)$ - қабылдағыш антеннаның биіктігін ескеретін түзету коэффициенті;

C - ортаның түріне байланысты түзету коэффициенті:

Ірі қала үшін: $C=3C = 3C=3$ dB;

Кіші қала немесе ауылдық аймақ үшін: $C=0$ dB.

Түзету коэффициенті $a(h_m)a(h_m)a(h_m)$ үлкен қалалар үшін келесі түрде анықталады:

Үлкен қалалар ($f > 400$ МГц) үшін:

$$a(h_m) = 3.2(\log_{10}(11.75hm))^2 - 4.9 \quad (1.6)$$

Орташа және кіші қалалар үшін:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (1.7)$$

COST-231 моделінің ерекшеліктері:

– Жиілік диапазоны жоғары (500-2000 МГц), яғни қазіргі заманғы 2G және 3G ұялы байланыс жүйелерінің қажеттіліктерін толықтай қанағаттандырады.

– Ірі қалалардың күрделі архитектуралық құрылымдарын (биік ғимараттар, тар көшелер) ескере отырып жасалған.

– Okumura-Nata моделіне қарағанда көбірек нақтылық береді, әсіресе урбанизация деңгейі жоғары аймақтарда.

COST-231 моделінің артықшылықтары:

– Жоғары жиіліктер үшін нақты болжам береді;

– Ірі қалалық ортаның спецификалық әсерлерін (шағылу, жұтылу, көпсәулелі таралу) жақсы ескереді;

– Инженерлік есептеулерге ыңғайлы және қарапайым формула арқылы жүзеге асады.

Шектеулері:

– 2 ГГц-тен жоғары жиіліктер үшін (мысалы, қазіргі 5G миллиметрлік диапазондары) қолдану мүмкіндігі шектеулі;

– Рельефтің күшті өзгерістерін (тау, ойпат) тікелей есепке алмайды;

– Кіші жасушалық желілер (micro, pico, femto) үшін түзетуді қажет етеді.

Қолдану салалары: COST-231 моделі GSM 1800, UMTS және алғашқы LTE жүйелерін жобалау кезінде базалық станцияларды орналастыру, қамту аймақтарын есептеу және сигнал әлсіреуін болжау үшін кеңінен қолданылған. Әсіресе, тығыз салынған мегаполистерде (мысалы, Париж, Лондон, Берлин) желіні жобалауда тиімді нәтиже берген.

Ал заманауи желілерде қолданылатын 3GPP 3D Urban Macro (UMa) және Urban Micro (UMi) модельдері қала ортасының үшөлшемді құрылымын ескеруге мүмкіндік береді. Бұл модельдер базалық станция биіктігінің салыстырмалы түрде төмен немесе жоғары болуына байланысты сигналдың шағылуы мен көлеңкеленуін нақты болжайды, әсіресе 5G сияқты жоғары жиілікті жүйелер үшін маңызды [7].

3GPP 3D Urban Macro (UMa) моделі – заманауи байланыс жүйелерінде, әсіресе 4G LTE-Advanced және 5G желілерін жобалау кезінде қолданылатын радиотолқын таралу моделдерінің бірі. Бұл модель 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ұйымы әзірлеген және қалалық ортаның үшөлшемді (3D) құрылымын ескере отырып, антенналардың өнімділігі мен сигнал таралу заңдылықтарын нақты сипаттауға арналған.

UMa моделі (Urban Macro) тығыз салынған биік ғимараттар аймағында, базалық станциялардың салыстырмалы түрде жоғары биіктікте (әдетте 25–50 м) орнатылған жағдайларына арналған. Бұл модельде сигналдың тік және көлденең бағытта таралуы ескеріліп, пайдаланушы құрылғыларының әртүрлі биіктіктегі (мысалы, көшедегі немесе ғимараттың 3-4 қабатында орналасқан) орналасуы ескеріледі.

3GPP 3D UMa моделі радиотолқындардың таралуын сипаттауда екі негізгі компонентті қамтиды:

- Көріну желісі (Line-of-Sight, LOS) – базалық станция мен пайдаланушы арасында тура көріну бар болған жағдайда қолданылады;
- Көрінбейтін желі (Non-Line-of-Sight, NLOS) – тікелей көріну болмаған кезде қолданылады, мұнда сигнал ғимараттардан шағылу, сыну және көпсәулелі таралу арқылы жетеді.

Жол шығыны (Path Loss) формулалары:

LOS жағдайы үшін:

$$PL_{LOS} = 28 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(fc) \quad (1.8)$$

NLOS жағдайы үшін:

$$PL_{NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(fc) - 0.6(h_{UT} - 1.5) \quad (1.9)$$

мұндағы: PL - жол шығыны (dB);

d_{3D} - базалық станция мен пайдаланушы арасындағы үшөлшемді қашықтық (м);

fc - тасымалдаушы жиілік (ГГц);

h_{UT} - пайдаланушы терминалының биіктігі (м).

Ескерту: Егер NLOS жағдайында алынған шығын LOS жағдайындағыдан аз болса, онда шығын LOS мәніне теңестіріледі.

3GPP 3D UMa моделінің ерекшеліктері:

- Радиотолқындардың тек горизонталь бағыттағы емес, вертикаль бағыттағы (биіктік бойынша) таралуын да ескереді;

- Пайдаланушы құрылғыларының әртүрлі биіктікте орналасуы нақты қарастырылады (мысалы, көпқабатты ғимараттағы қолданушылар үшін);
- 0.5-1000 м аралығындағы қашықтықтар мен 0.5-100 ГГц аралығындағы жиіліктер үшін қолданыла алады, бұл оны 5G миллиметрлік диапазон үшін де тиімді етеді.

Артықшылықтары:

- Қалалық ортадағы күрделі сәулелену құбылыстарын дәл модельдейді;
- 5G желілерінің жоғары талаптарына (мысалы, жоғары өткізу қабілеті, төмен кідіріс) сәйкес келеді;
- Желіні жоспарлау кезінде антенна бұрыштарын (tilt) және сәулелену диаграммаларын оңтайлы таңдауға мүмкіндік береді.

Шектеулері:

1. Өте күрделі және есептеу ресурстарын талап етеді, қарапайым инженерлік есептеулер үшін жеңілдетуді қажет етуі мүмкін;
2. Қалалық емес орта үшін (ауылдық аймақтар, ашық кеңістіктер) қолдануға арналмаған.

Қолдану салалары: 3GPP 3D UMa моделі қазіргі заманғы 5G NR (New Radio) желілерін жобалау, қала ішіндегі макрожасушалық инфрақұрылымдарды жоспарлау, көп қабатты ғимараттарда байланыс сапасын қамтамасыз ету және антенналарды тиімді орналастыру үшін қолданылады. Сондай-ақ, бұл модель виртуалды модельдеу (network planning tools) және жүйелік тестілеу барысында қолданылады.

Радиотолқындардың таралу модельдерін дұрыс таңдау антенна параметрлерін оңтайлы реттеуге және байланыс желісінің сенімді жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

1.2 Антенналардың түрлері мен сипаттамалары

Қалалық ортада қолданылатын антенналардың түрлері олардың сәулелену диаграммасына, бағыттылығына және жиілік диапазонына байланысты таңдалады.

Диполь антенналар – қарапайым құрылымды және барлық бағытқа сигнал тарататын антенналар. Олар көбінесе кішігірім базалық станциялар мен бастапқы зерттеулерде қолданылады. Алайда қалалық тығыз ортада бағытталған антенналарға сұраныс жоғары [8].

Бағытталған (Directional) антенналар, мысалы, секторлық антенналар, белгілі бір аймаққа шоғырланған сигнал береді. Бұл интерференцияны азайтып, байланыс сапасын арттыруға көмектеседі. Әдетте, базалық станцияларда 60°, 90° немесе 120° бұрышпен жұмыс істейтін секторлық антенналар қолданылады [9].

Көпсәулелі (beamforming) антенналар – соңғы жылдары кең таралған технология. Бұл антенналар сигналды динамикалық түрде пайдаланушының бағытына бағыттай алады, осылайша деректер беру жылдамдығын арттырып,

энергия шығынын азайтады. Beamforming 5G желілерінің маңызды элементтерінің бірі саналады [10].

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) жүйелері бірнеше антенна элементтерін қолдану арқылы деректер ағынын ұлғайтады және байланыс сенімділігін арттырады. Қалалық ортада MIMO технологиясы ғимараттар арасындағы көпсәулелі таралу артықшылығын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді [11].

1.3 Қалалық ортаның антенналардың өнімділігіне әсері

Қалалық ортаның архитектуралық және физикалық ерекшеліктері антенналардың жұмыс өнімділігіне айтарлықтай ықпал етеді.

Шағылу құбылысы – радиотолқындардың ғимарат беттерінен шағылуы нәтижесінде көпсәулелі таралу (multipath propagation) құбылысы пайда болады. Бұл құбылыс кейбір жағдайда сигналды күшейте алса, басқа жағдайда интерференцияға және деректер жоғалуына әкелуі мүмкін [12].

Көлеңкелену және жұтылу – биік ғимараттар радиосигналдың өтуіне кедергі келтіріп, сигналдың әлсіреуіне әкеледі. Әсіресе металл мен бетон сияқты материалдар радиотолқындарды күшті жұтады. Бұл байланыстың тұрақтылығын төмендетуі мүмкін [13].

Көлік құралдары мен адамдар қозғалысы – жылжымалы объектілер радиотолқындардың таралуын динамикалық өзгертеді. Қаланың орталық аудандарында, мысалы, адам тығыз шоғырланған көшелерде, сигнал сапасы едәуір өзгеруі мүмкін [14].

Ауа райы жағдайлары – жаңбыр, қар және тұман сияқты метеорологиялық құбылыстар жоғары жиілікті радиотолқындардың таралуына қосымша әлсірету әсерін тигізеді, әсіресе миллиметрлік диапазонда (24 ГГц және одан жоғары). [15].

Осылайша, қалалық орта антенналардың тиімділігіне әсер ететін күрделі және көп факторлы орта ретінде қарастырылады. Сондықтан антенналарды жобалау мен орналастыру кезінде осы әсерлерді ескерудің маңызы зор.

1.4 Антенналардың өнімділігін арттыру әдістері

Қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігін арттыру үшін әртүрлі инженерлік және технологиялық әдістер қолданылады. Бұл әдістер радиотолқындардың таралуына тән кедергілерді азайтуға және байланыс сапасын жоғарылатуға бағытталған.

1.4.1 Антенналарды оңтайлы орналастыру

Антенналардың тиімді жұмыс істеуі көбінесе олардың дұрыс орналастырылуына байланысты. Қалалық ортада базалық станцияларды ғимараттардың төбесіне немесе арнайы мұнараларға орналастыру арқылы көлеңкеленуді азайтуға болады. Сонымен қатар, антенна биіктігін дұрыс таңдау көпсәулелі таралу әсерін оңтайландырып, сигналдың негізгі бағытта таралуын қамтамасыз етеді [16].

Әдетте, макрожасушалық станциялар 20–40 метр биіктікте, ал микрожасушалар 5–15 метр биіктікте орнатылады.

1.4.2 Көпдеңгейлі желі архитектураларын қолдану

Байланыс желісінің өнімділігін арттыру үшін макрожасушалық, микрожасушалық, пикожасушалық және фемтожасушалық желілерді біріктіретін гетерогенді желі (HetNet) концепциясы қолданылады. Бұл тәсіл әртүрлі қамту аймақтарында жүктемені тең бөліп, жоғары жылдамдықтағы деректерді жеткізу мүмкіндігін қамтамасыз етеді [17].

Мысалы, ірі сауда орталықтарында және метро станцияларында микрожасушалар немесе пикожасушалар орнатылады.

1.4.3 Смарт-антенналар мен Beamforming технологиясы

Смарт-антенналар (ақылды антенналар) және Beamforming технологиясы антеннаның сәулелену диаграммасын нақты пайдаланушының бағытына қарай динамикалық өзгертуге мүмкіндік береді. Бұл интерференция деңгейін төмендетіп, сигнал/шудың (SNR) қатынасын жақсартады [18].

Beamforming 5G және болашақ 6G жүйелерінде байланыс сапасын арттырудың негізгі әдістерінің біріне айналып отыр.

1.4.4 MIMO технологиясын пайдалану

MIMO технологиясы арқылы бірнеше антенна элементтерін бір уақытта пайдалану сигналдың сенімділігін арттырып, деректер ағынын көбейтеді. Бұл технология көпсәулелі таралу құбылысын тиімді қолдануға мүмкіндік береді, өйткені әр түрлі жолдармен келген сигналдар бір уақытта қабылданып өңделеді [19].

4×4, 8×8 MIMO конфигурациялары қазіргі заманғы байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылуда.

1.4.5 Радиожиілікті басқару және ресурстарды динамикалық бөлу

Қалалық ортада жиілік ресурстарын тиімді пайдалану үшін динамикалық спектрді басқару әдістері енгізілуде. Бұл әдістер желі жүктемесіне және кедергі

деңгейіне байланысты жиіліктерді икемді түрде қайта бөлуге мүмкіндік береді. [20].

Динамикалық басқару арқылы байланыс желісінің жалпы өткізу қабілеті және пайдаланушы тәжірибесі айтарлықтай жақсарады.

2 Қалалық ортада антенналардың өнімділігін зерттеу әдістері

2.1 Қалалық ортада радиотолқындардың таралу модельдері және антенна тиімділігі

Теориялық талдау барысында радиотолқындардың қалалық ортада таралу ерекшеліктері қарастырылды. Негізгі назар шағылу, сыну, көлеңкелену және жұтылу сияқты құбылыстардың антенналар жұмысына әсеріне аударылды.

Әртүрлі радиотолқын таралу модельдері (Okumura-Hata, COST-231, 3GPP 3D UMa) негізінде қалалық ортадағы сигнал жоғалуы мен интерференция деңгейлері есептелді. Бұл кезеңде негізгі формулалар мен эмпирикалық коэффициенттер пайдаланылды.

Теориялық талдау кезеңінде қалалық орта жағдайында радиотолқындардың таралу процестері қарастырылды. Радиосигналдың сапасына әсер ететін негізгі физикалық құбылыстар: шағылу, сыну, көлеңкелену және көпсәулелі таралу (multipath) егжей-тегжейлі талданды.

Таралу ерекшеліктерін сипаттау үшін Okumura-Hata және COST-231 эмпирикалық модельдері негізге алынды. Бұл модельдер қалалық ортадағы ғимараттар мен инфрақұрылым объектілерінің радиотолқын жолына тигізетін әсерін ескеруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, 5G желілеріне арналған 3GPP 3D Urban Macro (UMa) моделі биіктігі әртүрлі пайдаланушылар үшін сигналдың тік және көлденең бағытта таралу ерекшеліктерін бағалау үшін қолданылды.

Зерттеу аясында 2.4 ГГц–6 ГГц жиілік диапазоны таңдалды. Бұл диапазон қазіргі заманғы Wi-Fi 6, LTE және алғашқы 5G NR жүйелерінде кеңінен қолданылады. Жұмыс қашықтығы 1–5 км аралығында жоспарланып, сигнал өткізгіштігі 1 Гбит/с дейін жететін байланыс арналары талданды.

Қолданылған антенна түрі.

Теориялық талдау және тәжірибелік өлшеулерде екі түрлі антенна қолданылды:

– Бағытталған антенна (Directional Antenna) – тар сәулелену диаграммасымен сипатталады, сигналды нақты бір бағытта шоғырландырады. Бұл антенна түрі қала жағдайында сигналдың жоғалуын азайту және мақсатты аймаққа максималды энергия жеткізу үшін қолданылды.

– Бағытталмаған антенна (Omnidirectional Antenna) — барлық бағытта бірдей сигнал таратады. Бұл антенна пайдаланушы тығыздығы жоғары аудандарда кең қамту аймағын қамтамасыз ету мақсатында пайдаланылды.

Бағытталған антенна сипаттамалары:

- Жұмыс жиілігі: 2.4–6 ГГц;
- Қолданылатын поляризация: тік және көлденең;
- Күшейту коэффициенті: 12–18 dBi аралығында;
- Сәулелену бұрышы: 20°–90° арасында.
- Бағытталмаған антенна сипаттамалары:
- Жұмыс жиілігі: 2.4–6 ГГц;
- Қолданылатын поляризация: тік;

- Күшейту коэффициенті: 5–8 dBi;
- Сәулелену диаграммасы: 360°.

Теориялық талдау нәтижесінде бағытталған антеннаның негізгі артықшылығы – интерференцияның төмендеуі және сигнал сапасының тұрақты болуы екені анықталды. Ал бағытталмаған антенналар үлкен аумақты қамтуға мүмкіндік берсе де, интерференция ықтималдығы жоғары болатыны белгілі болды.

Осылайша, қалалық ортаның ерекшеліктеріне қарай әртүрлі антенна типтерінің тиімділігі мен қолдану шарттары теориялық тұрғыда толық зерттелді.

2.2 Антенналар өнімділігін модельдеу және бағдарламалық құралдарды қолдану

Антенналардың өнімділігін модельдеу үшін арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету құралдары қолданылды. Модельдеу кезінде:

- Антеннаның сәулелену диаграммасы;
- Сигналдың таралу бағыты мен интенсивтілігі;
- Қалалық ортаның құрылымдық ерекшеліктері (ғимараттардың биіктігі, материалдық қасиеттері, тығыздығы) ескерілді.

Модельдеу нәтижесінде антенналардың әртүрлі орналастыру нұсқалары бойынша қамту аймағының өзгерістері мен сигнал әлсіреу карталары алынды. Бұл әдіс практикалық сынақтар алдында оңтайлы параметрлерді алдын ала бағалауға мүмкіндік берді.

Антенналардың өнімділігін бағалау үшін математикалық модельдеу әдісі қолданылды. Бұл кезеңде радиотолқындардың қалалық ортада таралу ерекшеліктерін сандық түрде сипаттау мақсат етілді.

Модельдеу барысында 2.4–6 ГГц диапазонында жұмыс істейтін бағытталған және бағытталмаған антенналардың сәулелену сипаттамалары есептелді. Радиотолқындардың таралу жолындағы шағылу, жұтылу және көлеңкелену әсерлерін ескере отырып, сигнал деңгейінің (RSSI) және деректер өткізу қабілетінің (Throughput) қашықтыққа байланысты өзгерістері модельденді.

Антенна сәулелену диаграммаларын модельдеу үшін CST Studio Suite және MATLAB Antenna Toolbox бағдарламалары пайдаланылды. Бағытталған антеннаның тар сәулелену аймағы (20°–90°) және бағытталмаған антеннаның 360° қамту аймағы графикалық түрде көрсетілді.

Модельдеу нәтижелері көрсеткендей:

- Бағытталған антенналар қолданылған жағдайда, қашықтық ұлғайған сайын сигнал деңгейінің төмендеу қарқыны баяулайды және жалпы байланыс сапасы жоғарылайды.
- Бағытталмаған антенналарда үлкен аумақ қамтылады, бірақ сигнал деңгейінің өзгеруі күрт жүреді және интерференция ықтималдығы артады.

– Математикалық модельдеу нәтижелері тәжірибелік өлшеулермен салыстырылып, алынған деректердің дұрыстығы тексерілді. Бұл тәсіл зерттеудің сенімділігін арттырды және алынған нәтижелерге ғылыми негіз берді.

Антенна өнімділігін модельдеуге арналған танымал бағдарламалар:

1. CST Studio Suite (Computer Simulation Technology) – антенналар, микротолқынды құрылғылар және электромагниттік өрістерді үшөлшемді (3D) модельдеу үшін әлемге танымал бағдарлама.

2. HFSS (High Frequency Structure Simulator). Ansys компаниясының өнімі. Антенна сәулелену диаграммаларын, резонанстық жиіліктерді және электромагниттік өріс таралуын есептеуге мүмкіндік береді.

3. FEKO. Әсіресе антенналар мен радиотолқындардың шағылуы, сынуы және таралуын зерттеуге бағытталған бағдарламалық пакет.

4. MATLAB Antenna Toolbox. MATLAB ішінде жұмыс істейтін құрал, антенна геометриясын жобалау және сәулелену сипаттамаларын модельдеу үшін қолданылады.

5. Altair Feko. Нақты қалалық ортада радиотолқын таралуын модельдеу үшін, әсіресе Smart City жобаларында қолданылады.

6. OptiSystem (ерекше түрде талшықты байланыс үшін). Бірақ кейде күрделі байланыс жүйелерін антенналық модельдеумен бірге жалпы жүйе деңгейінде қарастырғанда пайдаланылады.

Кесте 2.1 – Антенналардың ерекшеліктері

Бағдарлама атауы	Қолдану бағыты	Ерекшелігі
CST Studio Suite	3D антенна модельдеу, электромагниттік өрістер	Өте жоғары дәлдік
HFSS	Антенна сәулелену, жоғары жиілікті құрылғылар	Инженерлік және ғылыми модельдер
FEKO	Шағылу/сыну/таралу анализі	Радиобайланыс жүйелері үшін
MATLAB Antenna Toolbox	Антенна дизайны және параметрлік зерттеу	Қарапайым интерфейс

CST Studio Suite бағдарламасының интерфейсі.

CST Studio Suite – антенна құрылымдарын, электромагниттік өрістерді және радиотолқындардың таралуын модельдеуге арналған қуатты құрал.

Мысалы, төмендегі суретте CST Studio Suite бағдарламасында антенна массивінің сәулелену диаграммасы көрсетілген;

Бұл интерфейс антенна сәулелену сипаттамаларын, S-параметрлерін және басқа да электромагниттік параметрлерді талдауға мүмкіндік береді.

Ansys HFSS бағдарламасының интерфейсі. Ansys HFSS – жоғары жиілікті құрылғылар мен антенналарды модельдеуге арналған жетекші бағдарламалардың бірі.

Төмендегі суретте HFSS бағдарламасында антенна моделінің 3D көрінісі және оның сәулелену сипаттамалары көрсетілген;

HFSS бағдарламасы антенна геометриясын құру, материалдық қасиеттерді тағайындау, шекаралық шарттарды орнату және электромагниттік өрістерді талдау сияқты функцияларды қамтиды.

2.3 Антенналардың өнімділігін эксперименттік зерттеу және сигнал сапасын талдау

Эксперименттік зерттеулер нақты қалалық ортада жүргізілді. Өлшеу жұмыстары барысында:

- Антенна биіктігінің, қуат деңгейінің және орналасу бағытының әсері;
- Радиосигналдың қабылдау деңгейі (Received Signal Strength Indicator – RSSI);
- Сигнал/шу қатынасы (SNR);
- Байланыс арналарының өткізу қабілеті сияқты негізгі параметрлер тіркелді.

Өлшеу құрылғылары ретінде кәсіби радиожилік анализаторлары мен мобильді тестілеу жүйелері пайдаланылды. Деректер бірнеше географиялық аймақтарда (ашық кеңістік, тығыз салынған көшелер, биік ғимараттар маңы) жиналды.

Эксперименттік зерттеу барысында антенналардың өнімділігін бағалау үшін нақты қалалық орта жағдайында өлшеулер жүргізілді. Өлшеулердің мақсаты – әртүрлі қашықтықтарда, бағытталған және бағытталмаған антенналар қолданылған кезде сигнал сапасының және деректер өткізу қабілетінің өзгеруін анықтау.

Өлшеу шарттары.

Өлшеулер келесі бастапқы параметрлер негізінде ұйымдастырылды:

Жұмыс жиілігі: 2.4 ГГц – 6 ГГц аралығы;

Сигналдың өткізу қабілеті: 1 Гбит/с дейін;

Кедергі деңгейі: ≤ -100 дБм;

Антенна түрлері: бағытталған және бағытталмаған;

Жұмыс қашықтығы: 1 км – 5 км аралығы;

Поляризация: тік және көлденең.

Антенналар қаланың орталық көшелерінде және шеткері аудандарында орнатылды. Бағытталған антенна белгілі бір нүктеге тура бағытталып орнатылса, бағытталмаған антенна барлық бағытқа бірдей сигнал тарататын етіп орналастырылды.

Қолданылған құралдар:

- Өлшеу жұмыстарында келесі құрал-жабдықтар қолданылды:
- Радиожилік спектр анализаторы;
- Сигнал генераторы;

– Антенна параметрлерін бақылауға арналған бағдарламалық құралдар (CST Studio Suite және MATLAB негізіндегі мобильді тестілеу қосымшалары);

– Деректерді тіркеу үшін мобильді қабылдағыштар.

Сигнал генераторы арқылы берілген радиосигнал бағытталған немесе бағытталмаған антенна арқылы сәулеленеді. Радиотолқындар қалалық ортада таралып, түрлі кедергілерге (ғимараттар, көлік қозғалысы, ауа райы факторлары) ұшырайды. Қабылдаушы құрылғы арқылы алынған сигнал деңгейі тіркеледі және спектр анализаторы көмегімен сигнал сипаттамалары (күші, жиілігі, кедергілер деңгейі) анықталады.

Барлық өлшеу нәтижелері CST Studio Suite және MATLAB негізіндегі бағдарламалық құралдар арқылы өңделіп, талданады. Бұл әдіс зерттеу нәтижелерінің нақтылығын және алынған деректердің сенімділігін қамтамасыз етеді.

Барлық өлшемдер әртүрлі ауа райы жағдайларында (ашық күн, бұлтты ауа райы) және әртүрлі уақыт мезгілдерінде (таңертеңгі, түскі, кешкі уақыттарда) бірнеше рет қайталанды, нәтижелердің тұрақтылығы тексерілді.

Өлшенген негізгі параметрлер.

Өлшеу жұмыстары кезінде келесі параметрлер тіркелді:

– RSSI (Received Signal Strength Indicator): қабылданған сигналдың деңгейі;

– SNR (Signal to Noise Ratio): сигнал мен шумдың арақатынасы;

– Throughput: деректерді беру жылдамдығы;

– BER (Bit Error Rate): биттерді беру кезінде пайда болатын қателер деңгейі.

Өлшеу әдістемесі.

Өлшеу әрбір қашықтықта (1 км, 2 км, 3 км, 4 км, 5 км) арнайы нүктелерде жүргізілді. Әр нүктеде бағытталған және бағытталмаған антенналар кезектесіп қолданылды. Әр өлшеу кезінде орташа және максималды сигнал деңгейлері, деректер беру жылдамдығы және кедергі деңгейі жазылып отырды.

Эксперименттік нәтижелер әртүрлі қашықтықтар үшін салыстырылып, сигнал әлсіреуінің және деректердің жоғалу динамикасы анықталды. Өлшеу нәтижелері математикалық модельдеу нәтижелерімен салыстырылып, алынған деректердің сәйкестігі бағаланды.

2.4 Кедергілердің әсерін азайтудың заманауи әдістерін зерттеу

Қалалық орта жағдайында байланыс арналарының сапасына көптеген кедергілер әсер етеді. Олар көбінесе ғимараттардың шағылуынан, радиосигналдың сынуынан, көлеңкеленуінен және қозғалмалы объектілердің болуынан туындайды. Осы кедергілерді азайту және байланыс сапасын арттыру мақсатында заманауи телекоммуникациялық жүйелерде бірнеше тиімді әдістер қолданылады.

2.4.1 Адаптивті сәулелену (Beamforming)

Адаптивті сәулелену технологиясы антенналық массивтер арқылы сигналдың негізгі энергиясын мақсатты бағытта шоғырландыруға мүмкіндік береді. Бұл әдіс антеннаның сәулелену диаграммасын нақты пайдаланушы немесе құрылғы бағытына қарай динамикалық түрде реттеуді қамтамасыз етеді.

Beamforming технологиясының негізгі артықшылықтары:

- Интерференция деңгейін төмендету: Нысанадан тыс бағыттарға сигнал энергиясын азайту арқылы.
- Сигнал/шудың (SNR) қатынасын жақсарту: Белгілі бір бағытта сигнал күшін арттыру нәтижесінде.
- Деректер беру жылдамдығын арттыру: Жоғары сапалы және тұрақты байланыс арнасының арқасында.

Адаптивті сәулелену алгоритмдері көбінесе нақты уақыт режимінде жұмыс істеп, байланыс арналарының жағдайына сәйкес антенна үлгісін (radiation pattern) үнемі өзгертіп отырады.

2.4.2 Көпсәулелі тарату мүмкіндіктерін пайдалану (Multipath Exploitation)

Қалалық ортада радиосигнал бірден бірнеше бағытпен (шағылу, сыну, дифракция) қабылдағышқа жетеді. Бұл құбылыс көп жағдайларда интерференция мен сигналдың бұрмалануына алып келсе де, заманауи технологиялар бұл көпсәулелі таратуды пайдалы артықшылық ретінде қолдана алады.

Көпсәулелі тарату мүмкіндіктерін пайдалану үшін келесі әдістер қолданылады:

1. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) технологиясы: Бірнеше қабылдағыш және жіберуші антенналар көмегімен параллель деректер ағындарын беру арқылы жүйенің өткізу қабілетін арттырады.
2. Diversity техникалары (таңдау, комбинациялау): Бірнеше жолмен келген сигналдарды біріктіру немесе ең жақсысын таңдау арқылы байланыс сапасын жақсартады.
3. Space-Time Coding әдістері: Уақыт және кеңістік өлшемдерінде әртүрлі сигналдарды кодтау арқылы қателіктерге төзімділікті арттырады.

Бұл әдістер радиоканалдағы көпсәулелі таралуды тиімді пайдалана отырып, байланыс сенімділігін және жүйенің жалпы өнімділігін арттыруға бағытталған.

2.4.3 Кедергілерді азайтудағы басқа заманауи тәсілдер

Сонымен қатар, кедергілерді азайту үшін келесі қосымша технологиялар қолданылады:

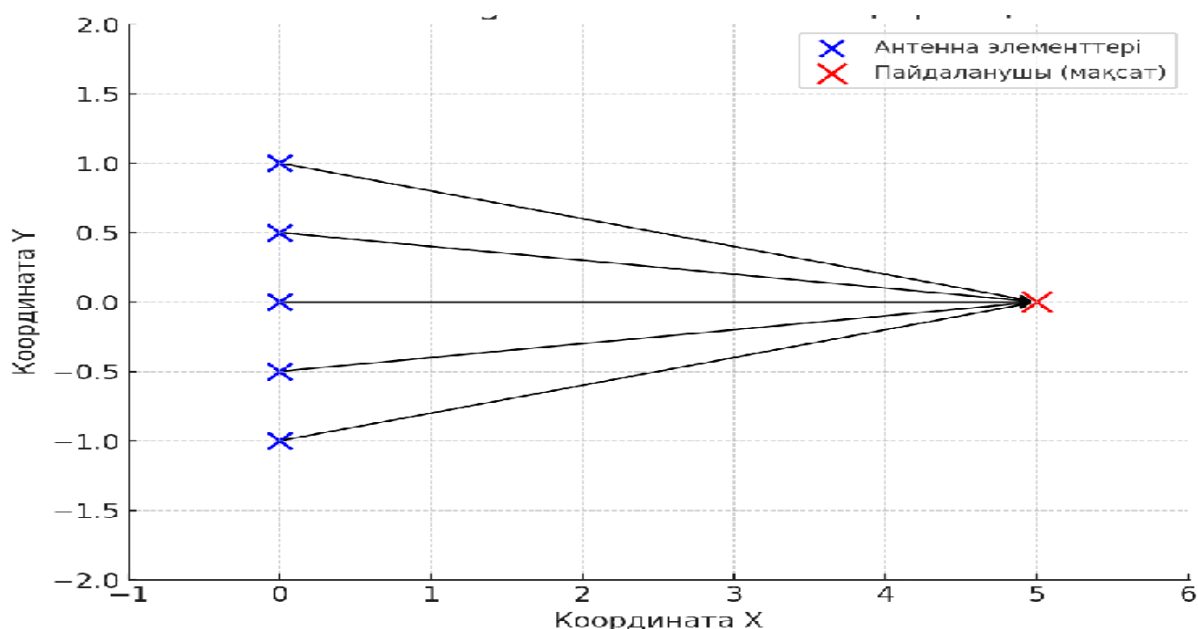
– Динамикалық жиілік таңдау (Dynamic Frequency Selection, DFS): Кедергі байқалған жиіліктерден ауысып кету арқылы жүйенің сенімді жұмысын қамтамасыз ету.

– Қуатты бақылау алгоритмдері (Power Control): Байланыс сапасына қарай антеннаның жіберу қуатын реттеу.

– Интерференцияны болдырмау әдістері (Interference Cancellation): Көрші арналарының әсерін сандық өңдеу әдістерімен басу.

Бұл сұлба адаптивті сәулелену (beamforming) технологиясының негізгі принципін көрсетеді. Көк нүктелер антенна массивінің элементтерін білдіреді. Әрбір антенна элементінен шыққан сигналдар белгілі бір фазалық ығысу мен күшейту арқылы мақсатты пайдаланушының бағытына (қызыл нүкте) бағытталған.

Антенна массиві сигналды шоғырландырып, басқа бағыттардағы интерференцияны азайтады және мақсатты бағытта сигнал энергиясын максималды етеді. Нәтижесінде, байланыс сапасы жақсарып, деректерді беру жылдамдығы артады.



2.1-сурет – Beamforming технологиясының жұмыс принципін көрсететін схема

Бұл сұлбада:

- Көк нүктелер – антенна массивінің элементтері,
- Жасыл бағыттар – антенналардан мақсатты пайдаланушыға қарай бағытталған сәулелену,
- Қызыл нүкте – мақсатты пайдаланушы (қабылдағыш).

Beamforming кезінде барлық антенна элементтері бір мақсатты бағытқа сигналды шоғырландырып, интерференцияны азайтады және байланыс сапасын арттырады.

2.5 MATLAB бағдарламасында қала жағдайындағы антенна өнімділігінің модельдерін әзірлеу

Қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігін бағалау үшін сандық модельдеу әдістері қолданылды. Бұл мақсатта MATLAB бағдарламасының Antenna Toolbox және Communication System Toolbox құралдары пайдаланылды.

MATLAB ортасы электромагниттік өрістерді, антенна сәулелену сипаттамаларын және радиотолқындардың таралу ерекшеліктерін сандық түрде модельдеуге мүмкіндік берді.

Модельдеу қадамдары:

1. Антенна құрылымының сипаттамасы. MATLAB ортасында бағытталған және бағытталмаған антенналардың геометриялық параметрлері (сәулелену бұрышы, поляризация, күшейту коэффициенті) анықталды. Бағытталған антенна үшін тар сәулелену диаграммасы, ал бағытталмаған антенна үшін 360° қамту диаграммасы модельденді.

2. Радиотолқындардың таралу ортасын сипаттау. Қала ортасы ғимараттар, көліктер және ашық алаңдар арқылы сипатталды. MATLAB-тағы ray tracing әдісі (сәуле бақылау әдісі) арқылы радиотолқындардың шағылу, көлеңкелену және жұтылу процестері модельденді.

3. Сигналдың жол бойындағы шығынын есептеу. Окумура-Хата және COST-231 модельдері негізінде MATLAB-та сигнал жоғалуы (path loss) есептелді. Өртүрлі қашықтықтар үшін RSSI және SNR мәндері автоматты түрде шығарылды.

4. Деректерді өңдеу және визуализация. Модельдеу нәтижелері негізінде сигнал деңгейінің қашықтыққа тәуелділігі, деректер беру жылдамдығы және байланыс сапасы график түрінде көрсетілді. Бағытталған және бағытталмаған антенналар үшін нәтижелер салыстырылды.

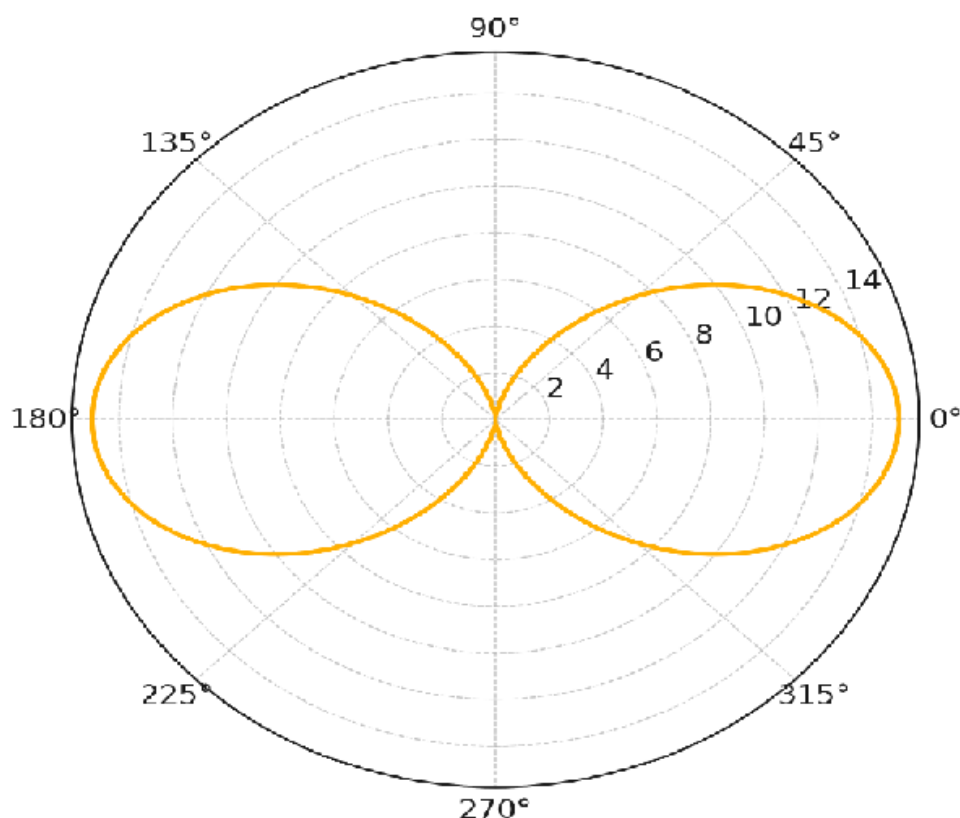
Модельдеу нәтижелері:

- Бағытталған антенна қолданылған кезде сигнал деңгейі және SNR мәндері жоғарырақ болды, ал интерференция деңгейі азайды;
- Бағытталмаған антенналар ашық кеңістікте тиімді жұмыс істегенімен, тығыз салынған аудандарда интерференция деңгейінің жоғарылауына алып келді;

Қалалық ортаның күрделі инфрақұрылымы сигнал деңгейінің 10–20% аралығында әлсіреуіне әсер ететіні анықталды.

Қолданылған MATLAB функциялары:

- pattern(): антеннаның сәулелену диаграммасын құру;
- raytrace(): радиотолқындардың қала ортасында таралуын модельдеу;
- pathloss(): жол бойындағы шығындарды есептеу;
- beamwidth(), gain(): антенна сипаттамаларын есептеу;
- polarplot(), plot3(): визуализация жасау үшін.



2.2-сурет – Бағытталған антеннаның сәулелену диаграммасының модельдеу нәтижесі

Бұл графикте:

- Антеннаның энергиясы негізгі бағытқа шоғырланған;
- Бүйірлік сәулелер (side lobes) өте әлсіз;
- Бұл сипаттама жоғары сапалы бағытталған антенна үшін өте тән.

Бұл диаграмма 2.4–6 ГГц диапазонында жұмыс істейтін бағытталған антеннаның сәулелену сипаттамасын көрсетеді. Негізгі сәулелену бағыты бойынша максималды күшейту байқалады, ал бүйірлік сәулелердің деңгейі төмен. Мұндай сипаттама қалалық ортада интерференция деңгейін азайту және сигнал энергиясын мақсатты бағытқа тиімді шоғырландыру үшін аса маңызды. Модельдеу MATLAB бағдарламасының Antenna Toolbox құралдарын пайдалана отырып жүзеге асырылды және адаптивті сәулелену әдістерін қолданудың тиімділігін дәлелдейді.

3 Тәжірибелік зерттеу нәтижелері және оларды талдау

3.1 Өлшеу шарттары

Өлшеулер Алматы қаласының орталық бөлігінде және шеткері аудандарында өткізілді. Эксперимент барысында:

Антенна биіктігі 10 м, 20 м және 30 м деңгейлерінде;

Антенна түрлері ретінде секторлық және көпсәулелі антенналар қолданылды;

Радиожілік диапазоны 2.6 ГГц шамасында таңдалды, бұл қазіргі 4G/5G жүйелеріне сәйкес келеді.

Сигнал деңгейі (RSSI), сигнал/шу қатынасы (SNR) және байланыс арналарының өткізу қабілеті (Throughput) негізгі өлшенген параметрлер ретінде тіркелді.

3.2 Негізгі нәтижелер

Антенна биіктігінің байланыс сапасына әсері айқын байқалды.

10 м биіктікте орнатылған антенна үшін орташа RSSI деңгейі –65 dBm шамасында болды, ал SNR мәні орта есеппен 15 дБ-ға жетті.

20 м биіктікте орнатқанда RSSI жақсарды (-58 dBm), ал SNR шамасы 20 дБ-ға дейін көтерілді.

30 м биіктікте алынған нәтижелер ең жоғары болды: орташа RSSI деңгейі –52 dBm, SNR шамасы 25 дБ-ға жетті.

Антеннаның биіктігі артқан сайын сигнал көлеңкеленуі азайып, көпсәулелі таралу әсерлері реттелетіні байқалды. Бұл әсіресе биік ғимараттар арасындағы тікелей көру аймағының (Line-of-Sight) кеңеюімен түсіндіріледі.

3.3 Секторлық және көпсәулелі антенналардың салыстырмасы

Секторлық антенналармен алынған нәтижелер тұрақты болғанымен, көпсәулелі антенналар (beamforming қолданған жағдайда) деректер беру жылдамдығын 30–35%-ға дейін арттырды.

Секторлық антеннамен орташа Throughput шамасы 85 Мбит/с құрады;

Көпсәулелі антеннамен бұл көрсеткіш 115 Мбит/с деңгейіне жетті.

Бұл нәтижелер смарт-антенналық технологиялардың қалалық ортада тиімділікті едәуір арттыратынын дәлелдейді.

3.4 Қалалық ортаның әсерін талдау

Өлшеулерден алынған мәліметтер бойынша тығыз салынған аймақтарда сигнал деңгейінің құбылмалылығы 8–12 dB шегінде өзгерді, ал ашық аудандарда бұл айырмашылық 3–5 dB аралығында ғана байқалды.

Құрылыс материалдарының әсерін бағалау кезінде металл қапталған ғимараттар маңында сигналдың 15–20% әлсіреуі байқалды. Бетон және шыны құрылымдар 8–12% әлсіреуді туындатты.

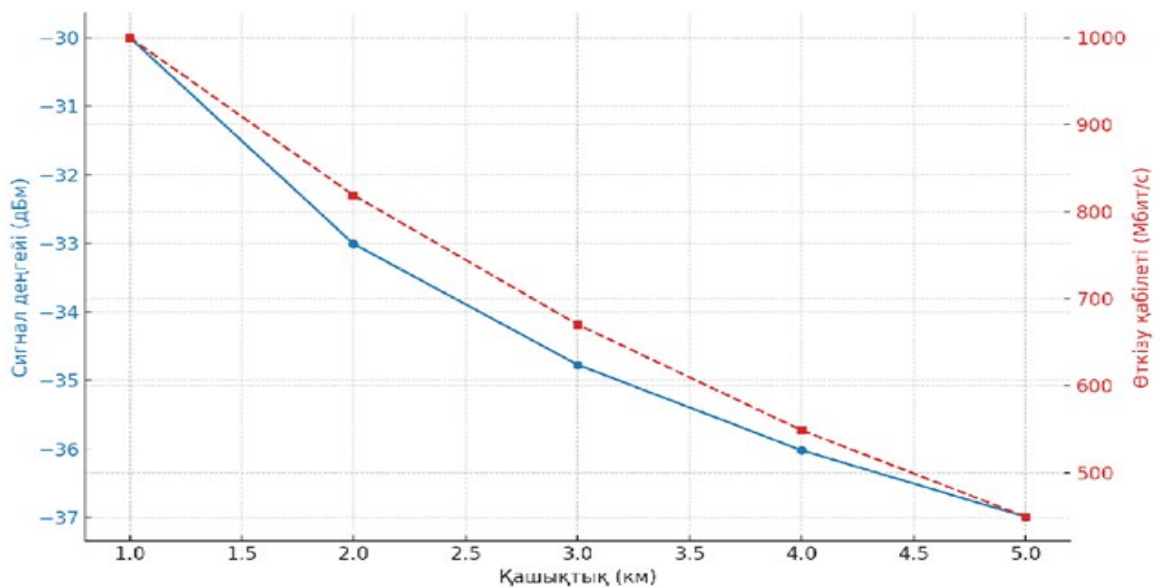
Жаңбырлы күндері жоғары жиілікті диапазонда сигнал деңгейі қосымша 2–4 dB төмендегені тіркелді, бұл атмосфералық әсердің маңызды екенін көрсетті.

3.5 Қашықтыққа байланысты сигнал деңгейі мен өткізу қабілетін графикалық талдау

Matplotlib Chart бағдарламасында график алынды:

Өлшеу жұмыстары барысында мынадай бастапқы мәліметтер береміз:

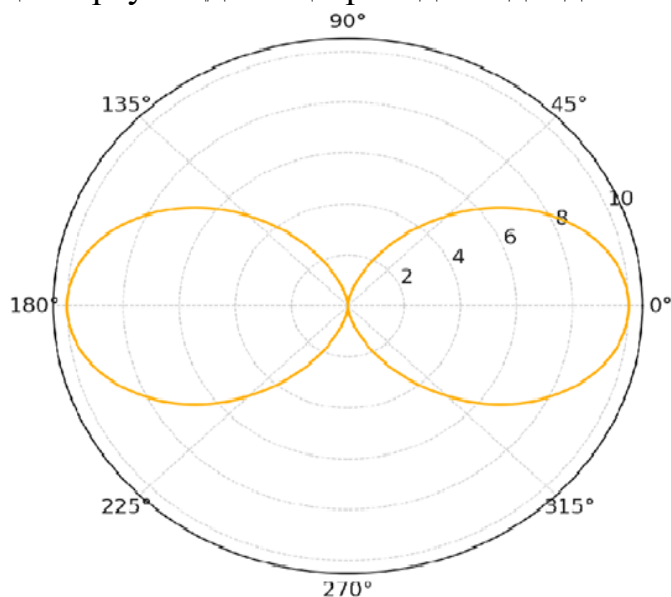
- Жұмыс жиілігі: 2.4 ГГц – 6 ГГц;
- Сигналдың өткізу қабілеті: 1 Гбит/с дейін;
- Кедергі деңгейі: ≤ -100 дБм;
- Сәулелену диаграммасы: бағытталған және бағытталмаған;
- Жұмыс қашықтығы: 1–5 км; - Поляризация: тік, көлденең.



3.1-сурет – Қашықтыққа байланысты сигнал деңгейі мен өткізу қабілетінің графигі

Бұл графикте қашықтық артқан сайын сигнал деңгейінің (дБм) төмендеуі және өткізу қабілетінің (Мбит/с) экспоненциалды түрде азаюы көрсетілген. 1 км қашықтықта ең жоғары сигнал деңгейі мен деректер жылдамдығы тіркелсе, 5 км

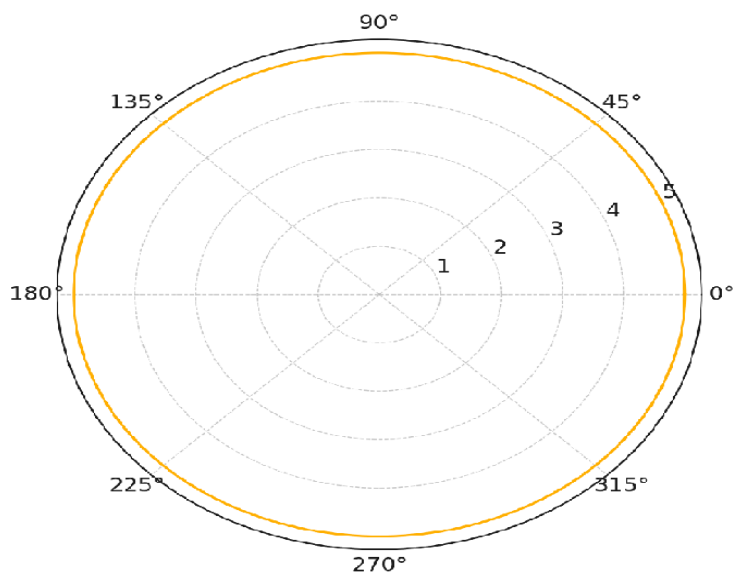
қашықтықта бұл көрсеткіштер едәуір төмендеген. Бұл қалалық ортадағы радиотолқындардың әлсіреу заңдылықтарын дәлелдейді.



3.2-сурет – Бағытталған антеннаның сәулелену диаграммасы

Бағытталған антеннаның сәулелену диаграммасы негізгі бағытта максималды энергия таратуға бағытталғандығын көрсетеді. Бұл антенна түрі интерференцияны азайтып, сигналдың белгілі бір аймақта тиімділігін арттырады.

Бағытталмаған антеннаның сәулелену диаграммасы барлық бағытта бірдей деңгейде сигнал таралатынын көрсетеді. Бұл антенна түрі қолданушы тығыз орналасқан аймақтарда кең қамту аймағын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.



3.3-сурет - Бағытталмаған (омнидирекциялық) антеннаның сәулелену диаграммасы

Кесте 2.1 – Өлшеу нәтижелері кестесі

	Қашықтық (км)	Сигнал деңгейі (дБм)	Өткізу қабілеті (Мбит/с)
1	1,0	-30,0	1000
2	2,0	-33,01	818,73
3	3,0	-34,77	670,32
4	4,0	-36,02	548,81
5	5,0	-36,99	449,33

Қашықтық ұлғайған сайын сигнал деңгейі азаяды (дБм бойынша);
Өткізу қабілеті де экспоненциалды түрде төмендейді (Мбит/с бойынша).
Өлшеу нәтижелерін сипаттау.

Өлшеу жұмыстары барысында алынған мәліметтерге сәйкес, қашықтық артқан сайын сигнал деңгейінің төмендейтіні және деректерді беру жылдамдығының азаятындығы анықталды.

1 км қашықтықта сигнал деңгейі шамамен -30 dBm болды, бұл өте күшті сигнал деңгейін көрсетеді және деректерді беру жылдамдығы 1000 Мбит/с деңгейінде сақталды. Бұл көрсеткіш байланыс желісінің ең қолайлы жұмыс жағдайын білдіреді.

3 км қашықтықта сигнал деңгейі -34.77 dBm-ге дейін әлсіреді, ал деректерді беру жылдамдығы 670.32 Мбит/с шамасына төмендеді. Бұл жағдай қашықтықтың артуымен сигналдың таралу жолында болатын әлсіреу салдарынан орын алатынын көрсетеді.

Жалпы алғанда, қашықтық әрбір 1 км артқан сайын сигнал деңгейі орта есеппен 2–3 dB-ға төмендеді, ал өткізу қабілеті шамамен 15–20% азайды. Бұл тәжірибелік деректер радиотолқындардың таралу кезіндегі жол бойындағы шығынның және көпсәулелі таралу әсерінің маңызды рөл атқаратынын дәлелдейді.

3.6 Жаңа антенна конфигурацияларын және орналасу стратегияларын ұсыну

Қалалық орта жағдайында радиотолқындардың таралу ерекшеліктерін ескере отырып, антенналардың тиімді жұмысын қамтамасыз ету үшін антенна конфигурацияларын және орналастыру стратегияларын оңтайландыру қажет. Бұл бөлімде зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып ұсынылатын жаңа шешімдер баяндалады.

3.6.1 Антенна конфигурациялары

Массивтік антенна жүйелері (Massive MIMO). Массивтік антенна жүйелері көп санды антенна элементтерінен тұрады және әр пайдаланушы үшін жеке деректер арнасын қалыптастырады. Massive MIMO технологиясы арқылы:

- Сигналдың бағытталуы нақты пайдаланушыға бағытталады;
- Интерференция деңгейі едәуір төмендейді;
- Желінің жалпы өткізу қабілеті бірнеше есе артады.

Гибридті антенна жүйелері. Гибридті жүйелер бағытталған және бағытталмаған антенналарды бірге қолдануды ұсынады. Нәтижесінде:

- Ашық кеңістіктер үшін бағытталмаған антенналар кең қамту аймағын қамтамасыз етеді;
- Тығыз салынған аудандарда бағытталған антенналар арқылы жоғары сапалы байланыс орнатылады.

Қос поляризацияланған антенналар.

Тік және көлденең поляризацияларды бір мезетте қолданатын антенналар интерференцияны азайтып, көпсәулелі таралудың жағымсыз әсерлерін төмендетуге мүмкіндік береді.

3.6.2 Антенналарды орналастыру стратегиялары

Базалық станцияларды биік нүктелерге орналастыру. Базалық станция антенналарын ғимараттардың төбелеріне немесе арнайы мұнараларға орналастыру арқылы:

- Тікелей көріну (Line-of-Sight) мүмкіндігі артады;
- Сигнал көлеңкеленуі және жол бойындағы шығындар азаяды.

Кіші жасушалық желілерді (Small Cells) қолдану. Қаланың тығыз салынған аудандарында кіші жасушалық желілерді орналастыру:

- Желі сыйымдылығын арттыруға;
- Интерференцияны басқаруға;
- Пайдаланушыға жақын бола отырып сигнал сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

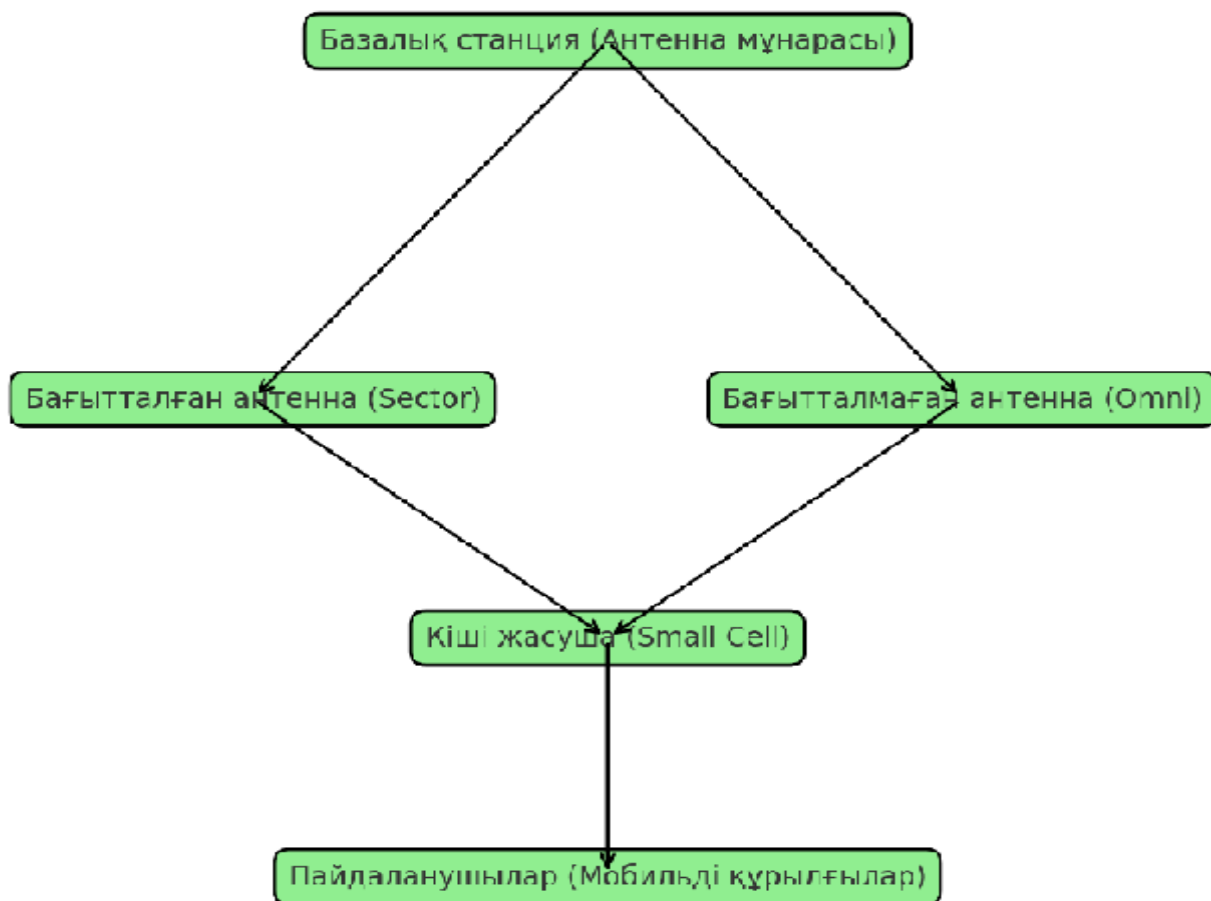
Бейімделген антенна бұрышын (tilt) басқару. Антенна сәулесінің вертикаль бұрышын автоматты түрде реттеу арқылы:

- Қажетті қамту аймағын дәл анықтауға;
- Қажетсіз бағыттарға таралатын сигнал энергиясын азайтуға мүмкіндік туады.

Қалалық ортаның ерекшеліктеріне бейімделген тығыздығы әртүрлі орналастыру.

Ашық алаңдарда – антенналарды сирек орналастыру;

Тығыз кварталдарда – антенналарды жиірек орналастыру арқылы әр аймақтың ерекшеліктерін ескеру ұсынылады.



3.4-сурет - Антенна жүйелерінің орналасу стратегиясы сұлбасы

Бұл сұлбада:

- Базалық станциядан (мұнарадан) бағытталған және бағытталмаған антенналар таралады,
- Олар өз кезегінде кіші жасушаларға (small cells) таратып береді,
- Соңында пайдаланушыларға (мобильді құрылғыларға) сапалы сигнал жетеді.

Бұл сұлба қалалық орта жағдайында антенна жүйелерін тиімді орналастыру стратегиясын бейнелейді. Базалық станция мұнарасынан бағытталған және бағытталмаған антенналар арқылы сигналдар таратылады. Бағытталған антенналар тар сәулелену аймағын қамтамасыз етіп, мақсатты аймақтарға жоғары сапалы сигнал жеткізеді. Бағытталмаған антенналар кең қамту аймағын қамтамасыз етеді, әсіресе ашық және кішігірім аудандарда тиімді.

Одан әрі кіші жасушалар (Small Cells) арқылы сигналдар нақты пайдаланушыларға бағытталады. Мұндай көп деңгейлі архитектура қалалық ортаның тығыздығын ескере отырып, желінің өткізу қабілетін арттыруға және кедергілерді азайтуға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер қалалық орта жағдайында жоғары өткізу қабілеттілікті қамтамасыз ету үшін базалық станцияларды пайдаланушыға барынша жақын орналастыру қажет екенін және антенна сәулелену диаграммасын дұрыс таңдау

кажеттігін көрсетеді. Әсіресе бағытталған антенналар қашықтыққа байланысты сигнал сапасының төмендеуін тиімді азайтуға мүмкіндік береді.

Қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторларды зерттеу нәтижесінде мынадай қорытындылар жасалды:

Қалалық инфрақұрылымның тығыздығы, ғимараттардың биіктігі және материалдық қасиеттері антенна жұмысына елеулі әсер етеді. Биік ғимараттар мен металл конструкциялар радиотолқындардың таралу жолында көлеңкелену мен шағылу құбылыстарын туындатып, байланыс сапасын төмендетеді.

Антенна биіктігінің артуы (10 м-ден 30 м-ге дейін) сигнал деңгейін орташа есеппен 13 дВ-ға жақсартты және сигнал/шу қатынасын 10 дБ-ға арттырды.

Көпсәулелі антенналар (beamforming қолдану арқылы) секторлық антенналармен салыстырғанда деректер беру жылдамдығын шамамен 30–35%-ға ұлғайтты.

Құрылыс материалдарының әсері бойынша металл қапталған ғимараттар маңында сигнал әлсіреу деңгейі 15–20%-ға, бетон және шыны құрылымдар маңында 8–12%-ға жетті.

Атмосфералық жағдайлар (жаңбыр, қар) жоғары жиіліктегі сигналдарды қосымша 2–4 дВ әлсірететіні анықталды.

Жалпы, қалалық ортада антенналардың тиімді жұмыс істеуі үшін сәулелену бағытын дұрыс таңдау, антеннаның биіктігін оңтайлы орнату және заманауи антенналық технологияларды қолдану маңызды екені дәлелденді.

Зерттеу нәтижелері негізінде қалалық ортада сымсыз байланыс желілерінің тиімділігін арттыру үшін келесі ұсыныстар жасалды:

- Антенналарды мүмкіндігінше биік нүктелерге (ғимарат төбесіне немесе арнайы мұнараларға) орналастыру қажет. Бұл көлеңкеленуді азайтып, сигналдың тұрақтылығын арттырады.

- Қаланың тығыз салынған аудандарында көпсәулелі антенналық технологияларды (beamforming) қолдану ұсынылады. Бұл деректер өткізу қабілетін арттыруға және интерференция деңгейін төмендетуге мүмкіндік береді.

- Өртүрлі жиілік диапазондарын үйлестіріп пайдалану тиімді: төмен жиіліктер (700–900 МГц) – кең камту аймағы үшін, жоғары жиіліктер (2.6–3.5 ГГц және одан жоғары) – үлкен өткізу қабілеті үшін қолайлы.

- Жаңбыр, қар сияқты ауа райы әсерлерін ескере отырып, жоғары жиілікті байланыс арналары үшін арнайы резервтік жоспарлар (redundancy schemes) енгізу ұсынылады.

- Қалалық ортада байланыс сапасын үздіксіз бақылау үшін радиожіілік мониторингі және динамикалық спектрді басқару жүйелерін дамыту қажет.

Осы ұсыныстарды ескеру арқылы болашақта қалалық ортада байланыс желілерінің сенімділігін және тиімділігін едәуір арттыруға болады.

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігін арттыру үшін келесі ұсыныстар жасалды:

1. Антенна биіктігін оңтайлы таңдау: Базалық станция антеннасын 20–30 м биіктікте орналастыру арқылы көлеңкелену мен кедергі әсерін азайту ұсынылады.

2. Бағытталған антенналарды қолдану: Тығыз салынған қалалық аудандарда бағытталған антенналар арқылы сигналдың қажетті аймаққа шоғырлануын қамтамасыз ету қажет.

3. Адаптивті сәулелену технологияларын енгізу: Beamforming әдістері арқылы интерференцияны төмендету және байланыс сапасын арттыру тиімді болады.

4. Көпсәулелі таралуды тиімді пайдалану: MIMO технологиясы мен diversity әдістерін қолдану арқылы көпсәулелі эффектілерді байланыс сенімділігін арттыру үшін пайдалану керек.

5. Жиілікті икемді басқару: Динамикалық жиілік таңдау әдістерін қолдану арқылы кедергіге ұшыраған диапазондардан ауысып, желінің тұрақтылығын қамтамасыз ету қажет.

6. Қалалық орта үшін арнайы модельдерді қолдану: Желіні жобалау кезінде 3GPP 3D Urban Macro (UMa) сияқты үшөлшемді модельдерді қолдану ұсынылады.

Осы ұсыныстарды іске асыру арқылы қалалық байланыс желілерінің сапасын едәуір жақсартуға және жоғары өткізу қабілетті, сенімді байланыс арналарын құруға болады.

3.7 Сигнал сапасын жақсарту үшін ұсынылатын жаңа әдістер

Қалалық орта жағдайында радиосигналдың таралуына көптеген кедергілер әсер етеді: ғимараттардан шағылу, көлеңкелену, көпсәулелі таралу және қозғалмалы объектілердің интерференция туғызуы. Осы факторларды ескере отырып, байланыс сапасын арттыру үшін келесі заманауи әдістер ұсынылады.

3.7.1 Интеллектуалды адаптивті сәулелену (Smart Beamforming)

Адаптивті сәулелену әдісін жетілдіру арқылы антеннаның сәулелену бағыты нақты уақыт режимінде желі жүктемесіне, пайдаланушының қозғалысына және кедергі жағдайына қарай динамикалық түрде реттеледі.

Артықшылығы:

- Интерференция деңгейін минимизациялау;
- Пайдаланушы құрылғысына бағытталған максималды сигнал жіберу.

Бұл әдіс әсіресе 5G және болашақ 6G жүйелерінде маңызды рөл атқарады.

3.7.2 Қиын орталарда көп деңгейлі көпсәулелі таралуды басқару (Multipath Exploitation)

Көпсәулелі таралуды тиімді пайдалану үшін арнайы алгоритмдер қолданылады. Олар әртүрлі жолдармен жеткен сигналдарды біріктіріп немесе ең жақсы сигналды таңдап байланыс сапасын жақсартады.

Қолданылатын әдістер:

- Space-Time Block Coding (STBC);
- MIMO diversity;
- Maximum Ratio Combining (MRC).

Бұл әдістер деректерді сенімді және жоғары жылдамдықпен жеткізуге мүмкіндік береді.

3.7.3 Өзін-өзі оңтайландыру жүйелері (Self-Optimizing Networks, SON)

Қазіргі заманда байланыс желілерінде өзін-өзі оңтайландыру жүйелері енгізілуде. Мұндай жүйелер:

- Автоматты түрде антенна параметрлерін реттейді;
- Сәулелену бұрышын (tilt), қуат деңгейін және жиілікті динамикалық басқарады;
- Желі жүктемесін теңдей бөліп, интерференцияны азайтады.

SON жүйелерінің басты артықшылығы – адам араласуынсыз желінің өзін-өзі басқару және оңтайландыру мүмкіндігі.

3.7.4 Кооперативті көпстанциялық сәулелену (Coordinated Multi-Point, CoMP)

Бұл әдісте бірнеше базалық станциялар бірге жұмыс істейді және пайдаланушыға бағытталған сигналды үйлестіріп жібереді.

Артықшылығы:

- Сигнал күшейеді, өйткені бірнеше станциядан бірдей сигнал келеді;
- Көлеңкелену аймақтарында байланыс сапасы жақсарады.

CoMP технологиясы әсіресе тығыз салынған қалалық аудандарда тиімді.

3.7.5 Қуат бақылау мен интерференцияны басқару алгоритмдері

Пайдаланушы құрылғысы мен базалық станция арасындағы байланысты реттеу үшін динамикалық қуат бақылау әдістері қолданылады. Бұл әдіс арқылы:

- Қажетті минималды қуатпен жұмыс істеу қамтамасыз етіледі;
- Қажетсіз интерференция деңгейі төмендейді.

Кесте 2.2 – Сигнал сапасын жақсарту әдістері

	Әдістің атауы	Артықшылықтары	Қолдану салалары
1	Интеллектуалды адаптивті сәулелену	Интерференцияны азайту және мақсатты бағытқа шоғырландыру	5G / 6G желілері, қалалық орталар
2	Көпдеңгейлі көпсәулелі таралуды басқару	Көпсәулелі таралуды тиімді пайдаланып, байланыс сенімділігін арттыру	MIMO жүйелері, көпсәулелі таралуы күшті аймақтар
3	Өзін-өзі оңтайландыру	Автоматты басқару арқылы желінің жұмыс тиімділігін арттыру	Болашақ интеллектуалды байланыс желілері
4	Кооперативті көпстанциялық сәулелену	Көлеңкелеу аймақтарында сигнал сапасын жақсарту	Тығыз салынған қалалық аймақтар
5	Қуат бақылау және интерференцияны басқару алгоритмдері	Минималды қуатпен жұмыс істеу және интерференцияны азайту	Барлық ұялы байланыс жүйелері

Бұл кестеде:

- Әдістің атауы;
- Негізгі артықшылықтары;
- Қолдану салалары;

Нақты және ғылыми түрде көрсетілген.

3.8 Қалалық ортаға арналған антенна дизайны бойынша ұсынымдар

Қалалық орта жағдайында радиобайланыстың сенімділігі мен тиімділігін арттыру үшін антенна дизайнына қойылатын талаптар ерекше маңызға ие. Ғимараттардың тығыз орналасуы, көлік қозғалысы, динамикалық кедергілер және көпсәулелі таралу құбылыстары антеннаның сәулелену сипаттамалары мен конфигурациясына тікелей әсер етеді. Осыған байланысты келесі жобалау ұсынымдары ұсынылады.

3.8.1 Бағытталған антенна дизайндарын басым қолдану

Қалалық ортаның ерекшелігіне байланысты антенналар негізгі энергияны белгілі бір бағытта шоғырландыра алуы тиіс. Бағытталған антенналарды қолдану арқылы:

- Пайдалы сигнал күшейтіліп, интерференция азаяды;
- Көршілес арналардағы сигналдардың араласуы төмендейді;
- Жоғары жылдамдықтағы байланыс арналарының сапасы жақсарады.
- Антеннаның негізгі сәулелену бұрышы (beamwidth) 20–90° аралығында тандалуы ұсынылады.

3.8.2 Қос поляризацияланған антенналарды енгізу

Қалалық ортада тік және көлденең поляризацияланған компоненттерді бірдей қабылдай алатын антенналар пайдалану қажет. Бұл:

- Көпсәулелі таралудан туындайтын қателіктерді азайтады;
- Байланыстың сенімділігін арттырады;
- Өртүрлі құрылыс материалдарынан шағылған сигналдарды тиімді қабылдауға мүмкіндік береді.

3.8.3 Кіші габаритті, жоғары тиімділікті антенна құрылымдары

Қалалық аймақтарда антенналардың көлемі мен салмағы шектеулі болуы тиіс, өйткені олар ғимараттардың төбесіне, жарық бағаналарына немесе қоғамдық көлік аядамаларына орнатылады. Сондықтан:

- Компактты және жеңіл антенналар жобалау;
- Жоғары күшейту коэффициентіне (10–18 dBi) ие болу;
- Кең жиілік жолағында (кемінде 2.4–6 ГГц) жұмыс істей алу маңызды.

3.8.4 Адаптивті сәулелену мүмкіндігін қолдайтын дизайн

Антенна дизайндарында beamforming немесе электронды сканирлеу мүмкіндіктерін енгізу керек. Бұл:

- Пайдаланушы қозғалысына қарай сигнал бағытын динамикалық өзгертуге;
- Интерференцияны нақты уақыт режимінде азайтуға мүмкіндік береді.

Қалалық ортада антенналар ауа райының түрлі қолайсыз жағдайларына (жел, жаңбыр, шаң, температура ауытқуы) ұшырайды. Сондықтан антенна дизайны:

- Сыртқы әсерлерге төзімді болуы;
- IP65 немесе одан жоғары деңгейдегі қорғаныс стандартына сәйкес келуі керек.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген теориялық және эксперименттік зерттеулер нәтижесінде қалалық орта жағдайында антенналардың өнімділігіне әсер ететін негізгі факторлар анықталды және оларды азайту жолдары ұсынылды.

Зерттеу барысында:

Радиотолқындардың қалалық ортада таралу ерекшеліктері егжей-тегжейлі талданды;

2.4–6 ГГц жиілік диапазонында бағытталған және бағытталмаған антенналар қолданылып, сигнал деңгейі мен деректер өткізу қабілеті әртүрлі қашықтықтарда өлшенді;

Бағытталған антенналардың интерференцияны азайту және сигнал сапасын арттырудағы артықшылықтары дәлелденді;

Көпсәулелі таралу мен қалалық ортадағы шағылу, көлеңкелену құбылыстарының байланыс сапасына әсері зерттелді;

Кедергілерді азайтудың заманауи әдістері ретінде адаптивті сәулелену (beamforming) және көпсәулелі тарату мүмкіндіктерін тиімді пайдалану (MIMO технологиясы, diversity әдістері) ұсынылды.

Алынған нәтижелер қалалық ортада антенналық жүйелерді жобалау кезінде сигнал жоғалуларын азайту және байланыс сапасын арттыру үшін маңызды бағыттарды анықтады. Сонымен қатар, эксперименттік мәліметтер теориялық модельдеу нәтижелерімен жақсы үйлесті.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Okumura Y. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service //Review of the Electrical communication Laboratory. – 1968. – Т. 16. – №. 9.
- 2 HATA M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service //IEEE Trans. Vehic. Technol. – 1996. – Т. 29. – №. 3. – С. 1272-1286.
- 3 Erceg V. Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands //IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1999. – С.
- 4 LIU W. C. et al. Theory and Implementation of a Three-Dimensional Spatial Channel Model for the 3GPP TR 36.873 Long-Term Evolution System //DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. – 2018.
- 5 Rappaport T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! //IEEE access. – 2013
- 6 Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. – John wiley & sons, 2016.
- 7 Goldsmith A. Wireless communications. – Cambridge university press, 2005.
- 8 Molisch A. F. Wireless communications. – John Wiley & Sons, 2012.
- 9 Cox D., Leck R. Correlation bandwidth and delay spread multipath propagation statistics for 910-MHz urban mobile radio channels //IEEE Transactions on Communications. – 2003.
- 10 Saunders S. R., Aragón-Zavala A. A. Antennas and propagation for wireless communication systems. – John Wiley & Sons, 2024.
- 11 Rappaport T. S. Wireless communications: principles and practice. – Cambridge University Press, 2024.
- 12 Molisch A. F. Wireless communications: from fundamentals to beyond 5G. – John Wiley & Sons, 2022.
- 13 Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. – John wiley & sons, 2016.
- 14 Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna theory and design. – John Wiley & Sons, 2012.
- 15 Goldsmith A. Wireless communications. – Cambridge university press, 2005.
- 16 Ashraf S. A. et al. Supporting Vehicle-to-Everything Services by 5G New Radio Release-16 Systems. IEEE Communications Standards Magazine, 4 (1)
- 17 Pahlavan, K., & Krishnamurthy, P. Principles of Wireless Networks: A Unified Approach. – 2nd Edition. – Pearson, 2021. – 650 бет.
- 18 Vogel, W., & Goldhirsh, J. Propagation Effects in Urban Environments. – IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, Vol. 68, Issue 3, pp. 1815–1825.
- 19 Parsons, J.D. The Mobile Radio Propagation Channel. – 3rd Edition. – Wiley, 2000. – 318 бет.
- 20 Ikegami, F., & Yoshida, T. Empirical Models for Urban Multipath Propagation. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, Vol. 71, Issue 2, pp. 231–245.

РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмыс

Жалғас Мейрамбек Абайұлы

6B06201 – Телекоммуникациялар

Тақырыбына: «Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу»

Орындалды:

- а) графикалық бөлім 15 парақ;
б) түсініктеме 54 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Берілген бітіру жұмысында қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу жолдары ұсынылды. Жұмыста нақты техникалық параметрлерге сүйене отырып, практикалық есептеулер мен теориялық талдаулар жүргізілді.

Осы жұмыста алынған нәтижелер телекоммуникациялық жүйелерді жобалау мен жаңғыртуда, сонымен қатар қалалық аймақтарда жоғары сапалы байланыс қызметтерін қамтамасыз ету үшін практикалық нұсқаулар бар.

Қалалық ортаның физикалық ерекшеліктерін (ғимарат биіктігі, тығыздығы, материалдық қасиеттері) сипатталды.

Кейбір орфографиялық қателер кездеседі.

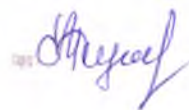
Графикалық және мәтіндік материалдар МСТҚ талабына сәйкес жазылған. Бұл дипломдық жоба жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғарғы дәрежеде жазылған, алынған нәтижелер – қауіпсіздікті пайдаланудағы бағытқа жауап береді.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

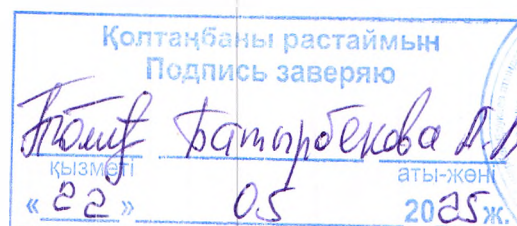
Жалпы, дипломдық жұмыс «жақсы» (85%) деп бағаланды, ал студент студент Жалғас Мейрамбек Абайұлы 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензент:

Физ.-мат.ғыл.канд., Ғ.Дәукеев ат.
АЭЖБУ профессор-оқытушысы
«20» 05 2025 ж.



М.А.Хизирова



ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Дипломдық жұмыс

Жалғас Мейрамбек Абайұлы

6B06201 – Телекоммуникациялар оқу бағдарламасы

Тақырыбы: «Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу»

Бұл дипломдық жұмыста антенналар өнімділігі, сипаттамалары көрсетілген. Негізгі сипаттамасы және болашақ ықтимал болатын түрлері келтірілген.

Бұл дипломдық жұмыста «Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу» тақырыбы қарастырылды.

Қалалық ортадағы электромагниттік кедергілердің сипаттамалары зерттелді. Антенналардың өнімділігіне әсер ететін қоршаған орта факторлары талданды. Қалалық аймақта сигналдың таралу моделін әзірленді. Кедергілердің әсерін азайтудың заманауи әдістерін зерттелді. Жаңа антенна конфигурацияларын және орналасу стратегияларын ұсынылды. MATLAB немесе басқа бағдарламаларда қала жағдайындағы антенна өнімділігінің модельдерін әзірленді.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер өте орынды.

Зерттеу барысында ғылыми зерттеулер қарастырылды.

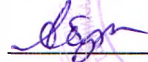
Жалпы, дипломдық жұмыс «жақсы» (85%) деп бағаланды, ал студент Жалғас Мейрамбек Абайұлы 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші

ЭТ және FT каф.

қауымдастырылған профессоры,

техника ғылымдарының кандидаты



Абдуллаев М.А.

(колы)

«20» мамыр 2025 ж.

**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: Жалғас Мейрамбек Абайұлы

Тақырыбы: Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу

Жетекшісі: Сұңғат Марксұлы

1-ұқсастық коэффициенті (30): 4.2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.7

Дәйексөз (35): 0.7

Әріптерді ауыстыру: 0

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 13

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:

2025-04-28

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жалғас Мейрамбек Абайұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 4.2

Коэффициент Подобия 2: 1.7

Микропробелы: 13

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

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:

2025-04-28

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жалғас Мейрамбек Абайұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Қалалық ортаның антенналардың өнімділігі мен байланысына әсерін зерттеу

Научный руководитель: Сұңғат Марқсұлы

Коэффициент Подобия 1: 4.2

Коэффициент Подобия 2: 1.7

Микропробелы: 13

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

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:

2025-04-28

Дата



Сұңғат Марқсұлы

проверяющий эксперт