«8D06201 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға арналған диссертациялық жұмысқа (мақалалар сериясы)

АҢДАТПА

ЖОЛАМАНОВ БАТЫРБЕК НҰРЫЛЛАҰЛЫ

СЫМСЫЗ СЕНСОРЛЫҚ ЖЕЛІЛЕРДЕ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУМЕН ТҮЙІНДЕРДІ ЛОКАЛИЗАЦИЯЛАУ ДӘЛДІГІН ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕРДІ ЖІБЕРУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Жұмыстың жалпы сипаттамасы

Диссертациялық жұмыс (мақалалар сериясы) Long Range (LoRa) технологиясына негізделген сымсыз сенсорлық желілерде (ССЖ) түйіндерді локализациялау дәлдігін машиналық оқыту мен сандық модельдеу әдістерін пайдалану арқылы арттыруға, сондай-ақ Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) желілерінде түйіндердің жоғары тығыздығы жағдайында жіберу параметрлерін оңтайландыру үшін күшейтілген оқыту әдістерін қолдану арқылы деректерді жіберу тиімділігін жоғарылатуға бағытталған.

Тақырыптың өзектілігі

Қазіргі уақытта Заттар интернеті (Internet of Things, IoT), «Ақылды қалалар» және «Ақылды ғимараттар» технологияларының дамуы сымсыз сенсорлық желілердің (ССЖ) кеңінен енгізілуіне алып келуде. Мұндай желілер нақты уақыт режимінде объектілерді мониторингтеу, бақылау және басқару үшін қолданылады. ССЖ-нің тиімді жұмыс істеуі көптеген факторларға тәуелді, олардың ішінде сенсорлық түйіндерді локализациялау дәлдігі, деректерді жіберудің сенімділігі және құрылғылардың энергия тиімділігі ерекше маңызды болып табылады. Бұл факторлар өнеркәсіп, көлік, медицина, логистика және «ақылды ғимарат» инфрақұрылымы сияқты салаларда мониторинг пен басқару жүйелерінің сапасына тікелей әсер етеді.

ССЖ саласындағы ең күрделі әрі сұранысқа ие міндеттердің бірі - ғимараттардағы түйіндердің орналасуын анықтау. Қолданыстағы дәстүрлі локализациялау тәсілдерінің айтарлықтай шектеулері бар. Сигналдың уақыттық және бұрыштық сипаттамаларына негізделген геометриялық әдістер қымбат жабдықты, күрделі синхрондауды және жоғары дәлдіктегі өлшеу жүйелерін талап етеді, бұл оларды ауқымды жобаларда пайдалануды қиындатады. Сонымен қатар, ашық кеңістікте кеңінен қолданылатын GPS сияқты спутниктік навигациялық жүйелер ғимарат ішінде тиімсіз, өйткені сигналдар қабырғалар, кедергілер және инженерлік конструкциялардан өту кезінде қатты әлсірейді. Соның салдарынан координаталарды анықтау мүмкін болмайды немесе едәуір қателікпен орындалады. Ал Received Signal Strength Indicator (RSSI) деңгейіне негізделген fingerprint әдісі дәстүрлі әдіске қарағанда практикалық және дәлірек тәсіл болып табылады. Бұл әдіс нақты орта жағдайларын: бөлменің жоспарлануын, құрылыс материалдарын,

кедергілерді ескеретін эксперименттік радиокарталарға сүйенеді. Осы ерекшеліктер арқасында аталған әдіс локализация дәлдігін айтарлықтай арттырады. Дегенмен, fingerprint әдісін қолдану радиокарталарды құрудың жоғары еңбек сыйымдылығымен, деректерді үнемі жаңартып отыру қажеттілігімен және ортадағы өзгерістерге сезімталдықпен байланысты. Бұл мәселелер оның масштабталуын және әмбебаптығын шектейді. Осыған байланысты, локализация дәлдігін арттырумен қатар деректер жинау шығындарын азайтатын жаңа тәсілдер әзірлеу қажеттілігі туындайды.

LoRaWAN желілерінде деректерді жіберудің энергия тиімділігі мен желі тұрақтылығын арттыру мәселесі де ерекше маңызды болып табылады, себебі LoRaWAN желісі соңғы жылдары ірі масштабтағы сенсорлық жүйелерді құруға арналған ең перспективалы технологиялардың бірі ретінде қарастырылуда. Алайда қалалық орта жағдайларында тығыз құрылыс, кедергілер және түйіндердің санының көптігі стандартты адаптивті деректер жіберу механизмінің (Adaptive Data Rate, ADR) тиімділігін төмендетеді. Бұл пакеттерді жеткізу коэффициентінің төмендеуіне, деректердің жоғалу ықтималдығының артуына және қайталап деректер жіберулер салдарынан энергия тұтынудың өсуіне алып келеді. Соның нәтижесінде желінің сенімділігі ғана емес, оның масштабталуы да нашарлайды, өйткені құрылғылар саны артқан сайын желінің өнімділігі айтарлықтай төмендейді. Осыған байланысты нақты қалалық инфрақұрылым жағдайларында LoRaWAN желілерінің тұрақтылығын және энергия тиімділігін арттыру үшін жіберу параметрлерін оңтайландырудың жетілдірілген әдістерін енгізудің практикалық қажеттілігі туындайды.

Осылайша, зерттеудің өзектілігі ішкі кеңістікте түйіндердің локализациялау дәлдігін арттыруға және қалалық орта жағдайында ССЖ-де деректерді жіберу тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік беретін машиналық оқыту, сандық модельдеу және күшейтілген оқыту алгоритмдерін біріктіретін жаңа тәсілдерді әзірлеу қажеттілігімен анықталады. Бұл міндеттерді шешу IoT технологияларының, «ақылды қалалардың» және заманауи телекоммуникациялық жүйелердің одан әрі дамуы үшін өте маңызды.

Зерттеу мақсаты. LoRaWAN желісінде машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы локализация дәлдігін арттыру және оптималды жіберу параметрлерін таңдауға негізделген күшейтілген оқыту алгоритмдері арқылы деректерді жіберу тиімділігін жоғарылату.

Жұмыстың мақсатына жету үшін келесідей негізгі мәселелерді шешу қажет:

- сигналдың таралуын модельдеу және сандық модельдеу нәтижесінде алынған параметрлердің радиокарта моделінің дәлдігіне әсерін зерттеу;
- жаңа бөлмеде эксперименттік деректер көлемін азайта отырып, RSSI радиокартасын құру үшін трансферлік оқыту әдісін қолдануды зерттеу және осы тәсілдің локализация дәлдігіне әсерін бағалау;
- LoRaWAN желілеріндегі күшейтілген оқыту алгоритмдері негізінде оптималды жіберу параметрлерін таңдау әдістерін зерттеу және олардың тиімділігін пакеттерді жеткізу коэффициенті мен энергия тұтыну

көрсеткіштері бойынша басқа күшейтілген оқыту алгоритмдерімен және стандартты ADR механизмімен салыстыру.

Зерттеу әдістері:

- COMSOL Multiphysics ортасында сигналдың таралуын модельдеу, модельдеу нәтижесінде алынған параметрлерді талдау және олардың радиокарта құрастыру моделі дәлдігіне әсерін бағалау;
- Python ортасында радиокарталарды құру және түйіндердің орналасуын анықтау үшін машиналық оқыту әдістерін (GRU, LSTM, RBFN, XGBoost және 1D CNN) және трансферлік оқытуды қолдану;
- NS-3 ортасында LoRaWAN жұмысын имитациялық модельдеу, жіберу параметрлерін оңтайландыру үшін күшейтілген оқыту алгоритмдерін қолдану және олардың тиімділігін стандартты ADR механизмдерімен және күшейтілген оқытудың басқа алгоритмдерімен салыстыру.

Зерттеу нысаны. LoRa технологиясына негізделген сымсыз сенсорлық желілер.

