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

АҢДАТПА

САРМАНБЕТОВ САНЖАР АЙТҚАЛИҰЛЫ

Сигналдарды ақпараттық-энтропиялық талдауды аппараттық іске асыру

Қазіргі таңда ақпараттық технологиялар мен телекоммуникация жүйелерінің қарқынды дамуы сигналдарды өңдеу мен талдауға жаңа талаптар қоюда. Байланыс арналарының өткізу қабілетінің артуы, деректердің күрделенуі және олардың сапасына қойылатын талаптардың күшеюі ақпаратты өңдеу әдістерін жетілдіруді қажет етеді. Сигналдарды тиімді өңдеу және жіктеу жүйелері тек ақпаратты жеткізудің сапасын арттырып қана қоймай, оның сенімділігін, тұрақтылығын және кедергілерге төзімділігін қамтамасыз етеді.

Дәстүрлі тәсілдерде сигналдар амплитуда, жиілік немесе фаза параметрлері арқылы сипатталады. Алайда, бұл әдістер көп жағдайда сигнал құрылымындағы жасырын заңдылықтарды толық қамти алмайды. Сондықтан соңғы онжылдықта ақпараттық энтропияға негізделген тәсілдер ерекше назарға ие болды.

Ақпараттық энтропия - сигнал құрылымындағы белгісіздік пен реттілік дәрежесін сипаттайтын негізгі математикалық көрсеткіш. К. Шеннон енгізген энтропия ұғымы ақпарат теориясының негізін құрап, әртүрлі процестердің күрделілігі мен ақпарат мөлшерін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік берді. Сол арқылы энтропиялық талдау әдістері сигналдарды тану, бақылау, сүзгілеу және классификациялау міндеттерінде тиімді құрал ретінде қолданылуда.

Осы жұмыстың басты идеясы - сигналдарды ақпараттық-энтропиялық әдістер арқылы талдау тәсілін аппараттық деңгейде іске асыру. Яғни, сигнал құрылымын сипаттайтын энтропиялық белгілерді есептеп, оларды нақты уақыт режимінде өңдейтін аппараттық жүйе құру.

Зерттеудің өзектілігі

Ақпараттық жүйелердің дамуының негізгі бағыты - жылдамдық пен сенімділікті арттыру. Бүгінгі күні телекоммуникация, радиолокация және қауіпсіздік жүйелері үлкен деректер көлемімен жұмыс істейді. Бұндай жағдайда бағдарламалық деңгейдегі талдау жиі жеткіліксіз болады, себебі ол жоғары есептеу ресурстарын қажет етеді және кідіріс уақыты артады.

Осы мәселені шешудің тиімді жолы - ақпараттық-энтропиялық әдістерді FPGA, DSP немесе SoC сияқты аппараттық платформаларда жүзеге асыру. Мұндай құрылғылар жоғары жылдамдықтағы параллель өңдеуді қамтамасыз етеді және энергия тұтынуы аз. Энтропиялық талдау әдістерінің артықшылығы:

- Сигналдың құрылымдық ерекшеліктерін сипаттай алады;

- Шуға және көпсәулелі таралуға төзімді;
- Ретті және хаостық процестер арасындағы айырмашылықты анықтайды;
- Сигналдың статистикалық сипатын сандық түрде бағалайды.

Сондықтан энтропиялық әдістер телекоммуникация, радиомониторинг, байланыс сапасын бақылау, IoT құрылғылары, сондай-ақ киберқауіпсіздік жүйелерінде кеңінен қолданылады. Бұл зерттеу өзектілігімен қатар практикалық маңызы зор, себебі ол автономды, нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін интеллектуалды талдау жүйесін жасауға бағытталған. Мұндай жүйелер болашақта радиомониторинг орталықтарында, әскери және өнеркәсіптік байланыс кешендерінде қолданылады.

Зерттеу мақсаты мен міндеттері

Жұмыстың басты мақсаты - сигналдарды ақпараттық-энтропиялық әдістер арқылы талдау тәсілін әзірлеу және оның аппараттық іске асыру прототипін құру. Бұл мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

1.PSK-сигналдарын ақпараттық-энтропиялық талдау негізінде тұрақты классификациялау үшін алгоритмдер мен сандық әдістерді әзірлеу.

2.Жоғары өнімділік пен энергия тиімділігін қамтамасыз ететін ПЛИС негізінде ақпараттық-энтропиялық талдаудың схемотехникалық моделін іске асыру.

3.Сигналдың динамикасын және оның энтропиялық сипаттамаларын ескере отырып, нейрондық желілер үшін ақпараттық-энтропиялық талдаудың теориялық моделін құру.

4.Дамытылған жүйені нақты деректермен, оның ішінде цифрлық модуляциялық сигналдарды классификациялау міндеттерімен эксперименттік зерттеу және тестілеу жүргізу.

Жұмыстың ғылыми негіздері мен мазмұны

Бұл жұмыстың ғылыми жаңалығы - ақпараттық энтропия әдісін аппараттық деңгейде бейімдеп, нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін жүйе құруда. Энтропиялық талдау сигналдың ықтималдық таралуына негізделеді, яғни сигналдың кездейсоқ немесе ретті бөліктерін анықтайды.

FPGA негізіндегі жүйеде энтропия есептеу блогы бірнеше функционалды модульден тұрады:

- Алдын ала сүзгілеу (pre-filtering);
- Дискреттеу және нормализациялау;
- Энтропия есептеу;
- Мәліметтерді жіктеу және визуализациялау.

Сигналдарды өңдеу кезінде жылдам Фурье түрлендіру (FFT) қолданылады, ол сигналдың жиілік аймағындағы сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді. FPGA-да параллель есептеу механизмі қолданылып, логикалық блоктар (DSP, BRAM) бір уақытта бірнеше операцияны орындай алады. Нәтижесінде жүйе сигналды өңдеу уақытын азайтып, өнімділікті арттырады.

Негізгі тұжырымдар

1. Есептеу экспериментінің нәтижелері PSK-модуляцияларын HisarMod2019.1 деректер базасын қолдана отырып классификациялау кезінде Шеннон энтропиясы Реньи, Цаллис және экспоненциалдық энтропияларымен салыстырғанда анағұрлым ақпараттық белгі болып табылатынын, сондай-ақ тану дәлдігін арттыратынын көрсетті.

2. Xilinx Zynq-7000 платформасындағы оңтайландырылған аппараттық радиомодуль, 18,2 % DSP және 25,7 % BRAM ресурстарын пайдалана отырып, 4096-нүктелі FFT-ны 128 мкс кідірісімен орындайды. Бұл нақты уақыт режимінде сигналдарды өңдеудің жоғары тиімділігін дәлелдейді.

3. Үйірткілі нейрондық желі (CNN) NI PXIe-1065 платформасынан алынған PSK-модуляция деректерін 99,9 % дәлдікпен классификациялайды, алайда QPSK үшін SNR = 6 дБ жағдайында дәлдік 94,9 % дейін төмендейді.

4. Машиналық оқыту әдістеріне негізделген PSK-модуляцияның автоматты классификациясы, соның ішінде шоқ жұлдыздар диаграммаларын , таралу функцияларын, жоғары ретті кумулянттарды (HOC), сондай-ақ жаңа сүзгілеу және регенерация техникасын қолдану, SNR = 9 дБ кезінде 95 % дәлдікке қол жеткізеді.

Ғылыми жаңалығы

1. HisarMod2019.1 базасында жүргізілген эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, PSK-модуляцияларын жіктеу кезінде Шеннон энтропиясы Реньи, Цаллис және экспоненциалды энтропияларымен салыстырғанда ең ақпараттық белгі болып табылатыны дәлелденді.

2. FPGA Xilinx Zynq-7000 платформасына негізделген, 4096-нүктелі БПФ орындайтын және ресурстарды төмен пайдалану жағдайында (18–19% DSP, 25–26% BRAM) 128 мкс кідіріспен жұмыс істейтін энергия тұрғысынан тиімді жаңа радиомодуль әзірленді. Бұл аппараттық шешім бағдарламалық іске асырулармен салыстырғанда өңдеу жылдамдығын айтарлықтай арттырады.

3. Алғаш рет энтропиялық белгілер негізінде PSK-сигналдарын жіктеуге оптимизацияланған терең үйірткілі нейрондық желінің (CNN) архитектурасы жасалып, оның тиімділігі эксперименттік түрде дәлелденді. Ұсынылған CNN моделі NI PXIe-1065 платформасынан алынған деректерді өңдеу кезінде 99,9% дейінгі дәлдікке қол жеткізіп, SNR = 6 дБ кезінде де жоғары тұрақтылықты сақтайды.

4. Цифрлық модуляцияларды жіктеудің статистикалық таралу функцияларын, жоғары ретті кумулянттарды және машиналық оқыту модельдерін біріктіретін гибридті архитектурасы ұсынылып, оның тиімділігі негізделді. Әдіс SNR = 9 дБ кезінде 95% дәлдікке, ал одан жоғары мәндерде одан да жақсы нәтижелерге жететіні көрсетілді.

Практикалық маңыздылығы

Жасалған жүйенің практикалық маңызы зор. Ол келесі салаларда қолданылуы мүмкін:

1. Радиомониторинг жүйелері: жиілік спектрін бақылау, рұқсатсыз таратқыштарды анықтау және радиожиілік кеңістігін талдау.
2. Қорғаныс және әскери байланыс: кедергілер жағдайында сигналдарды жедел талдау және жау радиосигналдарын жіктеу.
3. SDR жүйелері: жұмыс режимін автоматты түрде бейімдеу және энергия тиімділігін арттыру.
4. IoT және 5G құрылғылары: төмен қуатты құрылғыларда автономды талдау модульдерін іске асыру.

Аппараттық жүйенің басты артықшылығы - оның бейімделгіштігі мен сенімділігі.

Қорытынды

Жүргізілген ақпараттық-энтропиялық сигналдарды өңдеу зерттеулері энтропиялық белгілерді қолдану цифрлық модуляцияларды талдаудың тиімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетті. HisarMod2019.1 деректер базасына жүргізілген талдау Реньи, Цаллис және экспоненциалды энтропиялармен салыстырғанда Шеннон энтропиясы PSK-сигналдарын жіктеу үшін ең ақпараттық көрсеткіш екенін дәлелдеді. Бұл әдіс сигнал/шум қатынасы төмен жағдайларда да тұрақты әрі анық ажыратылатын белгілерді қамтамасыз етеді.

Xilinx Zynq-7000 платформасында жасалған оңтайландырылған аппараттық радиомодуль энтропиялық талдаудың аппараттық іске асырылуының жоғары тиімділігін растады. Модуль FPGA ресурстарын минималды қолдана отырып (DSP – 18,2%, BRAM – 25,7%), 4096-нүктелі FFT түрлендіруін шамамен 128 мкс кідіріспен орындайды. Бұл жүйенің нақты уақытта жұмыс істеуге қабілетті екенін және оны кірістірілген немесе автономды телекоммуникациялық кешендерде қолдануға болатынын көрсетеді.

NI PXIe-1065 платформасынан алынған деректер негізінде жүргізілген қосымша эксперименттер әзірленген свёрточтық нейрондық желі (CNN) PSK-сигналдарын 99,9% дәлдікпен жіктей алатынын көрсетті. Ал QPSK модуляциясы үшін SNR = 6 дБ жағдайында дәлдік 94,9% болып, әдістің фазалық ауысу ерекшеліктері мен өтпелі режимдерге сезімтал екенін көрсетті.

Сонымен қатар ұсынылған цифрлық модуляцияларды автоматты жіктеу әдісі энтропиялық белгілерді және оңтайландырылған өңдеу алгоритмдерін біріктіре отырып, төмен SNR деңгейлерінде де жоғары тұрақтылық пен тиімділікті қамтамасыз етеді. Әдіс SNR = 9 дБ кезінде 95% дәлдікке қол жеткізіп, есептеу ресурстарын классикалық тәсілдерге қарағанда әлдеқайда аз қажет етеді. Бұл оны PSK, QAM және басқа да әртүрлі модуляция түрлеріне әмбебап және қолдануға ыңғайлы шешім етеді.

Диссертациялық жұмыстың апробациясы

Диссертациялық жұмыс нәтижелері келесі басылымдарда жарияланды:

Thomson Reuters және Scopus халықаралық ғылыми дерекқорларына кіретін журналдарда жарияланған мақалалар:

1. Ibraimov M.K., Kozhagulov E.T., Zheksebai D.M., **Sarmanbetov S.A**. Implementation of functional block radio unit based on system-on-chip // Eurasian Physical Technical Journal. – 2023. – Vol. 20, № 4(46). – С. 74–80. – DOI: 10.31489/2023No4/74-80. Quartile Q3.
2. **Sarmanbetov S.,** Nurgaliyev M., Zholamanov B., Kopbay K., Saymbetov A., Bolatbek A., Kuttybay N., Orynbassar S., Yershov E. Novel filtering and regeneration technique with statistical feature extraction and machine learning for automatic modulation classification // Digital Signal Processing. – 2024. – Vol. 155. – P. 104744. – DOI: 10.1016/j.dsp.2024.104744. Quartile Q2.

БҒМ Білім және ғылым саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған журналдарда жарияланған ғылыми мақалалар:

1. Кожагулов Е.Т., Жексебай Д.М., **Сарманбетов С.А.**, Максутова А.А. Классификатор изображений микросхем при помощи сверточной нейронной сети // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series. – 2021. – Vol. 6, № 340. – С. 59–65. – ISSN 1991-346X. – DOI: 10.32014/2020.2518-1726.102.
2. Kozhagulov Y.T., Zhexebay D.M., **Sarmanbetov S.A.**, Sagatbayeva A.A., Zholdas D. Comparative analysis of object detection processing speed on the basis of neuroprocessors and neuroaccelerators // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series. – 2020. – Vol. 4, № 332. – pp. 61–67. – ISSN 1991-346X. – DOI: 10.32014/2020.2518-1726.66.
3. **Сарманбетов С.А.**, Сагидолда Е., Кожагулов Е.Т., Жексебай Д.М. Классификация модулированных радиосигналов на основе сверточных нейронных сетей // Engineering Journal of Satbayev University. – 2021. – Vol. 143, № 2. – С. 98–105. – DOI: 10.51301/vest.su.2021.i2.13.
4. Kozhagulov Y.T., Zhexebay D.M., **Sarmanbetov S.A.**, Ussipov N.M., Kopbay K.T. Identification of digital modulation based on informational entropy // Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. – 2024. – № 2. – pp. 73–83. – DOI: 10.32014/2024.2518-1483.279.
5. Кожагулов Е.Т., Жексебай Д.М., Намазбаев А.Т., **Сарманбетов С.А.** Эффективная классификация цифровой модуляции с использованием сверточных нейронных сетей // Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical Sciences. – 2024. – № 2 (86). – С. 201–210. – DOI: 10.51889/2959-5894.2024.86.2.019

Авторлық құқық

Жанабаев З. Ж., Кожагулов Е. Т., Жексебай Д. М., Сарманбетов С. А. Информациялық-энтропиялық талдау негізінде сигнал-шуыл қатынасының аналитикалық аналогын IER анықтау. Қазақстан Республикасы, «Ұлттық зияткерлік меншік институты», авторлық құқыққа куәлік № 3008.2019.