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

АҢДАТПА

БОЛАТБЕК АСХАТ БАУЫРЖАНҰЛЫ

АШЫҚ ЖӘНЕ ЖАБЫҚ КЕҢІСТІКТЕГІ СЫМСЫЗ СЕНСОРЛЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІҢ МОБИЛЬДІ ТҮЙІНДЕРІНІҢ ОРНЫН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН ЖҮЙЕ

Жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс ашық және жабық кеңістіктегі сымсыз сенсорлық желілердің (ССЖ) мобильді түйіндерінің орнын болжау дәлдігін арттыруға арналған. Зерттеу барысында ғимарат ішінде RSSI деректерін секторға бөлу арқылы машиналық оқыту, локалды салмақталған регрессия (Locally Weighted Regression, LWR) негізінде радиокартаны қалпына келтіру, сондай-ақ ашық кеңістіктегі Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) желілері үшін салмақталған центроидтық локализацияны (Weighted Centroid Localization, WCL) машиналық оқытумен толықтырылған гибридті локализациялау әдістері ұсынылды.

Зерттеудің өзектілігі.

Қазіргі уақытта заттар интернеті, ақылды ғимараттар, ақылды қала жүйелері, өнеркәсіптік мониторинг және мобильді робототехника салаларының дамуына байланысты сымсыз сенсорлық желілерде түйіндердің орнын дәл анықтау мәселесі ерекше маңызға ие болуда. Сенсорлық деректердің құндылығы көп жағдайда олардың нақты кеңістіктік орнына тәуелді болғандықтан, локализациялау сапасын бақылау, навигация, қауіпсіздік және ресурстарды басқару тиімділігіне тікелей әсер етеді. Сондықтан ашық және жабық кеңістіктегі сымсыз түйіндердің орнын болжау дәлдігін арттыру ғылыми және қолданбалы тұрғыдан өзекті міндет болып табылады.

Жабық кеңістікте сигналдың көпсәулелі таралуына, кедергілердің әсеріне және қабылданған сигнал қуаты көрсеткішінің (Received Signal Strength Indicator, RSSI) тұрақты болмауына байланысты күрделене түседі. Мұндай жағдайда қабылданған сигнал деңгейіне негізделген локализациялау әдістері кеңінен қолданылғанымен, олар үшін үлкен көлемдегі өлшеу деректерін жинау және радиокарта құру едәуір еңбек пен уақытты талап етеді. Сонымен қатар дайын модельдердің жаңа траекториялар мен өзгермелі орта жағдайларына бейімделуі әрдайым жоғары бола бермейді. Сонымен қатар өлшеу көлемін азайтатын, радиокартаны шектеулі деректер бойынша қалпына келтіруге мүмкіндік беретін және кеңістіктік ерекшеліктерді ескеретін әдістерді әзірлеу де маңызды мәселе болып саналады. Осыған байланысты деректерді тиімді өңдеу, радиокартаны шектеулі өлшеулер арқылы қалпына

келтіру және локализация дәлдігін арттыратын жаңа әдістерді әзірлеу маңызды болып саналады.

Ашық кеңістіктегі LoRaWAN желілерінде де ұқсас қиындықтар байқалады. Бұл технология кең қамту аймағын және төмен энергия тұтынуды қамтамасыз етеді, алайда қалалық ортадағы тікелей көріну аймағы болмайтын (Non Line Of Sight, NLoS) жағдайлар, шлюздердің әркелкі орналасуы ССЖ түйіндерінің орнын болжау дәлдігін шектейді. Бұдан бөлек, нақты желілік инфрақұрылымда хабарламалардың әртүрлі шлюздермен қабылдануы және RSSI орта жағдайына тәуелді болуы түйіндерді болжау әдістерінің дәлдігіне әсер етеді. Сол себепті машиналық оқыту әдістерімен біріккен гибридті әдістер ерекше қызығушылық тудырады. Мұндай біріктіру бастапқы координаталық бағалауды нақтылауға, күрделі таралу жағдайларындағы қателікті азайтуға және модельдің жалпылау қабілетін жақсартуға мүмкіндік береді.

Осылайша, диссертациялық жұмыста ұсынылған ашық және жабық кеңістіктегі локализация дәлдігін арттыруға бағытталған әдістер ғылыми жаңалығы бар және практикалық маңызы жоғары зерттеу бағыты болып табылады.

Зерттеудің мақсаты. Ашық және жабық кеңістіктегі сымсыз сенсорлық мобильді түйіндердің орнын болжау дәлдігін арттыру және ғимарат ішінде шектеулі өлшеулер арқылы радиокартаны қалпына келтіру кезінде RSSI орташа қателігін төмендету.