Зерттеу пәні. LoRa түйіндерін локализациялау дәлдігі, машиналық оқыту әдістері, күшейтілген оқыту алгоритмдері, сымсыз сенсорлық желілердегі деректерді жіберу тиімділігі және LoRaWAN желісіндегі жіберу параметрлері.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы бұл еңбекте алғаш рет:

1. жіберуші және қабылдаушы құрылғылар арасындағы есептелген қашықтық параметрін пайдалану тек RSSI деректеріне негізделген модельдермен салыстырғанда LoRa-түйіндерінің радиокартасын құру дәлдігін арттыратыны анықталды;
2. деректер көлемі қысқартылған жағдайда локализация дәлдігін айтарлықтай төмендетпей, RSSI радиокартасын қалыптастыру үшін трансферлік оқыту әдісі қолданылды;
3. LoRaWAN желісінде пакет жеткізу коэффициентін арттыру мақсатында жіберу параметрлерін оңтайлы таңдауға арналған Double Deep Q-Network with Prioritized Experience Replay (DDQN-PER) күшейтілген оқыту алгоритмі қолданылды.

Қорғауға ұсынылған ғылыми тұжырымдар:

1. Сигналдың таралуын модельдеу негізінде алынған таратқыш пен қабылдағыш арасындағы есептелген қашықтықты радиокарта құрастыру үшін машиналық оқытуда пайдалану модельдің дәлдігін 3,7%-ға арттырады.
2. Трансферлік оқыту әдісі эксперименттік деректердің небәрі 20%-ын пайдалана отырып, толық RSSI радиокартасын қалыптастырады және локализация дәлдігін 91%-дан жоғары деңгейде сақтайды.
3. LoRaWAN-да оптималды жіберу параметрлерін таңдауға арналған Double Deep Q-Network with Prioritized Experience Replay (DDQN-PER) алгоритмі стандартты Adaptive Data Rate (ADR) механизмімен салыстырғанда пакеттердің жеткізу коэффициентін 17,2%-ға арттырады.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңызы. Зерттеу нәтижелері заманауи IoT-шешімдерінде ғимараттардағы позициялау жүйелерін және сымсыз сенсорлық желілерді жобалау мен енгізу барысында

қолданылуы мүмкін. Трансферлік оқытуды пайдалана отырып радиокарталарды құруға ұсынылған тәсілдер деректер жинау еңбек сыйымдылығын едәуір азайтып, локализациялау жүйелерінің ғимарат ерекшеліктеріне тәуелділігін төмендетеді, бұл технологияларды жаңа ғимараттар мен инфрақұрылымдық нысандарға оңай бейімдеуге және масштабтауға мүмкіндік береді. Күшейтілген оқытуға негізделген LoRaWAN жіберу параметрлерін оңтайландыру алгоритмі түйіндердің жоғары тығыздығы жағдайында желінің тұрақтылығын арттырып, пакет жоғалту санын және құрылғылардың энергия тұтынуын төмендетеді. Алынған нәтижелер интеллектуалды ғимараттарды басқару жүйелерін, өнеркәсіптік мониторинг платформаларын және логистикалық шешімдерді әзірлеуде сұранысқа ие болуы мүмкін, сондай-ақ сенсорлық құрылғылардың қызмет ету мерзімін ұзартуға және эксплуатациялық шығындарды азайтуға ықпал етеді.

Алынған нәтижелердің сенімділігі мен негізділігі. Алынған нәтижелердің сенімділігі жоғары импакт-факторғы бар халықаралық дерекқорларда индекстелетін шетелдік ғылыми журналдардағы жарияланымдар арқылы расталған.

Автордың жеке үлесі. Зерттеу міндеттерін қою, әдістемелік тәсілдерді түзету және ғылыми нәтижелерді талқылау ғылыми жетекшілермен бірлесіп жүзеге асырылды. Автор RSSI негізінде радиокарталарды әзірлеу және модельдеуді, трансферлік оқыту тәсілін іске асыруды, сондай-ақ COMSOL Multiphysics ортасында сигналдың таралуын сандық модельдеуді қоса алғанда, зерттеудің барлық кезеңдерін өз бетінше орындады. Деректерді өңдеу және локализация дәлдігін бағалауға арналған машиналық оқыту алгоритмдерін Python ортасында жүзеге асыру автор тарапынан орындалды. Түйіндердің жоғары тығыздығы жағдайында LoRaWAN желісінің жұмысын имитациялық модельдеу NS-3 ортасында жүргізілді, ал жіберу параметрлерін оңтайландыру үшін күшейтілген оқыту алгоритмі қолданылды. Автор алынған нәтижелерді талдап, оларды қолданыстағы әдістермен салыстырды және тиісті қорытындыларды дайындады.

Жұмыстың апробациясы. Диссертациялық жұмыстың (мақалалар сериясы) нәтижелері төмендегі басылымдарда жарияланған:

Web of Science және Scopus халықаралық ғылыми деректер базасына кіретін басылымдарда жарияланған мақалалар:

1. **Zholamanov B.,** Saymbetov A., Nurgaliyev M., Orynbassar S., Dosymbetova G., Kapparova A., Kuttybay N., Koshkarbay N., Yershov E., Bolatbek A., Kopbay K. Indoor localization of LoRa wireless modules based on RSSI fingerprint method using transfer learning // Results in Engineering – 2025. – Т. 28. – С. 108383. **Web of Science: Impact Factor 7.9, Q1. Scopus: CiteScore 8.2, Процентиль 86%.** https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108383
2. **Zholamanov B.,** Bolatbek A., Saymbetov A., Nurgaliyev M., Yershov E., Kopbay K., Orynbassar S., Dosymbetova G., Kapparova A., Kuttybay N., Koshkarbay N. Enhanced Reinforcement Learning Algorithm Based-Transmission Parameter Selection for Optimization of Energy Consumption and Packet Delivery Ratio in LoRa Wireless Networks // Journal of Sensor and Actuator Networks. –

2024. – Т. 13. – № 6. – С. 89. **Web of Science: Impact Factor 4.2, Q2; Scopus: CiteScore 9.7, Процентиль 95%.** https://doi.org/10.3390/jsan13060089

3. **Zholamanov B.,** Saymbetov A., Nurgaliyev M., Bolatbek A., Dosymbetova G., Kuttybay N., Orynbassar S., Kapparova A., Koshkarbay N., Beyca Ö. F. RSSI Fingerprint-Based Indoor Localization Solutions Using Machine Learning Algorithms: A Comprehensive Review // Smart Cities. – 2025. – Т. 8. – № 5. – С. 153. **Web of Science: Impact Factor 5.5, Q1. Scopus: CiteScore 14.7, Процентиль 95%.** https://doi.org/10.3390/smartcities8050153

ҚР Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда жарияланған мақалалар:

1. Bolatbek A.B., **Zholamanov B.N.,** Nurgaliyev M.K., Saymbetov A.K., Abzhanova G.M. Energy efficient algorithm for transmission parameter selection in LoRa wireless networks // Bulletin of D. Serikbayev EKTU. – 2025. – Т. 1. – №3. – С. 157. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_3_157

Авторлық куәлік:

Жоламанов Б.Н., Саймбетов А.К., Нұрғалиев М.К., Болатбек А.Б. Система внутреннего позиционирования LoRa-узлов на основе метода отпечатка пальцев RSSI с использованием трансферного обучения. Республики Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», 2025 г., Свидетельство об авторском праве № 64965 от «4» декабря 2025 года.

Тақырыптың ғылыми-зерттеу жұмыстарының жоспарымен және әртүрлі мемлекеттік бағдарламалармен байланысы

Диссертациялық жұмыс (мақалалар сериясы) ЖТН AP19678552 «Ашық және жабық кеңістіктегі жылжымалы және статикалық сымсыз сенсорлық түйіндердің энергия тиімділігін арттыру» (2023-2025 жж.) ғылыми-зерттеу жобасының жоспарына сәйкес орындалды.