

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті” коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Абдраимова Диана Бауыржанқызы

GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7M06201 – «Телекоммуникация» білім беру бағыты

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті”
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 528.5-529

Қолжазба құқығында

Абдраимова Диана Бауыржанқызы

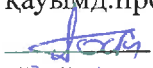
Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация атауы

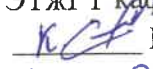
GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты
компрессивті зондтау әдісін қолдану

Дайындау бағыты

7M06201 – «Телекоммуникация»

Ғылыми жетекшісі,
қауымд.профессор, PhD,
 Хабай А.
«20» қаңтар 2025 ж.

Пікір беруші,
Energo university,
«Телекоммуникациялық
инженерия» кафедрасының
қауым. профессоры, PhD, т.ғ.к
 Ермекбаев М.М.
«13» қаңтар 2025 ж.

Норма бақылаушы,
ЭТЖҒТ каф.оқытушысы, т.ғ.м.
 Кенгесбаева С.С.
«15» 01 2025 ж

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТЖҒТ кафедрасы меңгерушісі
т.ғ.к. профессор
 Таштай Е.
«20» қаңтар 2025 ж

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

7M06201 – «Телекоммуникация»



ЭТЖТ кафедрасы меңгерушісі
т.ғ.к., қауымд. профессор
Таштай Е.

2023 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант Абдраимова Диана Бауыржанқызы

Диссертация тақырыбы: «GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану»

Университет Ректорының 2023 жылғы «4» сәуір № 145-П/Ө бұйрығымен бекітілген.
Аяқталған диссертация тапсыру мерзімі «30» желтоқсан 2024 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: компрессивті зондтау теориясының негізгі принциптері мен оның GSM сымсыз байланыс жүйелеріне бейімделу әдістеріне шолу.

Магистрлік диссертацияда әзірлеуге жататын мәселелер тізімі:

- а) GSM сымсыз байланыс желісінде компрессивті зондтаудың үлгілерін әзірлеу.
- б) MATLAB-та компрессивті зондау моделін құру үшін екі қабатты компрессивті зондтау жүйесінің параметрлерін анықтау.
- в) Модель нәтижесіне сүйене отырып екі қабатты компрессивті зондтаудың тиімділігін анықтау.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

- 1 Dan Li, Yanan Ma, Guangteng Fan and Yaowen Fu, “A Joint Angle and Frequency Spectrum Estimation Algorithm Using Difference Coarray” MDPI Journal, vol.33, no.10 , pp. 2234-2238, 17 April 2023
- 2 Zhai, W.T.; Wang, X.R.; Cao, X.B.; Greco, S.M.; Gini, F. Reinforcement learning based dual-functional massive MIMO systems for multi-target detection and communications. IEEE Trans. Signal Process. 2023, 71, 741–755. [Google Scholar]

Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлім атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Компрессивті зондтау тақырыбына жалпы әдебиеттік шолу жасау	03.09.2023 – 10.10.2023	Орындалады
Қолданыстағы компрессивті зондтау әдистерін талдау, параметрлерді тандап екі қабатты компрессивті зондтау анықтамасын алу	01.10.2023 – 25.12.2023	Орындалады
Сигналды екі қабатты зондтаудың моделін құру, бағдарламалық ортада модельдеу	01.01.2024 – 15.04.2024	Орындалады
Модельдеу шешімін талдау, әдістігін тиімділігін көрсету	01.09.2024 – 01.12.2024	Орындалады

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушының қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Магистрлік диссертация тақырыбын талдау	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. Қауымдастырылған профессоры, PhD А.Хабай	10.10.2024 ж.	
Теориялық ақпарат	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. Қауымдастырылған профессоры, PhD А.Хабай	17.01.2025 ж.	
Норма бақылау	Кенгесбаева С.С., ЭТЖҒТ каф. оқытушысы, т.ғ.м.	15.01.25	К.С.А.

Ғылыми жетекшісі



Хабай А.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды



Абдраимова Д.Б.