Зерттеудің міндеттері. Жұмыстың мақсатына жету үшін келесі міндеттер орындалу қажет:

• LoRaWAN сымсыз сенсорлық желілерінде жабық кеңістіктегі мобильді түйіндердің орнын анықтау дәлдігін RSSI деректерін алдын ала өңдеу, секторизация және машиналық оқыту модельдерін пайдалану арқылы арттыру;

• жабық кеңістікте шектеулі өлшеулер мен локалды салмақталған регрессия әдісін пайдалану арқылы радиокартаны құру кезіндегі RSSI қалпына келтірудің орташа қателігін төмендету, сондай-ақ радиокартаны қалпына келтірудің басқа алгоритмдерімен салыстыру;

• ашық кеңістіктегі LoRaWAN түйіндерінің орнын анықтау қателігін салмақталған центроидты локализация әдісі және машиналық оқыту модельдерін пайдалану арқылы азайту.

Зерттеу әдістері:

• RSSI деректерін алдын ала өңдеу, секторизация және Python ортасында kNN, SVR, GRU, RF және MLP машиналық оқыту модельдерін құру арқылы жабық кеңістіктегі мобильді түйіндердің орнын анықтау;

• жабық кеңістікте шектеулі RSSI өлшеулері негізінде радиокартаны қалпына келтіру әдістері, соның ішінде интерполяция, локалды салмақталған регрессия және басқа әдістер, сондай-ақ олардың тиімділігін салыстырмалы талдау;

• ашық кеңістіктегі LoRaWAN түйіндерінің орнын анықтау әдістері,

соның ішінде салмақталған центроидты локализация және Python ортасында MLP, XGBoost, LightGBM және kNN машиналық оқыту модельдері.

Зерттеудің нысаны. LoRa және ZigBee технологияларына негізделген сымсыз сенсорлық желілер.

Зерттеудің пәні. Радиокартаны қалпына келтіру әдістері, машиналық оқыту негізінде мобильді түйіндердің орнын болжау әдістері, сондай-ақ ашық кеңістіктегі LoRaWAN желілерінде локализация дәлдігін арттыруға арналған гибридті модельдер.

Ғылыми жаңалығы мен ерекшелігі. Алғаш рет:

• жабық кеңістіктегі LoRaWAN сымсыз сенсорлық желілерінде мобильді түйіндердің орнын болжау дәлдігін арттыру мақсатында RSSI деректерін алдын ала өңдеуге арналған секторизация әдісі машиналық оқыту модельдерімен бірге қолданылды.

• жабық кеңістікте шектеулі өлшеулер негізінде радиокартаны қалпына келтіру кезінде локалды салмақталған регрессия (Locally Weighted Regression, LWR) әдісін қолдану дәстүрлі интерполяция әдісімен салыстырғанда RSSI орташа қателігін азайтатыны анықталды.

• ашық кеңістіктегі LoRaWAN желі түйіндерінің орнын болжау кезінде салмақталған центроидты локализация (Weighted Centroid Localization, WCL) әдісін қолдану тек машиналық оқытуға негізделген тікелей болжау әдістерімен салыстырғанда локализацияның орташа қателігін төмендететіні анықталды.

Қорғауға ұсынылған ғылыми тұжырымдар:

1. LoRaWAN сымсыз сенсорлық желілерінде секторизация әдісі жабық кеңістіктегі мобильді түйіндердің орнын болжау дәлдігін қозғалыс траекториясының күрделілігіне байланысты 19%-ға дейін арттырады.

2. Жабық кеңістікте радиокартаны қалпына келтіру кезінде локалды салмақталған регрессияны (Locally Weighted Regression, LWR) қолдану дәстүрлі интерполяция әдісіне қарағанда қабылданған сигнал қуаты көрсеткішінің (Received Signal Strength Indicator, RSSI) орташа қателігін 32%-ға төмендетеді.

3. Салмақталған центроидты локализация (Weighted Centroid Localization, WCL) әдісін қолдану ашық кеңістіктегі LoRaWAN желі түйіндерінің орнын болжаудың орташа қателігін 29%-ға төмендетеді.

Зерттеудің теориялық маңыздылығы. RSSI деректерін өңдеу, локалды салмақталған регрессияны қолдану және гибридті модельдерді құру локализация дәлдігін арттырудың ғылыми тәсілдерін кеңейтеді. Сонымен қатар, алынған нәтижелер машиналық оқыту әдістерін физикалық модельдермен үйлестірудің жаңа тәсілдерін қалыптастырып, радиосигналдардың таралу заңдылықтарын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері шектеулі деректер арқылы да жоғары дәлдікті қамтамасыз ететін локализация алгоритмдерін дамытуға теориялық негіз бола алады.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы. Зерттеу нәтижелері ашық және жабық кеңістіктегі сымсыз сенсорлық желілерде локализациялау

жүйелерін жобалау мен енгізуде қолданылуы мүмкін. Ұсынылған әдістер локализация дәлдігін ғана емес, сонымен бірге радиокартаны құрудағы өлшеу көлемін азайтуға және күрделі ортадағы модельдердің тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер ғимарат ішіндегі локализациялау жүйелерін, мобильді робототехниканы, ақылды ғимараттарды, қойма және өндірістік логистиканы, сондай-ақ қалалық LoRaWAN инфрақұрылымына негізделген бақылау жүйелерін әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Алынған нәтижелердің сенімділігі мен негізділігі. Диссертациялық жұмыстың нәтижелерінің сенімділігі импакт-факторы нөлден жоғары шетелдік журналдарда жарияланымдардың болуымен дәлелденеді.

Автордың жеке үлесі. Диссертациялық жұмыста қарастырылған теориялық талдау, зерттеу құрылымын әзірлеу, жабық кеңістіктегі тәжірибелік жүйені ұйымдастыру, деректерді жинау және алдын ала өңдеу, локализация және радиокартаны қалпына келтіру алгоритмдерін жасау, машиналық оқыту модельдерін оқыту және баптау, нәтижелерді талдау мен салыстыру, сондай-ақ жұмыстың негізгі мәтінін дайындау автордың тікелей жеке қатысуымен орындалды. Зерттеу міндеттерін қою және нәтижелерді талқылау ғылыми жетекшілермен бірлесе жүргізілді.

Жұмыстың апробациясы. Диссертациялық жұмыстың нәтижелері төмендегі дерек көздерінде жарияланды:

Thomson Reuters және Scopus халықаралық ғылыми деректер базасына кіретін басылымдарда жарияланған мақалалар:

1. Nurgaliyev M., **Bolatbek A.,** Zholamanov B., Saymbetov A., Kopbay K., Yershov E., Orynbassar S., Dosymbetova G., Kapparova A., Kuttybay N., Koshkarbay N. Machine learning based localization of lora mobile wireless nodes using a novel sectorization method //Future Internet. – 2024. – Vol. 16. – No. 12. – P. 450. **Web of Science: Impact Factor 3.6, Q2. Scopus: CiteScore 9.6, Процентиль 84%**

2. **Bolatbek A.,** Beyca Ö. F., Zholamanov B., Nurgaliyev M., Dosymbetova G., Almen D., Saymbetov A., Yertaikyzy B., Orynbassar S., Kapparova A. A Physically-Aware Residual Learning Framework for Outdoor Localization in LoRaWAN Networks //Future Internet. – 2026. – Vol. 18. – No. 4. – P. 216. **Web of Science: Impact Factor 3.6, Q2. Scopus: CiteScore 9.6, Процентиль 84%**

ҚР ҒЖМБ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда жарияланған мақалалар:

1. Nurgaliyev M., **Bolatbek A.**, Dosymbetova., Kapparova A., Yertaikyzy B. LoRaWAN – Based Indoor Localization for Mobile Nodes Using Machine Learning Technique // "Universitet Enbekteri – University Proceedings". - 2025. - Vol. 100 – No. 3. - P. 449-455.

2. **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. – Vol.. 1. – No. 3. – P. 157.

Халықаралық конференциялар тезистері жинақтарындағы жарияланымдар:

1. **Bolatbek A.**, Orynbassar S., Saymbetov A., Nurgaliyev M., Zholamanov B., Dosymbetova G., Kuttybay N., Kapparova A. ZigBee Based Indoor Localization via RSSI-Based Fingerprinting with Adaptive Path Loss Estimation //2025 10th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK). – IEEE, 2025. – P. 1449-1454.

2. **Bolatbek A.,** Zholamanov B., Seitzhanova A. // Fingerprint-based localization in lorawan using machine learning «FARABI ALEMI», 2025. – P.152

Авторлық куәлік:

Болатбек А.Б., Саймбетов А.К., Нұрғалиев М.К., Жоламанов Б.Н. Восстановление радиокарты в помещении на основе локально-взвешенного метода. Республики Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», 2026 г., Свидетельство об авторском праве № 69347 от «31» марта 2026 года.

Диссертациялық жұмыстың құрылымы және көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытындыдан және 107 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың жалпы көлемі 102 бет, 68 сурет және 18 кестеден тұрады.

Диссертацияның бірінші бөлімінде сымсыз сенсорлық желілерде мобильді түйіндердің орнын болжау мәселесінің қазіргі жағдайы, қолданылатын технологиялар мен әдістерге шолу жасалған.

Диссертацияның екінші бөлімінде жабық кеңістікте деректерді секторизация негізінде алдын-ал өңдеу арқылы мобильді түйіндердің орнын болжау және машиналық оқыту модельдерінің нәтижелері қарастырылған.

Диссертацияның үшінші бөлімі радиокартаны қалпына келтіру мәселесіне арналған және онда статикалық әрі мобильді өлшеулер негізіндегі әдістер зерттелген.

Диссертацияның төртінші бөлімі ашық кеңістіктегі LoRaWAN түйіндерінің орнын болжау үшін ұсынылған гибридті әдіс, деректерді өңдеу кезеңдері және машиналық оқыту модельдерін баптау жұмыстарына арналған.

Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы

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