УДК 621.395 **DOI 10.52167/1609-1817-2024-132-3-392-405**

А.А. Абдықадыров[1,2], Н.Қ. Смайлов[1,2], А.У. Аналиева[3], Ә.М. Сәбиболда[2]
[1]Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан
[2]Satbayev University, Алматы, Қазақстан
[3]Қазақстан инновациялық және телекоммуникациялық жүйелер университеті, Орал, Қазақстан
E-mail: Nur_aly.kz@mail.ru

ОПТИКАЛЫҚ ДАТЧИКТЕРДІҢ КӨМЕГІМЕН РАДИО БАҒЫТЫН ТАБУДЫҢ ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ САНДЫҚ СПЕКТРЛІК - КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ӘДІСІТЕРІНЕ ШОЛУ

Андатпа. Радио бағытын анықтау (RDF) телекоммуникация, қорғаныс және сигналдық интеллектті қоса алғанда, әртүрлі қолданбалардағы маңызды әдіс болып табылады. Дәстүрлі RDF әдістері көбінесе антенна массивтеріне және аналогтық сигналдарды өңдеуге сүйенеді, олардың жылдамдығы мен дәлдігін шектейді. Бұл ғылыми зерттеу жұмысында біз радио бағытын анықтау жылдамдығы мен дәлдігін жақсарту үшін оптикалық сенсорлар мен жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік корреляцияны қолданатын озық тәсілдерге шолу жұмыстарын жүргіземіз. Сол сияқты инновациялық технологияның негізгі принциптерін, әдістерін және әлеуетті қолданбаларын талқылаймыз.

Түйінді сөздер. Радио бағытын анықтау (RDF), спектрлік - корреляциялық талдау, оптикалық сенсорлар, фотоникалық сигналды өңдеу, электро - оптикалық модуляция, аналогты - цифрлық түрлендіру (ADC), сандық сигналдарды өңдеу (DSP), жоғары жиілікті радио сигналдар, оптикалық модуляторлар, талшықты оптика, оптикалық сигналды түрлендіру, шуды азайту әдістері.

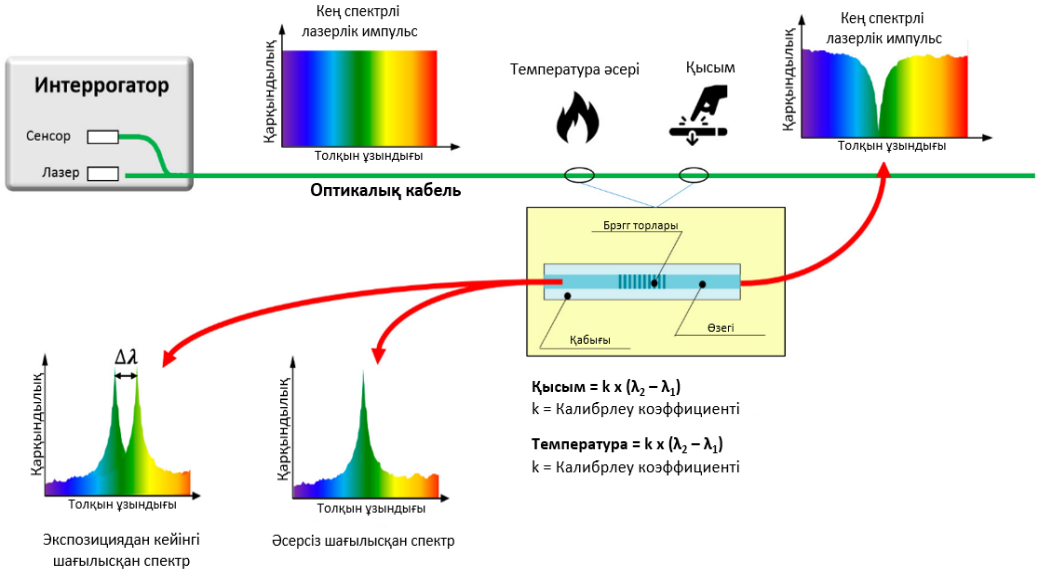
Кіріспе.

Қазір ғылымда қарқынды дамып келе жатқан технологиялық прогресс, жасанды интеллект және инклюзивті өсу мен бірге технологиялық үрдісте радиопеленгация әдістеріне сұраныс айтарлықтай өсті [1]. Радиопеленгация телекоммуникация, әскери операциялар және спектрді басқару сияқты әртүрлі салаларда шешуші рөл атқарады [2]. Дәстүр бойынша, радиопеленгация аналогтық әдістер мен механикалық жүйелерге сүйенді, олар көбінесе жылдамдық, дәлдік және қазіргі байланыс жүйелеріне бейімделу тұрғысынан шектеулер көрсетті. Алайда, спектрлік корреляция мен оптикалық датчиктерді біріктірудің жоғары жылдамдықты цифрлық әдістерінің пайда болуымен бұл салада революциялық өзгеріс болды [3]. Бұл инновациялық тәсіл радиосигналдардың бағытын анықтау тәсілін өзгерту үшін цифрлық сигналдарды өңдеу және оптикалық технологияларды қолданады [4]. Ғылыми зерттеу жұмысында радиопеленгация технологиясының болашағын қалыптастыру әлеуетін және оптикалық датчиктерді қолдана отырып, радиопеленгацияға арналған жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік корреляция әдісін зерттейміз. Радиопеленгация (RDF) әскери операциялардан бастап іздеу - құтқару миссияларына дейінгі әртүрлі қолданбаларда маңызды әдіс болып табылады [5]. Радио бағытын анықтау технологияларын салыстыру жалпы дәстүрлі RDF жүйелерінде көбінесе радиожиілік компоненттеріне сүйенеді, олар тиімділігіне қарамастан жылдамдық пен сезімталдық шектеулеріне ие [6]. Жоғары жылдамдықты деректерді өңдеу мүмкіндіктерімен танымал оптикалық сенсорлардың интеграциясы осы шектеулерге

перспективалы шешім ұсынады [7]. Сондықтан радио бағытын анықтау әр түрлі өрістердегі радио сигналдарының көзін табу үшін өте қажет. Кәдімгі RDF жүйелері күрделі антенна массивтерін және шуға сезімтал және жылдамдығы шектеулі аналогтық сигналдарды өңдеуді қамтиды. Бұл ғылыми зерттеу жұмысында радио бағытын тиімдірек және дәлірек анықтау үшін оптикалық сенсорлар мен жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік корреляцияны қолданатын жаңа тәсілдерге шолу жұмыстары ұсынылады:

А. Оптикалық сенсор технологиясы.

Оптикалық сенсорлар радиожиілік (РЖ) сигналдарын контактісіз түрде түсіру үшін қолданылады [8]. Бұл сенсорлар РЖ сигналдарын оптикалық сигналдарға түрлендіреді, содан кейін оларды сандық түрде өңдеуге болады [15]. Оптикалық сенсорлардың негізгі компоненттеріне сигналдарды түрлендіру үшін өте маңызды фотодетекторлар мен модуляторлар жатады [9]. Оптикалық датчиктердің көмегімен радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістерін бейнелейтін технологиялық сұлба төмендегі 1-суретте келтірілген. Бұл сұлбада радиожиілік көздерін [12], оптикалық модуляторларды, спектрлік анализаторларды, цифрлық сигналдық процессорларды және бағытталған антенналарды пайдалануды қоса алғанда, радиожиілік бағыттарын анықтау [8,13] үрдісінде оптикалық және цифрлық технологиялардың интеграциясы бейнеленген (1 сурет).



Бұл суретте жалпы оптикалық сенсор технологиясының диаграммасы келтірілген. Онда жарық көзі, оптикалық талшықтар, детекторлар және сигналдарды өңдеу блогы сияқты негізгі компоненттер суреттелген.

1 сурет - Оптикалық датчиктердің көмегімен радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістерін бейнелейтін технологиялық сұлба

Бұл келтірілген 1 - суретте жоғары жылдамдықты және дәл радио бағытын анықтауға қол жеткізу үшін оптикалық зондтау, цифрлық сигналдарды өңдеу және спектрлік талдаудағы озық технологияларды біріктіреді. Ол жоғары өткізу қабілеттілігі және электромагниттік кедергілерге қарсы иммунитет сияқты оптикалық жүйелердің артықшылықтарын күрделі цифрлық өңдеу әдістерімен біріктіреді.

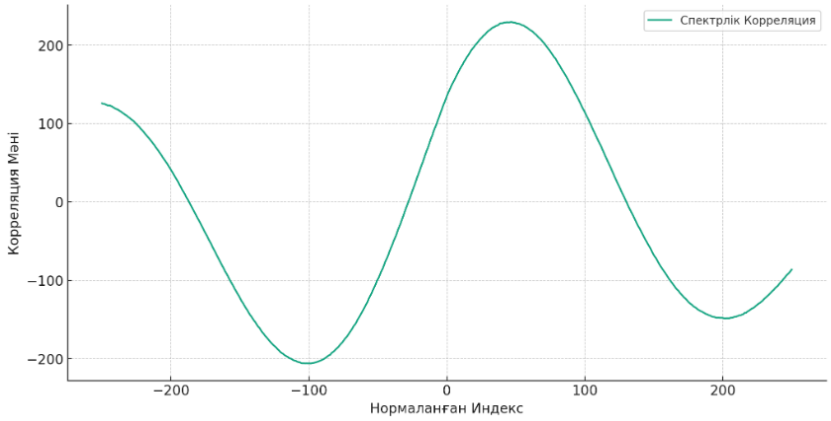
Оптикалық әдістер инвазивті емес құралдар болып табылады және оларды әртүрлі салаларда, соның ішінде зондтау қолданбаларында қолдану үздіксіз артып келеді [7,10].

Себебі инновациялық арзан көздер мен детекторлар үздіксіз дамып келеді. Наноқұрылғыларды қолданумен бірге бұл жаңа оптикалық технологиялар жоғары жұмыс параметрлерімен сипатталатын жаңа зондтау схемалары мен құрылғыларын жасауға мүмкіндік береді [7]: оптикалық сенсорлар жиі анықтаудың өте төмен шектерін, жоғары спецификалығын және жоғары сезімталдығын қамтамасыз етеді [14]. Сонымен қатар, олар өте жан - жақты және фармацевтикалық зерттеулер, медициналық диагностика, қоршаған ортаны бақылау, ауыл шаруашылығы, өнеркәсіп, азық-түлік қауіпсіздігі сияқты көптеген қолданбалы салаларда қызығушылық тудыратын талдаушылардың құрамдас бөліктерін сандық және сапалық анықтау үшін инновациялық қолданбалы тәсілдерді жүзеге асыруға мүмкіндік береді [11]. Осы арнайы шығарылым оптикалық сенсорлық технологиялар мен қосымшалардың, соның ішінде көздер мен анықтау технологияларының, сенсорлардың архитектурасының, сенсорлардың жұмысының, жетілдірілген цифрлық сигналдарды өңдеу [16,17] тәсілдері мен қосымшаларының соңғы жетістіктеріне шолу жасауға бағытталған.

В. Сандық спектрлік – корреляция.

Сандық спектрлік корреляция - алынған сигналдан спектрлік ақпаратты алуға мүмкіндік беретін қуатты сигналды өңдеу әдісі [17]. Сигналдың толық емес спектрін өңдеу үшін аналитикалық сигналды қайта құрумен бағытты анықтаудың сандық спектрлік корреляциясының интерферометриялық әдісінің дәлдігін арттыру қажет [18]. Жалпы радио сигналдарының кідірісін өлшеу және бағытты анықтау үшін сандық спектрлік - корреляциялық әдістің дәлдігі мен жұмыс жылдамдығын арттыру қажет [19,20]. Бұл алынған сигналды бірнеше жиілік контейнерлері бойынша анықтамалық сигналмен өзара байланыстыруды қамтиды. Әдіс сигналдың жиілігі мен фазалық сипаттамалары туралы нақты ақпарат береді, бұл оны RDF үшін өте қолайлы.

Сандық спектрлік корреляция диаграммасы - бұл сигналдың спектрлік компоненттері (жиіліктері) арасындағы корреляцияны визуализациялау үшін қолданылатын графикалық құрал, өйткені олар уақыт бойынша өзгеріп отырады. Бұл сигналдағы әртүрлі жиіліктердің бір-бірімен қалай байланысты екенін және бұл қатынастардың уақыт өте келе қалай өзгеретінін түсінуге көмектеседі, бұл әсіресе стационарлық емес сигналдарды талдауда немесе сигналдарды өңдеу және байланыс саласында пайдалы (2 сурет) [37].



2 сурет - Сандық спектрлік корреляция диаграммасы

Бұл диаграмма екі сигнал арасындағы спектрлік корреляцияның қалай өзгеретінін көрсетеді, бұл нормаланған индекс бойынша бейнеленген. Спектрлік корреляция мәндерінің өзгеруі сигналдар арасындағы байланыстың қаншалықты күшті екенін көрсетеді, бұл сигналдардың ұқсастығын және арасындағы байланысты зерттеуде

маңызды. Мұнда шыңдар немесе жарқын нүктелер жиілік компоненттері арасындағы күшті корреляцияны көрсетеді, бұл бұл компоненттердің сигналда ортақ қасиеті немесе әрекеті бар екенін көрсетеді. Түсі аз немесе мүлдем жоқ аймақтар әлсіз немесе корреляцияның жоқтығын көрсетеді.

Сигналдарды өңдеудің үнемі дамып келе жатқан әлемінде зерттеушілер мен инженерлер күрделі деректерден мағыналы ақпаратты алудың инновациялық әдістерін үнемі іздейді [21]. Соңғы жылдары танымал болған осындай әдістердің бірі - *сандық спектрлік корреляция.* Бұл қуатты құрал телекоммуникациядан радиолокациялық жүйелерге дейін, тіпті музыкалық талдау саласында да қолданбалардың кең ауқымын пайдалануға мүмкіндік беретін сигналдардың негізгі үлгілері мен құрылымдары туралы тереңірек түсінік береді. Ғылыми зерттеу жұмысында біз сандық спектрлік корреляция ұғымын, оның принциптерін, қолданылуын және оның әртүрлі домендерге әсерін қарастырамыз.

Спектрлік корреляция, циклдік автокорреляция деп те аталады, сигналдарды өңдеудегі іргелі ұғым [22]. Ол сигналдың өзінің кешіктірілген нұсқасымен ұқсастығын өлшейтін автокорреляция тұжырымдамасына негізделген [23,24]. Дегенмен, спектрлік корреляция сигналдың жиілік құрамдастарының уақыт өте келе қалай корреляцияланатынын талдау арқылы бір қадам алға жылжиды.

Негізінде спектрлік корреляция сигнал ішіндегі әр түрлі жиілік компоненттерінің қуатының немесе амплитудасының циклдік өзгерістері туралы ақпарат береді [25]. Осы циклдік вариацияларды зерттей отырып, біз сигналда болатын негізгі модуляция, жиілік - ауысым пернелері және фазалық байланыстар туралы түсінік ала аламыз.

Сандық спектрлік корреляция спектрлік корреляцияның осы тұжырымдамасын қабылдайды және оны цифрлық доменде қолданады [26]. Аналогтық сигналдармен жұмыс істеудің орнына, сандық спектрлік корреляция дискретті деректер нүктелерін өңдейді, бұл оны компьютерлер мен цифрлық сигналдық процессорлар (DSPs) сияқты цифрлық платформаларда талдау және манипуляциялау үшін қолайлы етеді [27]. Жалпы негізгі принциптері келесідей:

1) Сандық спектрлік корреляция сигналдың кросс - өнімдерін өзінің уақыт бойынша кешіктірілген нұсқаларымен есептейді [30]. Бұл кросс - өнімдер әр түрлі уақыт аралықтарындағы жиілік компоненттері арасындағы корреляция туралы ақпарат береді [28,29].

2) Спектрлік корреляцияны есептеу үшін сигнал алдымен оның жиілік компоненттеріне жылдам Фурье түрлендіруі (FFT) сияқты әдістерді қолдана отырып ыдырайды [31]. Бұл сигналдың спектрлік мазмұны уақыт өте келе қалай дамитынын зерттеуге мүмкіндік береді.

3) Сандық спектрлік корреляция сигналда модуляцияның болуын анықтауға көмектеседі. Бұл әсіресе модуляция схемалары ақпаратты тасымалдайтын сымсыз байланыс сияқты қолданбаларда пайдалы [35].

4) Сымсыз байланыста спектрлік корреляция кедергі мен шу болған кезде сигналдарды демодуляциялауға көмектеседі, сигналдың сапасы мен сенімділігін арттырады [32].

5) Радиолокациялық қосымшаларда спектрлік корреляция мақсатты анықтауға, бақылауға және әртүрлі модуляция сипаттамалары бар бірнеше нысандарды ажыратуға көмектеседі [33,34].

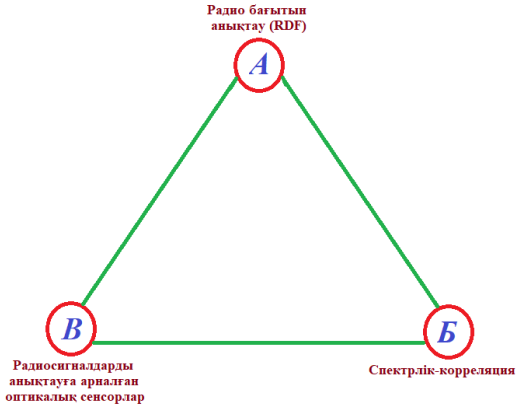
6) Спектрлік корреляция сөйлеуді тануда және сөйлеушіні сәйкестендіруде маңызды рөл атқарады, мұнда ол сөйлеу сигналдарын талдауға және әртүрлі сөйлеушілерді ажыратуға көмектеседі [36].

Сандық спектрлік корреляция - бұл сигналдарды өңдеудің әртүрлі салаларында қосымшаларды тапқан қуатты құрал. Сигнал қасиеттерінің циклдік өзгерістері туралы

түсінік бере отырып, бұл күрделі деректерді дәлірек талдауға және түсіндіруге мүмкіндік береді. Технология дамып келе жатқандықтан, цифрлық спектрлік корреляцияны қолдану одан әрі кеңейіп, телекоммуникациядан музыкаға дейін және одан тыс салалардағы инновацияларды ынталандырады деп күтілуде. Сондықтан ғылыми зерттеу жұмыстары мен жобаларында оның әлеуетін пайдаланудың жаңа жолдарын үнемі зерттеп отырады, бұл оны сигналдарды өңдеудің заманауи әлемінде таптырмас активке айналдырады.

Материалдар мен тәсілдер.

Оптикалық датчиктерді қолдана отырып, радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістеріне шолу жасау үшін материалдар мен әдістерді әзірлеу негізгі принциптерді, технологияларды және бағытты анықтау үшін радио сигналдарын анықтауға және талдауға мүмкіндік беретін нақты әдістемелерді талқылауды қамтиды. Осы күрделі тақырыпты бірнеше негізгі компоненттерге бөлейік (3 сурет):



3 сурет - Оптикалық датчиктерді қолдана отырып, радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістеріне шолу жұмыстары бойынша жасалған негізгі компоненттер

А. Радио бағытын анықтау (RDF): бұл жерде RDF - бұл радиосигналдың берілу бағытын анықтау үшін қолданылатын әдіс. Бұл әртүрлі қолданбалар үшін, соның ішінде навигация, іздеу - құтқару жұмыстары және сигналдық барлау үшін өте маңызды;

Б. Спектрлік - корреляция: спектрлік корреляция оның көзін немесе табиғатын көрсететін заңдылықтарды, өзгерістерді немесе ерекшеліктерді анықтау үшін сигналдың жиілік спектрін талдауды қамтиды. Бұл шуды және басқа сигналдарды араластыру кезінде модуляцияланған сигналдарды анықтауға мүмкіндік беретін сигналдарды өңдеудің қуатты құралы болып табылады;

В. Радиосигналдарды анықтауға арналған оптикалық сенсорлар: Оптикалық сенсорларды электромагниттік сигналдарды оптикалық сигналдарға түрлендіру арқылы радио сигналдарын анықтау үшін пайдалануға болады. Фотонды төмен түрлендіру сияқты әдістер жоғары жиілікті радио сигналдарды оптикалық доменге аудара алады, мұнда оларды дәстүрлі электронды жүйелерден жоғары жылдамдықта өңдеуге болады.

Ғылыми зерттеу жұмысы бойынша қарастырылатын материалдар.

Зерттеу жұмысы бойынша келесі ғылыми материалдарға ерекше назар аударылды:

А. Фотоникалық құрылғылар: лазерлер, фотодетекторлар, оптикалық модуляторлар және талшықты оптика сияқты құрылғылар оптикалық домендегі радио сигналдарды түрлендіру және өңдеу үшін өте маңызды екенін байқауға болады;

Б. Аналогты - цифрлық түрлендіргіштер (ADC): жоғары жылдамдықты ADC оптикалық сигналдарды өңдегеннен кейін цифрландыру үшін пайдаланылады, бұл сандық спектрлік корреляцияны талдауға мүмкіндік береді;

В. Сигналдарды өңдеуге арналған жабдық: бұған нақты уақыт режимінде спектрлік корреляция алгоритмдерін жүзеге асыруға арналған FPGAs (далалық бағдарламаланатын қақпа массивтері) немесе DSPs (сандық сигналдық процессорлар) кіреді.

Ғылыми әдістемелер.

А. Сигналды түрлендіру: бірінші қадам фотоникалық әдістерді қолдана отырып, алынған радио сигналдарды оптикалық доменге түрлендіруді қамтиды. Бұл алынған радио сигнал негізінде оптикалық сигналды модуляциялайтын электро - оптикалық модуляторларды қолдануды қамтыйды;

Б. Спектрлік корреляцияны талдау: оптикалық доменге енгеннен кейін сигнал спектрлік-корреляциялық талдаудан өтеді. Бұл оның бағытын көрсететін корреляцияларды табу үшін сигналдың спектрлік компоненттерін әртүрлі жиіліктерде немесе уақыттарда салыстыруды қамтиды;

В. Сандық өңдеу: корреляциялық талдаудан кейін сигнал ADC көмегімен сандық доменге қайта түрлендіріледі. Содан кейін корреляцияланған мәліметтерден бағыт туралы ақпаратты алу үшін цифрлық сигналдарды өңдеу әдістері қолданылады.

Өтініштер мен пікірлер.

А. Өтініштер: бұл әдістеменің әскери сигналдарды барлау, азаматтық әуе қозғалысын басқару және іздестіру - құтқару жұмыстары сияқты салаларда қолданылуы бар. Бұл әсіресе радиосигналдарды жоғары жылдамдықпен өңдеу өте маңызды орталарда пайдалы;

Б. Ойлар: Негізгі ойларға оптикалық сенсорлардың сезімталдығы мен жылдамдығы, спектрлік корреляция әдістерінің дәлдігі және нақты уақыттағы сигналдарды өңдеудің есептеу талаптары жатады.

Болашақ бағыттары.

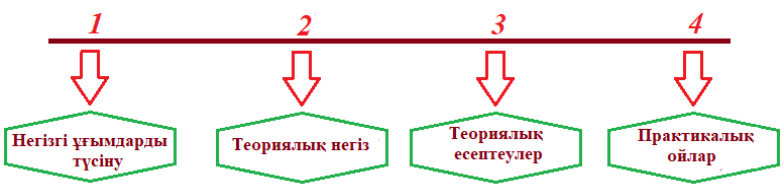
А. Интеграция және миниатюризация: Жүргізіліп жатқан зерттеулер осы жүйелердің көлемін және қуат тұтынуын азайту үшін фотоникалық құрылғыларды чиптерге біріктіруге бағытталған;

Б. Машиналық оқыту: радио бағытын анықтау үшін спектрлік - корреляциялық талдаудың дәлдігі мен тиімділігін арттыру үшін машиналық оқыту алгоритмдерін енгізу;

Бұл шолуда оптикалық датчиктерді қолдана отырып, радио бағытын табуда жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістерді түсіну мен дамытудың кешенді тәсілі ұсынылған. Ол технологиялық негіздерді, қажетті материалдар мен әдістемелерді, сондай - ақ оларды қолдану және болашақ даму жолдары туралы ойларды қамтиды.

Нәтижелер.

Оптикалық датчиктердің көмегімен радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістерін қарастыру және теориялық есептеулер жүргізу үшін үрдісті бірнеше негізгі кезеңдерге бөлу қажет (4 сурет):

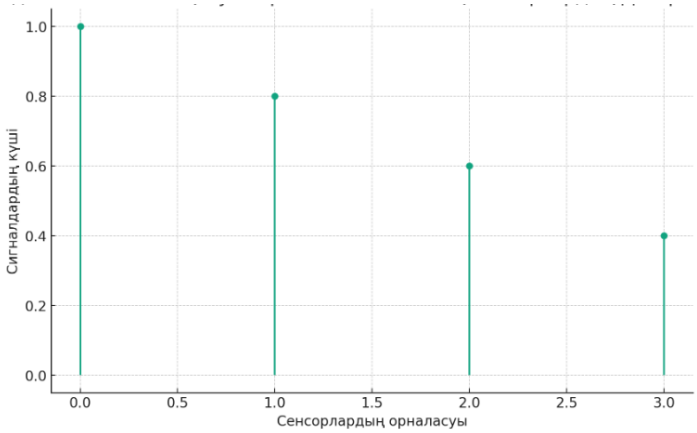


4 сурет - Үрдістің негізгі кезеңдері

Мұндағы:

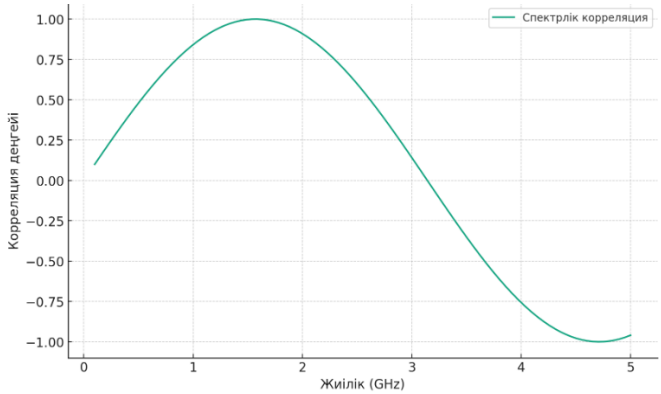
1) *Негізгі ұғымдарды түсіну.* Спектрлік корреляция - бұл заңдылықтарды немесе корреляцияларды анықтау үшін сигналдың жиілік компоненттерін талдауды қамтитын үрдіс. Контекстінде радио бағытын анықтау, бұл әртүрлі көздерден келетін сигналдарды олардың бірегей спектрлік қолтаңбалары негізінде ажырату үшін қолданыла алады. Радио бағытын анықтауға арналған оптикалық сенсорлар (5 сурет) [37]. Ол сенсорлар радиожиілік (РЖ) сигналдарын фотоникалық әдістерді қолдана отырып, жоғары жылдамдықта өңдеуге болатын оптикалық сигналдарға түрлендіреді. Бұл түрлендіру оптикалық өңдеу әдістерін қолдана отырып, РЖ спектрін жылдам талдауға мүмкіндік береді.

Бұл диаграмма әртүрлі орналасқан сенсорлардан алынған сигналдардың күшін көрсетеді. Сенсорлардың орналасуы бойынша сигналдың күшінің қалай өзгеретіні, радио сигналдың көзінің орналасуын анықтау үшін маңызды ақпарат береді. Бұл ақпаратты пайдалана отырып, сигналдың бағытын анықтауға болады.



5 сурет - Радио бағытын анықтауға арналған оптикалық сенсорлардың диаграммасы

2) Теориялық негіз. Радио бағытын анықтау үшін оптикалық датчиктермен спектрлік корреляцияны қолданудың теориялық негізі (6 сурет) [37]. Ол РЖ сигналын оптикалық сигналға түрлендіруді, содан кейін радио көзінің бағытын анықтауға болатын фазалық және амплитудалық ақпаратты алу үшін осы сигналды талдауды қамтиды. Спектрлік - корреляциялық әдістер радио сигналдарының жиіліктік құрылымын пайдаланып, олардың бағыттарын анықтауда маңызды. Бұл әдістер сигналдардың өзара байланыстылығын (корреляциясын) анықтауға негізделген, бұл арқылы олардың көздерінің географиялық орналасуы анықталады.



6 сурет - Оптикалық датчиктермен спектрлік корреляцияны қолданудың диаграммасы

Бұл диаграмма жиіліктер бойынша спектрлік корреляция деңгейлерінің қалай өзгеретінін көрсетеді. Корреляция деңгейінің өзгеруі радио сигналдарының жиіліктік қасиеттерін және олардың бір - бірімен қалай байланысатынын бейнелейді. Бұл анализ радио бағыттарын анықтауда маңызды рөл атқарады, өйткені ол әртүрлі сигнал көздерінің арасындағы байланысты ашуға көмектеседі.

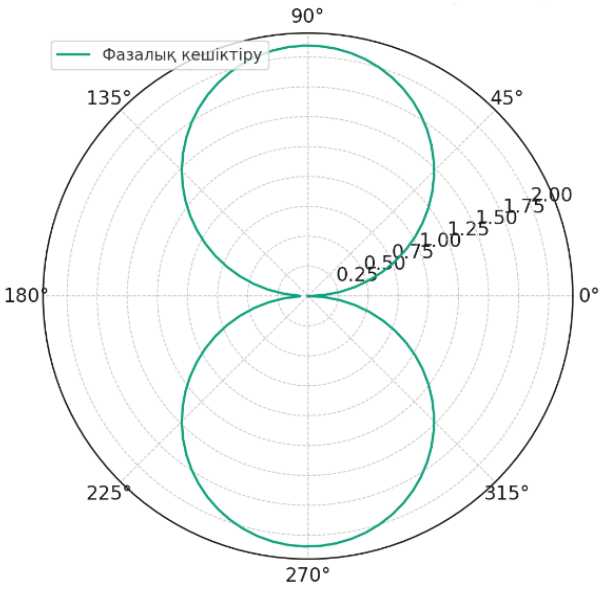
3) Теориялық есептеулер. Радио сигналының бағытын анықтау үшін біз фазалық кешіктіру арқылы алынған ақпаратты пайдаланамыз (7 сурет) [37]. Егер бізде d аралығында орналасқан екі датчик болса және сигнал осы екі датчикке Δt уақыт айырмашылығымен жетсе, онда біз сигналдың келу бұрышын (θ) анықтай аламыз. Фазалық кешіктіру (Δϕ) және уақыт кешіктіруі (Δt) арасындағы байланыс келесі формуламен сипатталады:

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t \,, \tag{1}$$

мұндағы f - сигналдың жиілігі. $\Delta\phi$ фазалық айырмашылық арқылы және датчиктердің геометриялық орналасуын ескере отырып, біз сигналдың келу бұрышын анықтай аламыз. Бұрышты есептеу үшін, біз синус заңын пайдаланамыз:

$$sin(\theta) = c\Delta t/d, \tag{2}$$

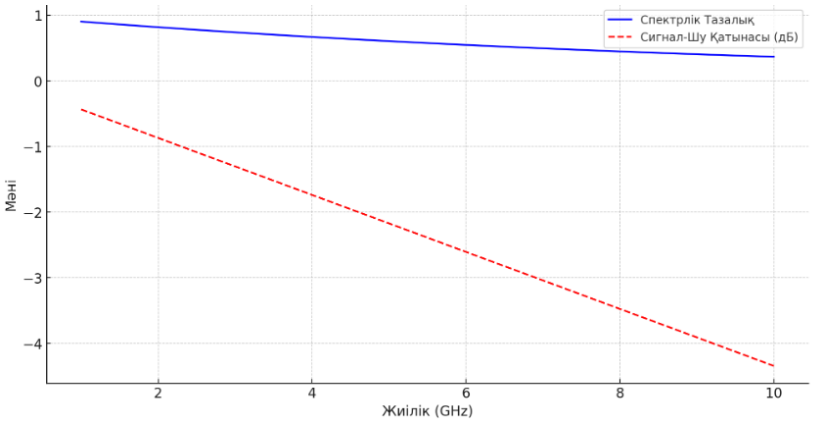
мұндағы c - жарық жылдамдығы, d - датчиктер арасындағы қашықтық. Бұл формула сигналдың келу бұрышын анықтауда қолданылады.



7 сурет - Радио сигналының бағытын анықтау диаграммасы

Бұл диаграмма сигналдың фазалық кешіктіруінің әртүрлі бұрыштарда қалай өзгеретінін көрсетеді. Фазалық кешіктіру мәндері сигналдың келу бұрышына байланысты өзгереді, бұл радио сигналының бағытын анықтауда пайдаланылады.

4. Практикалық ойлар. Бағытты анықтау дәлдігі бірнеше факторларға, соның ішінде массивтегі сенсорлардың санына, уақыттың кешігуін өлшеу дәлдігіне және талданатын сигналдың өткізу қабілеттілігіне байланысты. Оптикалық түрлендіру үрдісінің спектрлік тазалығы мен сигнал - шу қатынасы (SNR) жүйенің жалпы жұмысында да маңызды рөл атқарады (8 сурет).



8 сурет - Оптикалық түрлендіру үрдісінің спектрлік тазалығы мен сигнал-шу қатынасының диаграммасы

Бұл диаграмма жиіліктердің әртүрлі ауқымында спектрлік тазалықтың және сигнал - шу қатынасының (дБ) қалай өзгеретінін көрсетеді. Спектрлік тазалықтың төмендеуі сигнал - шу қатынасының да төмендеуіне әкеледі, бұл оптикалық түрлендіру үрдісінің сапасына тікелей әсер етеді. Спектрлік тазалық жоғары болған сайын, сигналдың шуға қарсы тұру қабілеті жоғары болады, бұл жоғары сапалы сигнал өңдеуге мүмкіндік береді.

Оптикалық датчиктерді қолданатын жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік-корреляциялық әдістер жылдам өңдеу мен жоғары дәлдіктің әлеуетін ұсына отырып, радио бағытын анықтауға перспективалы тәсілді қамтамасыз етеді. Теориялық есептеулер сигналдарды дәл түрлендірудің және радио көздерінің бағытын анықтауда спектрлік корреляция функцияларын талдаудың маңыздылығын көрсетеді.

Талқылаулар.

Оптикалық датчиктерді қолдана отырып, радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістерін талқылау инновацияның құнарлы негізі ретінде оптикалық және РЖ технологияларының қиылысуын көрсетеді. Қиындықтар сақталғанымен, бұл әдістердің әлеуетті артықшылықтары - жылдамдықты, дәлдікті арттыру және жоғары жиілікті сигналдарды өңдеу мүмкіндігі сияқты - олардың сигналдарды өңдеу саласын ілгерілетудегі маңыздылығын көрсетеді. Зерттеулер мен технологиялар дамып келе жатқандықтан, оптикалық сенсорлар мен спектрлік корреляция әдістерінің интеграциясы радио бағытын анықтаудың болашағын қалыптастыруда және одан тыс жерлерде шешуші рөл атқаруға дайын. Бұл қарастырылған ғылыми нәтижелер RDF жүйелерін жақсарту үшін оптикалық сенсор технологиясы мен цифрлық сигналды өңдеу тұжырымдамаларын біріктіре отырып, осы инновациялық тақырыптағы ғылыми жұмыстың жан - жақты құрылымын қамтамасыз етеді. BR20280990 «Сұйықтар мен газдар механикасының, жаңа деформацияланатын денелердің, машиналар, механизмдердің, робототехниканың сенімділігі мен энергия тиімділігінің іргелі мәселелерін шешу әдістерін әзірлеу және әзірлеу» Қазақстан Республикасының ғылым және жоғары білім министрлігі қаржыландырылған.

Қорытынды.

Оптикалық датчиктерді қолдана отырып, радио бағытын табудың жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістеріне шолу айтарлықтай жетістіктерді ашады және оптикалық технологияларды дәстүрлі радиожиілік (РЖ) бағытын анықтау әдістерімен интеграциялау әлеуетін көрсетеді. Міне, осы жұмыстан алынған негізгі қорытындылар:

1) *Технологиялық интеграция және ілгерілеу:* оптикалық датчиктер мен фотонды өңдеу технологияларын РФ бағытын анықтаумен интеграциялау сигналдарды өңдеу мүмкіндіктерінің парадигмалық ауысуын енгізеді. Бұл интеграция жоғары жиілікті сигналдарды таза электронды жүйелермен мүмкін болатыннан жоғары дәлдікпен және жылдамдықпен өңдеуге мүмкіндік береді. Оптикалық технологияларды қолдану фотонды төмендету, оптикалық домендегі сигналдарды өңдеуге мүмкіндік береді, бұл кідірістің төмендеуіне және сигналдың шуылға қатынасының жоғарылауына әкеледі;

2) *Сигналды өңдеудің жақсартылған жылдамдығы:* оптикалық датчиктер мен спектрлік корреляция әдістерін қолданудың маңызды артықшылықтарының бірі өңдеу жылдамдығының едәуір артуы болып табылады. Оптикалық сигналдарды өңдеу жарықтың өзіне тән қасиеттеріне және сигналдарды параллель өңдеу қабілетіне байланысты электронды аналогтар қол жеткізе алмайтын жылдамдықта жұмыс істей алады. Бұл жылдамдық әскери операциялар, іздестіру -құтқару миссиялары және әуе қозғалысын басқару сияқты нақты уақыттағы немесе нақты уақыттағы бағытты анықтауды қажет ететін қолданбалар үшін өте маңызды;

3) Оптикалық доменде спектрлік - корреляциялық әдістерді қолдану радио бағытын табудың дәлдігін арттырады. Оптикалық жүйелердің кең өткізу қабілеттілігі мен жоғары ажыратымдылық мүмкіндіктерін пайдалана отырып, бұл әдістер күрделі сигналдардың спектрлік компоненттерін дәл анықтауға және талдауға мүмкіндік береді. Бұл дәлдік жақын орналасқан сигналдарды ажырату және олардың шығу бағытын дәл анықтау үшін өте маңызды.

4) *Қиындықтар мен шектеулер:* осы жетістіктерге бойынша мәселелер мен шектеулерді ескеру қажет. Фотоникалық жабдықтың күрделілігі мен құны, сондай - ақ мұндай жүйелерді әзірлеу және техникалық қызмет көрсету үшін арнайы білімнің қажеттілігі кеңінен қолдануға кедергі келтіреді. Сонымен қатар, оптикалық компоненттерді қолданыстағы РЖ жүйелеріне біріктіру үйлесімділікті қамтамасыз ету және өнімділікті арттыру үшін мұқият жобалауды қажет етеді.

5) *Болашақ бағыттары:* бұл сала әрі қарайғы зерттеулер мен әзірлемелерге, әсіресе миниатюризация мен интеграцияға дайын. Интеграцияланған фотоникадағы жетістіктер қоршаған ортаның кең ауқымында орналастыруға қабілеттіактам және энергияны үнемдейтін жүйелерге әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, машиналық оқыту алгоритмдерін спектрлік корреляция әдістеріне енгізу сигналдарды өңдеудің дәлдігі мен тиімділігін одан әрі арттырып, бағытты анықтаудың күрделі және бейімделгіш мүмкіндіктерін қамтамасыз ете алады.

Оптикалық датчиктердің көмегімен радио бағытын табу үшін жоғары жылдамдықты цифрлық спектрлік - корреляциялық әдістерді қолдану сигналдарды өңдеу технологиясының айтарлықтай алға жылжуын білдіреді. Бұл әдістер радио бағытын анықтауда теңдесі жоқ жылдамдықты, дәлдікті және дәлдікті қамтамасыз етеді, бұл бірқатар қолданбалар үшін жаңа мүмкіндіктер ашады. Дегенмен, күрделілік, шығындар және интеграция мәселелерін шешу осы технологияларды кеңірек енгізу және одан әрі дамыту үшін өте маңызды болады. Өріс дамып келе жатқанда, біз радио бағытын анықтау және одан тыс жерлерде оптикалық сигналдарды өңдеудің барлық әлеуетін пайдаланатын неғұрлым күрделі, тиімді және интеграцияланған жүйелерді көреміз деп күтуге болады.

ӘДЕБИЕТТЕР

[1] Korinek M. A., Schindler M. M., Stiglitz J. Technological progress, artificial intelligence, and inclusive growth. – International Monetary Fund, 2021. https://www.elibrary.imf.org/view/journals/001/2021/166/article-A001-en.xml

[2] Hoehn J. R., Gallagher J. C., Sayler K. M. Overview of department of defense use of the electromagnetic spectrum. – Congressional Research Service, 2020. – С. 41. https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1169613.pdf

[3] López J. H., Shlyagin M. G., Martínez-Manuel R. Correlation-based multiplexing of spectral channels and fiber-optic sensors using unmodulated continuous-wave distributed feedback diode lasers //Optics Letters. – 2022. – Т. 47. – №. 5. – С. 1210-1213.

[4] Khan S. A. Digital design of signal processing systems: a practical approach. – John Wiley & Sons, 2011. https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=BpHUDf-6cLgC&oi=fnd&pg=PP8&dq=This+innovative+approach+uses+digital+signal+processing+and+optical+technologies+to+change+the+way+radio+signals+are+routed.&ots=9SrsZgsP1q&sig=MMGlzIZMEoy2cT8sl5Z90vcZTTg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

[5] Ilčev D. S. New Aspects of Progress in the Modernization of the Maritime Radio Direction Finders (RDF) //Transactions on Maritime Science. – 2021. – Т. 10. – №. 01. – С. 68-83.

[6] Denisowski P. A comparison of radio direction finding technologies //presentation, Dept of Energy Spectrum Management Conference, Las Vegas. – 2011.

[7] National Research Council et al. Laser radar: progress and opportunities in active electro-optical sensing. – National Academies Press, 2014.

[8] Lubna L. et al. Radio frequency sensing and its innovative applications in diverse sectors: A comprehensive study //Frontiers in Communications and Networks. – 2022. – Т. 3. – С. 1010228. https://doi.org/10.3389/frcmn.2022.1010228

[9] Bielecki Z. et al. Review of photodetectors characterization methods //Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences. – 2022. – Т. 70. – №. 2. DOI:10.24425/bpasts.2022.140534

[10] Santos J. L., Farahi F. (ed.). Handbook of optical sensors. – Crc Press, 2014. https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=2nDng4udoo0C&oi=fnd&pg=PA27&dq=What+are+Optical+Sensors+Used+For&ots=OGutrKkQxo&sig=aEx7iZL_5XXk54pVwC7rIzoxjxg&redir_esc=y#v=onepage&q=What%20are%20Optical%20Sensors%20Used%20For&f=false

[11] Cerny C. L. A. Integrated Photonics for RF Sensing Applications //2019 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). – IEEE, 2019. – С. 1-2. DOI: 10.1109/AVFOP.2019.8908195

[12] Cui L. et al. Radio frequency identification and sensing techniques and their applications—A review of the state-of-the-art //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 18. – С. 4012. https://doi.org/10.3390/s19184012

[13] Abdullah S., Xiao G., Amaya R. E. A review on the history and current literature of metamaterials and its applications to antennas & radio frequency identification (RFID) devices //IEEE Journal of Radio Frequency Identification. – 2021. – Т. 5. – №. 4. – С. 427-445. DOI: 10.1109/JRFID.2021.3091962

[14] Katrenova Z. et al. Status and future development of distributed optical fiber sensors for biomedical applications //Sensing and Bio-Sensing Research. – 2023. – С. 100616.

[15] Yang M. et al. Enhanced radio-frequency sensors based on a self-dual emitter-absorber //Physical Review Applied. – 2021. – Т. 15. – №. 1. – С. 014026. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.014026

[16] Dastres R., Soori M. A Review in Advanced Digital Signal Processing Systems //International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2021. https://hal.science/hal-03183633/

[17] Gaikwad K. M., Chavan M. S. Vedic mathematics for digital signal processing operations: a review //International Journal of Computer Applications. – 2015. – Т. 113. – №. 18.

https:// www.researchgate.net/profile/Mahesh-Chavan-2/ publication/276344924_Vedic_Mathematics_for_Digital_Signal_Processing_Operations_A_Review/links/5aaa3f73a6fdccd3b9ba9a5d/Vedic-Mathematics-for-Digital-Signal-Processing-Operations-A-Review.pdf

[18] Smailov N. et al. Improving the accuracy of a digital spectral correlationinterferometric method of direction finding with analytical signal reconstruction for processing an incomplete spectrum of the signal //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Т. 125. – №. 9. DOI10.15587/1729-4061.2023.288397

[19] Sabibolda A. et al. Improving the Accuracy And Performance Speed Of The Digital Spectral-Correlation Method For Measuring Delay In Radio Signals And Direction Finding //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Т. 1. – №. 9. – С. 115. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252561

[20] Antoni J., Xin G., Hamzaoui N. Fast computation of the spectral correlation //Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Т. 92. – С. 248-277. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.011

[21] Gormley D. J. A low-memory spectral-correlation analyzer for digital QAM-SRRC waveforms //A Low-Memory Spectral-Correlation Analyzer for Digital QAM-SRRC Waveforms. – 2021.

[22] Tekbıyık K. et al. Spectrum sensing and signal identification with deep learning based on spectral correlation function //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Т. 70. – №. 10. – С. 10514-10527. DOI: 10.1109/TVT.2021.3109236

[23] Saatci E., Saatci E. Period determination in cyclo-stationary signals by autocorrelation and ramanujan subspaces //IEEE Signal Processing Letters. – 2020. – Т. 27. – С. 266-270. DOI: 10.1109/LSP.2020.2966877

[24] Gouldieff V. et al. Cyclic autocorrelation-based spectrum sensing: Theoretical derivation framework //2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT). – IEEE, 2018. – С. 600-604. DOI: 10.1109/ICT.2018.8464887

[25] Lunden J., Kassam S. A., Koivunen V. Robust nonparametric cyclic correlation-based spectrum sensing for cognitive radio //IEEE Transactions on Signal Processing. – 2009. – Т. 58. – №. 1. – С. 38-52. DOI: 10.1109/TSP.2009.2029790

[26] Dikmese S. et al. Sparse frequency domain spectrum sensing and sharing based on cyclic prefix autocorrelation //IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2016. – Т. 35. – №. 1. – С. 159-172. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2633058

[27] Tan L., Jiang J. Digital signal processing: fundamentals and applications. – Academic press, 2018. https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=MxlxDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=(PDF)+Digital+Signal+Processing&ots=pacTXknn0F&sig=OqAnQz5Ne-_ilMwcQ2op9VOKy9E&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

[28] Shevgunov T., Efimov E., Guschina O. Estimation of a Spectral Correlation Function Using a Time-Smoothing Cyclic Periodogram and FFT Interpolation—2N-FFT Algorithm //Sensors. – 2022. – Т. 23. – №. 1. – С. 215. https://doi.org/10.3390/s23010215

[29] Lo M. K., Leung Y. F. Probabilistic analyses of slopes and footings with spatially variable soils considering cross-correlation and conditioned random field //Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2017. – Т. 143. – №. 9. – С. 04017044. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001720

[30] Vorburger T. V. et al. Applications of cross-correlation functions //Wear. – 2011. – Т. 271. – №. 3-4. – С. 529-533. https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.030

[31] Borghesani P., Antoni J. A faster algorithm for the calculation of the fast-spectral correlation //Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Т. 111. – С. 113-118. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.059

[32] Chiani M., Win M. Z., Zanella A. Error probability for optimum combining of M-ary PSK signals in the presence of interference and noise //IEEE Transactions on Communications. – 2003. – Т. 51. – №. 11. – С. 1949-1957. DOI: 10.1109/TCOMM.2003.819197

[33] Jiang W. et al. Radar Target Characterization and Deep Learning in Radar Automatic Target Recognition: A Review //Remote Sensing. – 2023. – Т. 15. – №. 15. – С. 3742. https://doi.org/10.3390/rs15153742

[34] Vanhoy G., Schucker T., Bose T. Classification of LPI radar signals using spectral correlation and support vector machines //Analog integrated circuits and signal processing. – 2017. – Т. 91. – С. 305-313. https://link.springer.com/article/10.1007/s10470-017-0944-0

[35] Hofmann J. et al. Spectral Correlation for Signal Presence Detection and Frequency Acquisition of Small Satellites. Aerospace 2021, 8, 57 //Stress8. – 2021. – С. 43.

[36] Kawase T. et al. Speech enhancement parameter adjustment to maximize accuracy of automatic speech recognition //IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2020. – Т. 66. – №. 2. – С. 125-133. DOI: 10.1109/TCE.2020.2986003

[37] This image was created using the DALL·e artificial intelligence model from OpenAI.

Askar Abdykadyrov, candidate of technical sciences, senior researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after academician U.A. Dzholdasbekov, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, askar058@mail.ru

Nurzhigit Smailov, PhD, leading researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after academician U.A. Dzholdasbekov, professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Nur_aly.kz@mail.ru

Analieva Azhar, candidate of technical sciences, senior lecturer, Kazakhstan University of Innovation and Telecommunication Systems, Uralsk, Kazakhstan, azhara_1980@mail.ru

Akezhan Sabibolda, doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, sabibolda98@gmail.com

REVIEW OF HIGH-SPEED DIGITAL SPECTRO-CORRELATION METHODS FOR RADIO DELEGANCE USING OPTICAL SENSORS

Annotation. Radio Direction Determination (RDF) is an important technique in various applications including telecommunications, defense and signals intelligence. Traditional RDF methods often rely on antenna arrays and analog signal processing, which limits their speed and accuracy. In this research article, we review state-of-the-art approaches using optical sensors and high-speed digital spectral correlation to improve the speed and accuracy of radio direction finding. We also discuss the basic principles, methods and potential applications of innovative technologies.

Keywords. Radio direction finding (RDF), spectral correlation analysis, optical sensors, photonic signal processing, electro-optical modulation, analog-to-digital conversion (ADC), digital signal processing (DSP), high-frequency radio signals, optical modulators, optical fiber, optical signal conversion, noise reduction methods.

Аскар Абдыкадыров, к.т.н, старший научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, askar058@mail.ru

Нуржигит Смайлов, PhD, ведущий научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова, профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, Nur_aly.kz@mail.ru

Аналиева Ажар, к.т.н, старший преподаватель, Казахстанский университет инновационных и телекоммуникационных систем, Уральск, Казахстан, azhara_1980@mail.ru

Акежан Сабиболда, докторант, Satbayev University, Алматы, Казахстан, sabibolda98@gmail.com

ОБЗОР ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦИФРОВЫХ СПЕКТРО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАДИОПЕЛЕГАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Аннотация. Определение радионаправления (RDF) является важным методом в различных приложениях, включая телекоммуникации, оборону и радиоразведку. Традиционные методы RDF часто полагаются на антенные решетки и обработку аналоговых сигналов, что ограничивает их скорость и точность. В этой исследовательской статье мы рассматриваем современные подходы с использованием оптических датчиков и высокоскоростной цифровой спектральной корреляции для повышения скорости и точности радиопеленгации. Мы также обсуждаем основные принципы, методы и потенциальные возможности применения инновационных технологий.

Ключевые слова. Радиопеленгация (РПД), спектрально-корреляционный анализ, оптические датчики, фотонная обработка сигналов, электрооптическая модуляция, аналого-цифровое преобразование (АЦП), цифровая обработка сигналов (ЦОС), высокочастотные радиосигналы, оптические модуляторы, оптоволокно, преобразование оптического сигнала, методы шумоподавления.

****