Күні

« 10 » сәуір 2023 ж

АНДАТПА

Бұл диссертациялық жұмыста GSM сымсыз байланыс жүйелерінде екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану зерттеледі. Жұмыс барысында компрессивті зондтау теориясының негізгі принциптері мен оның GSM жүйелеріне бейімделу мүмкіндіктері талданды. Екі қабатты компрессивті зондтау әдісі арқылы сигналдарды қысу және қалпына келтірудің тиімділігі зерттеліп, жүйенің өткізу қабілетін жақсарту жолдары ұсынылды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бұл әдіс мәліметтерді тасымалдау жылдамдығын арттырып қана қоймай, сондай-ақ арналардың жүктемесін азайтуға және радиожиилікті ресурстарды тиімді басқаруға мүмкіндік береді. Алынған мәліметтер GSM инфрақұрылымының қолданыстағы стандарттарына оңай енгізілуі мүмкін, бұл оны болашақта жаңа буын сымсыз желілерінде қолдануға негіз бола алады.

АННОТАЦИЯ

В данной диссертационной работе рассматривается применение двухслойного метода компрессивного зондирования в системах беспроводной связи GSM. В ходе исследования изучены основные принципы компрессивного зондирования и возможности его адаптации к GSM-системам. Проведен анализ эффективности метода в сжатии и восстановлении сигналов, предложены подходы к улучшению пропускной способности системы. Полученные результаты показывают, что данный метод позволяет не только повысить скорость передачи данных, но и снизить нагрузку на каналы связи, а также эффективно управлять радиочастотными ресурсами. Предложенная методика легко интегрируется в существующую инфраструктуру GSM и может быть использована в разработке сетей нового поколения.

ANNOTATION

This dissertation focuses on the application of a dual-layer compressive sensing method in GSM wireless communication systems. The research examines the fundamental principles of compressive sensing and its potential adaptation to GSM networks. The study evaluates the method's efficiency in signal compression and reconstruction, proposing strategies to enhance system throughput. The findings demonstrate that this approach not only improves data transmission speed but also reduces channel load and enables efficient management of radio frequency resources. The proposed method is compatible with existing GSM infrastructure, paving the way for its integration into next-generation wireless networks.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 GSM сымсыз байланыс жүйесінің теориялық негіздері	11
1.1 GSM сымсыз байланыс жүйесі. GSM жүйесінің негізгі құрылымы	11
1.2 GSM жүйесінің мүмкіндіктері мен қызметтері	12
1.3 Компрессивті зондтау теориясының және оның GSM сымсыз байланыс жүйесіне қажеттілігі	12
1.4 GSM жүйесіндегі компрессивті зондтау әдісін қолдану мүмкіндіктері	13
2 Компрессиялық зондтаудың негізгі теориясы	16
2.1 Сигналдарды ұсыну және сиректік	15
2.2 Компрессивті зондтаудың ішкі тапсырмасы	18
2.3 Компрессивті зондтау негізінде Сәттер әдісі CS-MoM (Compressive Sensing Method of Moments)	22
2.4 Компрессиялық зондтауға арналған кейбір негізгі алгоритмдер	25
3 Компрессивті зондтаудың типтік модельдері	27
3.1 Нақты синусоидтың жиілігін компрессиялық бағалау үшін тиімді зондтау	30
3.2 Жиілік-айырмашылықтың келу бағытын DOA (Direction of arrival) бағалаудың негізгі идеялары	32
3.3 Қолданыстағы компрессивті зондтау әдістерін талдау	34
4 Компрессивті зондтау арқылы сигналды қалпына келтіру әдісінің басты артықшылықтары	38
4.1 Деректерді жылдамдығын арттыру үшін сымсыз жүйеде компрессивті зондтау әдісінің моделі	39
4.2 Екі қабатты компрессивті зондтаудағы негізгі параметрлер: бұрыштық және жиілік бойынша талдау	43
4.3 Екі қабатты компрессивті зондтау әдісінің моделін MatLab жүйесінде құру	45
4.4 Екі қабатты компрессивті зондтау: жалпы модель	51
Қорытынды	53
Терминдер тізімі	54
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	55
Қосымша А	58
Қосымша Б	60

КІРІСПЕ

Қазіргі әлемде цифрлық технологиялардың қарқынды дамуы ақпарат алмасу мен сақтау процестерін жеңілдетумен қатар, сымсыз байланыс жүйелерінің тиімділігі мен қауіпсіздігіне жаңа талаптар қояды. GSM сымсыз байланыс жүйелері мобильді коммуникацияның ең кең таралған стандарттарының бірі болғандықтан, олардың өткізу қабілеті мен сенімділігін арттыру мәселесі ерекше өзекті болып отыр. Жүйенің тиімділігін арттыру мақсатында жаңа әдістер мен технологияларды қолдану қажеттілігі туындайды.

Компрессивті зондтау (КЗ) – деректерді қысу және қалпына келтіру мәселелерін шешудің тиімді әдістерінің бірі. Бұл әдіс сигналдарды олардың толық көлемін жинамай-ақ қалпына келтіру қабілетіне негізделген, бұл әсіресе деректер көлемі үлкен немесе өткізу қабілеті шектеулі жүйелер үшін маңызды. КЗ әдісінің ерекшелігі – ол дәстүрлі сигналды өңдеу әдістерімен салыстырғанда, есептеу және деректер тасымалдау ресурстарын айтарлықтай үнемдеуге мүмкіндік береді.

Екі қабатты компрессивті зондтау (ЕКЗ) әдісі осы технологияның жаңа деңгейін ұсынады, мұнда зондтау екі негізгі параметр бойынша жүргізіледі:

1. Бұрыш бойынша зондтау – сигналдардың кеңістіктік таралу бағыттарын талдау және бірнеше көзден келетін сигналдарды ажырату мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

2. Жиілік бойынша зондтау – сигналдардың жиілік спектрін тиімді түрде талдау арқылы байланыс арналарының өткізу қабілетін арттырады және шуылдың әсерін азайтады.

Бұл әдіс GSM жүйелерінде деректерді тиімді жинау, өңдеу және беру процестерін оңтайландыруға бағытталған. Қазіргі таңда GSM сымсыз байланыс жүйелерінде деректер тасымалдаудың жоғары жылдамдығын қамтамасыз ету және ресурстарды тиімді пайдалану қажеттілігі артып келеді. Осыған байланысты, екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану жүйенің өнімділігін арттырып қана қоймай, оның сенімділігін қамтамасыз етуге де ықпал етеді.

Зерттеудің өзектілігі: GSM сымсыз байланыс жүйелерінің пайдаланушылары санының ұлғаюы, арналардың өткізу қабілетіне қойылатын талаптардың артуы және байланыс сапасын қамтамасыз ету қажеттілігі инновациялық әдістерді қолдануды талап етеді. Қазіргі таңда байланыс арналарының ресурстарын тиімді пайдалану, энергия шығындарын азайту және деректерді сенімді жеткізу GSM жүйелерінің басты міндеттерінің бірі болып табылады.

Екі қабатты компрессивті зондтау әдісі жүйенің өткізу қабілетін жақсартуға, сигналдарды қалпына келтіру дәлдігін арттыруға және деректерді жоғалтуды азайтуға мүмкіндік береді. Бұрыш бойынша және жиілік бойынша зондтауды біріктіру арқылы жүйенің көпжолды таралу әсерлеріне тұрақтылығын арттыру мүмкіндігі зерттеудің өзектілігін анықтайды. Бұл әдіс

GSM инфрақұрылымының қолданыстағы стандарттарына сәйкес оңай енгізіліп, жаңа буын желілерінде қолданылуы мүмкін.

Зерттеудің мақсаты – GSM сымсыз байланыс жүйелерінде екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану арқылы жүйенің өткізу қабілетін арттыру, сигналдарды қалпына келтіру дәлдігін жақсарту және байланыс ресурстарын тиімді пайдалану әдістерін ұсыну.

Зерттеудің міндеттері:

1. Екі қабатты компрессивті зондтаудың теоретикалық негіздерін зерттеу және олардың GSM жүйелеріне бейімделуін талдау;
2. Бұрыш бойынша және жиілік бойынша зондтау параметрлерін модельдеу және олардың тиімділігін бағалау;
3. GSM жүйелерінде екі қабатты компрессивті әдісін қолданудың артықшылықтарын көрсету үшін тәжірибелік модельдеу және талдау жүргізу;
4. Жүйенің өткізу қабілетін арттыру және энергия тиімділігін қамтамасыз ету бойынша ұсыныстар әзірлеу.

Бұл зерттеу GSM сымсыз байланыс жүйелерінде екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолданудың ғылыми және практикалық негіздерін қалыптастыруға бағытталған. Жұмыстың нәтижелері байланыс жүйелерінің сапасын арттыруға, ресурстарды тиімді пайдалануға және деректерді сенімді тасымалдауға ықпал етеді.

Зерттеудің жаңашылдығы мынадай аспектілерде көрінеді:

1. Бұрыш және жиілік бойынша зондтау әдістерін біріктіру — Бұл тәсіл кеңістіктік және жиіліктік сипаттамаларды бірге талдай отырып, байланыс жүйесінің өткізу қабілетін және сенімділігін айтарлықтай арттырады. Бұрын-соңды байланыс жүйелерінде бұл параметрлер жеке-жеке қарастырылып келген, ал бұл зерттеу оларды интеграциялау арқылы жаңа тиімді шешімдерді ұсынады;
2. Қысылған деректерді қалпына келтірудің дәлдігін арттыру — Екі қабатты компрессивті зондтау әдісі деректерді толық көлемде жинамай-ақ, оларды тиімді әрі дәл қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Бұл GSM жүйелеріндегі деректерді тасымалдау мен өндеуде ресурстарды айтарлықтай үнемдеуге әкеледі;
3. Көпжолды таралу әсерлеріне тұрақтылықты арттыру — Екі қабатты зондтау әдісінің енгізілуі сигналдардың көпжолды таралу әсерлерінен туындайтын қателіктер мен бұрмалаушылықтарды азайтуға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе қала жағдайында немесе көпқабатты ғимараттарда сигналдардың бұрмалануын болдырмауға маңызды үлес қосады;
4. Жаңа алгоритмдер мен модельдер — Екі қабатты компрессивті зондтау әдісін іске асыру үшін жаңа математикалық модельдер мен алгоритмдер ұсынылады. Бұл модельдер байланыс жүйелерінің жұмысын оңтайландыруға бағытталған және оларды қолдану нақты байланыс жүйелерінің тиімділігін арттыруға ықпал етеді;
5. Жүйенің энергия тиімділігін жақсарту — ЕКЗ әдісі деректерді қысу арқылы энергияны үнемдеуге мүмкіндік береді, бұл жүйенің жалпы

тиімділігі мен ұзақ уақыт бойы жұмыс істеу қабілетіне оң әсер етеді. Бұл GSM жүйелерінің қоршаған ортаға әсерін төмендетуге және энергетикалық шығындарды азайтуға көмектеседі.

Зерттеу нәтижелері GSM сымсыз байланыс жүйелерін жақсартудың жаңа бағыттарын ашып, оларды болашақта жаңа буын байланыс жүйелерінде кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

1 GSM сымсыз байланыс жүйесінің теориялық негіздері

1.1 GSM сымсыз байланыс жүйесі. GSM жүйесінің негізгі құрылымы

GSM (Global System for Mobile Communications) – ұялы телефондардың әлемдік стандарты, ол сымсыз байланыс жүйелерінің бірі болып табылады. GSM жүйесі алғаш рет 1987 жылы Еуропа елдерінде енгізілді және қазіргі таңда әлемнің көптеген елдерінде кеңінен қолданылады. GSM стандартын енгізудің негізгі мақсаты — ұялы байланыс қызметтерін стандарттау, қауіпсіздікті қамтамасыз ету, түрлі операторлар арасында өзара байланыс орнату және байланыс қызметтерінің сапасын арттыру болды. Бұл жүйе дауыстық байланыс пен қысқа хабарламалар жіберу қызметтерінен бастап, қазіргі таңда мобильді интернет, мультимедиялық қызметтер және басқа да көптеген мүмкіндіктерге қол жеткізуге мүмкіндік береді.

GSM технологиясының теориялық негіздері сигналдарды модуляциялау, мультиплекстеу және кодтау процестерін қамтиды. Бұл жүйеде TDMA (Time Division Multiple Access) және FDMA (Frequency Division Multiple Access) әдістерінің үйлесімі жиілік ресурстарын тиімді пайдаланып, деректерді уақытша және кеңістіктік бөлу арқылы көптеген абонентке бір уақытта қызмет көрсетуге мүмкіндік береді. GSM архитектурасы өзара байланысты бірнеше деңгейден тұрады, оның ішінде радиожелі (BSS), коммутаторлық жүйе (NSS) және қосымша қызмет көрсету жүйесі (OSS) бар.

GSM Жүйесінің Негізгі Құрылымы. GSM жүйесі үш негізгі компоненттен тұрады:

1. Ұялы құрылғы (Mobile Station, MS). Ұялы құрылғы — бұл GSM желісіне қосылған барлық ұялы телефондар мен мобильді құрылғылар. Олар радиотолқындар арқылы базалық станцияға (Base Station) қосылып, байланыс орнатады;

2. