Нуржаубаева Гульсая Сакеновна

«8D06201 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынған

«Текстиль негіздегі киетін микрожолақты антенналарды зерттеу және әзірлеу» тақырыбындағы диссертациясына

АҢДАТПА

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Қазақстанда цифрландыру және телекоммуникациялық технологияларды дамыту мемлекеттік саясаттың негізгі басымдықтарының қатарына жатады. Бұл бағыттың маңыздылығы Қазақстан Республикасы Үкіметінің цифрлық трансформацияның, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар саласы мен киберқауіпсіздікті дамытудың 2023–2029 жылдарға арналған тұжырымдамасын қабылдауынан, сондай-ақ 2026 жылдың Цифрландыру және жасанды интеллект жылы деп жариялануынан көрінеді. Цифрлық трансформация жағдайында Заттар интернеті (IoT) технологиясына ерекше мән беріледі. Қазіргі уақытта IoT өнеркәсіптік процестерді бақылау, көлік жүйелерін басқару, денсаулық сақтау, қалалық инфрақұрылым және басқа да салаларда қолданылады.

IoT технологиясының қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының бірі адам мен қоршаған ортаның параметрлерін үздіксіз бақылауға арналған киетін (body-centric) құрылғыларды дамыту болып табылады. Медицинада мұндай құрылғылар жүрек соғу жиілігі, артериялық қысым және дене температурасы сияқты физиологиялық көрсеткіштерді қашықтан бақылау үшін пайдаланылады. Спорт саласында олар адамның дене белсенділігіне қатысты параметрлерді тіркеуге мүмкіндік береді. Ақылды қала және қауіпсіздік жүйелерінде киетін құрылғылар жедел байланыс, орналасқан жерді бақылау, өнеркәсіптік және әлеуметтік қауіпсіздікті қамтамасыз ету міндеттерінде қолданылуы мүмкін.

Киетін IoT-құрылғының сымсыз байланыс сапасы мен сенімділігін анықтайтын негізгі компоненттердің бірі антенна болып табылады. Ол электрлік сигналдарды электромагниттік толқындарға түрлендіріп, қабылдау кезінде кері түрлендіруді жүзеге асырады. Осы арқылы құрылғының сыртқы желімен сымсыз байланысы қамтамасыз етіледі. Қазіргі кезде киетін IoT-шешімдерді кең көлемде енгізуге адам денесіне жақын немесе тікелей орналастыру кезінде антенна сипаттамаларының тұрақтылығын сақтау және электромагниттік қауіпсіздік талаптарын орындау мәселелері шектеу болып отыр.

Бұл мәселенің туындауына бірнеше фактор әсер етеді. Ең алдымен, антенна адам денесіне жақын орналасқан кезде сәулеленетін энергияның бір бөлігі биологиялық тіндерде жұтылады. Сондықтан меншікті жұтылу коэффициентін (МЖК) халықаралық электромагниттік қауіпсіздік талаптарында белгіленген шекті мәндермен салыстырып тексеру қажет: FCC бойынша 1 г тінге 1,6 Вт/кг,

ICNIRP бойынша 10 г тінге 2 Вт/кг. Екінші маңызды мәселе антеннаны киімге немесе аксессуарларға кіріктірумен байланысты. Мұндай жағдайда икемді текстильді материалдарды пайдалану талап етіледі. Олардың диэлектрлік өтімділігі мен диэлектрлік шығындар бұрышының тангенсі микрожолақты антенналарда кеңінен қолданылатын қатты диэлектрлік негіздердің параметрлерінен ерекшеленеді: киетін антенналарда пайдаланылатын маталардың салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі көбінесе 1,1–1,9 аралығында жатады, ал қатты негіздерде бұл мән 2,2-ден 12-ге дейін. Салыстырмалы диэлектрлік өтімділік төмен болғанда антеннаның өткізу жолағы кеңеюі мүмкін, бірақ жұмсақ мата пішінін нашар ұстайтындықтан антенна геометриясын тұрақты сақтау қиындайды.

Киетін антенналар пайдалану барысында әртүрлі механикалық әсерлерге де ұшырайды. Олардың қатарына иілу, созылу және сығылу жатады. Мұндай деформациялар антенна геометриясының өзгеруіне алып келеді. Соның салдарынан резонанстық жиілік ығысып, негізгі жұмыс сипаттамалары нашарлауы мүмкін. Бұл жұмыста деформация түрлерінің ішінен иілу зерттелді.

Әдебиеттерге жасалған талдау екі шешілмеген мәселені бөліп көрсетуге мүмкіндік береді. Біріншіден, текстильді микрожолақты антенна торлары жеткілікті кеңінен зерттелген, алайда авторлар әртүрлі конструкциялар мен өлшеу әдістемелерін қолданатындықтан, түрлі маталардың антенна сипаттамаларына әсерін бір-бірімен тікелей салыстыру мүмкін емес.

Екіншіден, күшейту коэффициенті 8-12,4 dBi болатын бағытталған Яги–Уда антенналары қатты төсеніштерде немесе резонанстық қуыстары бар металл негіздерде іске асырылған, бұл олардың киімге кіріктірілуін мүмкін етпейді, ал белгілі текстильді бағытталған антенналар 5,3-5,45 dBi-ден аспайтын күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді. Қолданыстағы шешімдер толық өлшемді Яги–Уда топологиясын, жоғары күшейту коэффициентін және толықтай текстильді орындалуды бір мезгілде үйлестірмейді.

Әзірленетін антенналардың жұмыс жиілігі ретінде 2,45 ГГц таңдалды. Бұл жиілік өнеркәсіптік, ғылыми және медициналық мақсаттарға арналған ISM диапазонына жатады. Таңдаудың негізгі себептерінің бірі осы диапазонның IoT-құрылғыларында кеңінен қолданылатын Wi-Fi, Bluetooth және Zigbee сияқты сымсыз байланыс технологияларымен үйлесімділігі болып табылады. Сонымен қатар ISM диапазоны лицензиялауды қажет етпейді. Бос кеңістікте толқын ұзындығы шамамен 122 мм, ал джинс матасындағы патчтың резонанстық ұзындығы 48 мм-ге жуық, яғни элемент киімге еркін сыяды. Жиілікті арттырған кезде антенна кішірейгенімен, дене тіндеріндегі шығын өседі. Сондықтан бұл диапазон IoT-қолданбаларының әртүрлі түрлеріне арналған киетін антенналарды жобалауда қолайлы шешім ретінде қарастырылады.

Осы диссертациялық зерттеу аталған ғылыми-техникалық мәселелерді шешуге бағытталған. Жұмыста геометриясы бірдей екі элементті сызықтық антенна торы текстильді төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің киетін

антенналар сипаттамаларына әсер ету заңдылықтарын анықтауға арналған бастапқы конструкция ретінде пайдаланылды, ал осы заңдылықтар негізінде 2,45 ГГц жиілікте жұмыс істейтін толықтай текстильді микрожолақты Яги–Уда антеннасы әзірленді. Екі антенна үшін иілудің әсері зерттелді (тор үшін – прототипте, Яги–Уда антеннасы үшін – модельдеу арқылы), денеге жақын орналасқандағы МЖК мәндері есептеліп, FCC және ICNIRP шектерімен салыстырылды.

Зерттеу жұмысының мақсаты

Жұмыстың мақсаты – 2,45 ГГц жиіліктегі текстиль негіздегі киетін микрожолақты антенналарды әзірлей отырып, төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің антенна параметрлеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау.

Зерттеудің міндеттері

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер белгіленді:

1. Киетін микрожолақты антенналарды әзірлеу әдістерін талдау және анықтау.
2. Екі элементті антенна торын әзірлеу арқылы текстильді төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің антенна параметрлеріне әсер ету заңдылықтарын анықтау.
3. Текстильді төсеніштердегі Яги–Уда антеннасын әзірлеу және оңтайландыру.
4. Әзірленген антенналардың механикалық деформацияларға төзімділігін зерттеу және олардың электромагниттік қауіпсіздігін бағалау.
5. Әзірленген киетін антенналардың екі топологиясының электродинамикалық сипаттамаларын зерттеу және салыстырмалы түрде бағалау.

Зерттеу объектісі мен пәні

Зерттеу объектісі – текстильді төсеніштегі киетін микрожолақты антенналар.

Зерттеу пәні – антеннаның геометриялық параметрлерінің, төсеніштің электрофизикалық қасиеттерінің, иілудің және адам денесінің әсер ету факторларының антеннаның электродинамикалық сипаттамалары мен МЖК-ға әсер ету заңдылықтары.

Зерттеу әдістері

Қойылған міндеттерді шешу үшін келесі әдістер қолданылды:

– микрожолақты антенналар мен антенна торлары теориясы негізінде сәулелендіргіштердің, қоректендіру тізбегінің және сәйкестендірудің геометриясын аналитикалық есептеу;

– CST Studio Suite 2024 бағдарламасында параметрлік оңтайландырумен толықтолқынды сандық модельдеу;

– фетр, джинс матасы, полиэстер және мақта мата төсеніштерінде ток өткізгіш мата мен мыс таспадан жасалған өткізгіш қабаттары бар прототиптер дайындау;

– прототиптердің S_{11} коэффициентін NanoVNA 2024 векторлық тізбек анализаторымен өлшеу; диаграмма бағыттылығы, күшейту коэффициенті мен радиациялық тиімділік тек модельдеу арқылы анықталды;

– радиусы 55–90 мм цилиндрлік беттерде иілудің резонанстық жиілікке, сәйкестендіруге және диаграмма бағыттылығына әсерін модельдеу және S_{11} бойынша эксперимент арқылы тексеру;

– CST жүйесінде адам денесінің воксельдік моделінде меншікті жұтылу коэффициентін сандық модельдеу және оның ICNIRP мен FCC нормаларына сәйкестігін тексеру арқылы антеннаның электромагниттік қауіпсіздікті бағалау.

Жүргізілген зерттеулердің ғылыми жаңалығы

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы келесі нәтижелерден тұрады:

1. Әртүрлі текстильді материалдардағы екі элементті антенна торы мен Яги–Уда антеннасын зерттеу негізінде текстильді төсеніштердің электрофизикалық қасиеттерінің киетін микрожолақты антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары анықталды.

2. Алғаш рет барлық элементтері текстильді төсеніш қабатында орналасқан, кең сәулелену мен жоғары күшейту коэффициентін қамтамасыз ететін, киетін микрожолақты Яги–Уда антеннасының топологиясы ұсынылды.

Қорғауға шығарылатын негізгі қағидалар

Қорғауға келесі негізгі қағидалар ұсынылады:

1-қағида. Текстильді төсеніштегі екі элементті антенна торының күшейту коэффициенті мен радиациялық тиімділігі (ПӘК) өткізгіш қабат материалына емес, төсеніш қабат материалына тәуелді, сондықтан өткізгіш материалдарды өзара алмастырғанда антеннаның сәулелену сипаттамалары сақталады.

2-қағида. Барлық элементтері текстильді төсеніш қабатында орналастырылған, көпқабатты құрылымдарсыз және өтпелі тесіктерсіз әзірленген Яги–Уда антеннасының ұсынылған топологиясы иілгіштік қасиетін сақтай отырып, 2,45 ГГц ISM диапазонында 8,3–8,7 dBi күшейту коэффициентін қамтамасыз етеді.

3-қағида. Текстильді төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігінің киетін микрожолақты антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылығы топологияға тәуелсіз: ε_r 1,45-тен 1,9-ға дейін артқанда екі элементті торда да, Яги–Уда антеннасында да бағыттылық пен күшейту коэффициенті төмендеп, бағытталу диаграммасының негізгі жапырақшасы кеңейеді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы

Жұмыстың практикалық маңыздылығы анықталған текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттерінің антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары киетін антенналардың төсеніш материалы мен геометриясын негізді таңдауға мүмкіндік беретіндігімен айқындалады. Күшейту коэффициенті 8,3–8,7 dBi болатын әзірленген текстильді Яги–Уда антеннасы қауіпсіздік және құтқару қызметтерінің радиобайланыс құрылғыларында, сондай-ақ медициналық және спорттық мониторингке, ақылды қала жүйелеріне арналған киетін IoT-құрылғыларында қолданылуы мүмкін. Бұл зерттеу жұмыстары нәтижелерінің енгізілгені 9 қыркүйек 2025 жылғы Малайзиялық теңіз инженерлік технологиялар институты (UniKL MIMET, Лумут қ., Малайзия) тарапынан берілген ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерін енгізу актісімен расталады. Аталған актіге сәйкес микрожолақты антенналардың күшейту коэффициентін арттырудағы ғылыми нәтижелері мен техникалық шешімдері осы институттың оқу үдерісіне енгізіліп, дәрістер мен зертханалық жұмыстарында пайдаланылады. Диссертациялық жұмыстың нәтижелері одан әрі де электроника тақырыбы бойынша тиісті ғылыми жобалар шеңберінде пайдаланылуы мүмкін.

Ғылымның даму бағыттары мен мемлекеттік бағдарламаларға сәйкестігі

Жұмыс Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2023 жылғы 28 наурыздағы № 269 қаулысымен бекітілген цифрлық трансформацияның, ақпараттық-коммуникациялық технологиялар саласы мен киберқауіпсіздікті дамытудың 2023–2029 жылдарға арналған тұжырымдамасында айқындалған Қазақстан Республикасының цифрландыру саласындағы мемлекеттік саясатының басымдықтарына сәйкес келеді.

Алынған нәтижелердің дұрыстығы

Алынған нәтижелердің дұрыстығы микрожолақты антенналар теориясының классикалық аналитикалық қатынастарын қолданумен, тор жинақтылығын бақылай отырып апробацияланған CST Studio Suite кешенінде модельдеумен, физикалық прототиптерді дайындаумен және олардың шағылу коэффициентін векторлық тізбек анализаторымен өлшеумен, сондай-ақ нәтижелердің рецензияланатын басылымдарда жариялануымен қамтамасыз етіледі.

Ғылыми нәтижелерді алудағы автордың жеке үлесі

Диссертацияда ұсынылған барлық түпнұсқалық нәтижелер, оның ішінде антенналардың геометриялық параметрлерін есептеу, CST Studio Suite бағдарламалық кешенінде электродинамикалық модельдеу, прототиптерді дайындау, эксперименттік өлшеулер жүргізу және алынған нәтижелерге салыстырмалы талдау жасау автордың өзі немесе өзінің тікелей қатысуымен жүзеге асырылды.

Жұмысты сынақтан өткізу

Диссертацияда ұсынылған зерттеудің негізгі нәтижелері мен әдістерін қамтитын «A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications» баяндамасы «Энергетика, инфокоммуникациялық технологиялар және жоғары білім» XII Халықаралық ғылыми-техникалық конференциясында (Алматы қ., 2022 ж., 20-21 қазан), «Comparative Study of Textile Based Wearable Antenna Designs for IoT Applications» баяндамасы IEEE SIST (Астана қ., 2026 ж.) халықаралық конференциясында баяндалды.

Жарияланымдар

Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері келесі ғылыми басылымдарда жарияланды: «Аналитический обзор многослойной микрополосковой антенны Яги-Уда для приложений Интернета вещей (IoT)» шолу мақаласы «Научные труды ВИИРЭиС» журналында (2022); «A review of the multilayered microstrip antennas for IoT applications» мақаласы XII Халықаралық ғылыми-техникалық конференция материалдарында (2022); «Characterization of high impedance of multilayer coplanar waveguide transmission line design for integration with nanodevices» мақаласы Eastern-European Journal of Enterprise Technologies журналында (2022); «Evaluation of high frequency behavior of the coplanar waveguide transmission line for integration with self-switching nanodevice» мақаласы «Вестник Алматинского университета энергетики и связи» журналында (2022); «Design of the Wearable Microstrip Yagi-Uda Antenna for IoT Applications» мақаласы International Journal on Communications Antenna and Propagation, IRECAP журналында (2024); «The Development and analysis of a wearable textile Yagi-Uda antenna design for security and rescue purposes» мақаласы ҚР ҰҒА басылымдарында (2024); «Comparative Study of Textile Based Wearable Antenna Designs for IoT Applications» мақаласы IEEE SIST конференциясының материалдарында (2026); «Интеллектуальные телекоммуникационные решения для сетей 5G/6G и Smart City в условиях ультраплотной городской среды» ұжымдық монографиясы (Алдашева Л.С., Амирова А.С., Тусупов А.Д., Нуржаубаева Г.С., Әбдіраман Ә.С., «Дарын» баспасы, Алматы, 2026); «Performance Evaluation of Wearable Antenna Arrays for IoT Applications in Smart City» мақаласы International Journal of Antennas and Propagation журналында (2026); «Wearable Microstrip Antennas for IoT: A Comprehensive Review of Application Areas, Textile Materials, and Body-Centric Design Techniques» шолу мақаласы «Вестник Алматинского университета энергетики и связи» журналында (2026). Жарияланымдар Scopus дерекқорында индекстелетін (процентильдері 47-63%) басылымдардағы, сондай-ақ Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті (ҒЖБССҚК) ұсынған басылымдардағы еңбектерді қамтиды. Диссертация тақырыбы және сабақтас мәселелер бойынша барлығы 10 ғылыми еңбек жарияланды, соның ішінде Scopus

дерекқорында индекстелетін басылымдарда 3 мақала, ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда 4 мақала, халықаралық конференциялар материалдарында 2 баяндама және 1 ұжымдық монография жарық көрді.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі

Диссертация кіріспеден, бес тараудан, қорытындыдан, ғылыми еңбектер тізімінен және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшадан тұрады. Жұмыстың көлемі 109 бет, оның ішінде 42 сурет, 13 кесте, пайдаланылған әдебиеттер тізімінде 123 атау бар.

Кіріспеде зерттеу тақырыбының өзектілігі негізделіп, жұмыстың мақсаты мен міндеттері айқындалған. Зерттеу объектісі мен пәні анықталған, ғылыми жаңалығы, қорғауға ұсынылатын қағидалар айқындалған, автордың жеке үлесі, жұмысты сынақтан өткізу, практикалық маңыздылығы және жарияланымдары туралы мәліметтер қамтылған.

Бірінші тарауда текстильді материалдардың электрофизикалық қасиеттері, IoT технологияларына арналған киетін микрожолақты антенналардың негізгі қолданылу салалары сипатталып, әдеби деректер негізінде текстильді материалдардың түрлері мен оларды дайындау технологияларына шолу жасалды. Зерттеу барысында пайдаланылған текстильді және өткізгіш материалдардың электрофизикалық қасиеттері талданып, олардың антеннаның электродинамикалық сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары қарастырылды. Сонымен қатар, IoT жүйелеріне арналған қолданыстағы киетін антенналарға шолу жүргізіліп, зерттеуде қолданылатын антенна топологияларының таңдалуы негізделді.

Екінші тарауда антенналарды жобалаудың жалпы әдістемесі баяндалды. Сәулелендіргіш элементтерді қоректендіру тәсілін таңдау негізделіп, сәулелендіргіш пен қоректендіру желісінің геометриялық параметрлерін есептеуге арналған аналитикалық қатынастар келтірілді. Антенна сипаттамаларын бағалаудың сандық өлшемшарттары (шағылу коэффициенті, кернеу бойынша тұрақты толқын коэффициенті және сәулелену тиімділігі) тұжырымдалды. Сондай-ақ CST Studio Suite бағдарламалық кешенінде антенна конструкциясын жобалау мен параметрлік оңтайландырудың жалпыланған алгоритмі ұсынылды.

Үшінші тарауда текстильді төсеніш негізіндегі екі элементті сызықтық антенна торын әзірлеу және оңтайландыру нәтижелері қарастырылады. Алдымен тордың негізгі геометриялық параметрлері есептеледі. Одан кейін CST Studio Suite ортасында үш текстильді төсеніш (фетр, джинс матасы, полиэстер) пен екі өткізгіш материалдың (ток өткізгіш мата, мыс таспа) үйлесімдерінен құралған алты конфигурацияға электродинамикалық модельдеу мен параметрлік оңтайландыру жүргізіледі. Модельдеу нәтижелері NanoVNA векторлық тізбек анализаторымен өлшенген S_{11} мәндерімен салыстырылады. Бұдан бөлек, тордың 55–90 мм радиустармен иілгендегі сипаттамалары зерттеліп, адам денесінің

воксельдік моделінде меншікті жұтылу коэффициенті есептеледі. Алты конфигурацияны зерттеу нәтижесінде текстильді материалдар қасиеттерінің антенна сипаттамаларына әсер ету заңдылықтары анықталады.

Төртінші тарауда анықталған заңдылықтар ескеріліп, толықтай текстильді төсеніште орындалған микрожолақты Яги–Уда антеннасын әзірлеу және оңтайландыру нәтижелері келтіріледі. Белсенді элементтің, рефлектор мен директорлардың геометриялық параметрлері анықталып, CST Studio Suite ортасында үш төсеніштегі (полиэстер, джинс матасы, мақта мата) конфигурацияларға электродинамикалық модельдеу жүргізіледі. Есептік нәтижелер S_{11} бойынша өлшеу деректерімен тексеріледі. Антеннаның иілуге төзімділігі мен адам денесінің воксельдік моделіндегі меншікті жұтылу коэффициенті үшінші тараудағы әдістемемен бағаланады.

Бесінші тарауда бастапқы екі элементті сызықтық антенна торы мен анықталған заңдылықтар ескеріліп әзірленген Яги–Уда антеннасының электродинамикалық сипаттамаларына салыстырмалы талдау жүргізіледі. Төсеніштің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі 1,45-тен 1,9-ға дейін артқанда екі топологияда да бағыттылық пен күшейту коэффициенті төмендеп, негізгі жапырақша кеңейетіні, яғни төсеніштің әсер ету заңдылығы топологияға тәуелсіз екені көрсетілді.

Қорытынды бөлімде диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері жинақталып, зерттеу мақсатына қол жеткізілгені көрсетіледі. Қойылған міндеттердің шешілу нәтижелері қорытындыланып, жұмыстың негізгі ғылыми және практикалық нәтижелері тұжырымдалады. Сонымен бірге IoT-қосымшаларына арналған текстильді антенналарды одан әрі зерттеу мен жетілдірудің перспективалық бағыттары белгіленеді.

Қосымшада Малайзиялық теңіз инженерлік технологиялар институты (UniKL MIMET) берген ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерін енгізу актісі келтірілген.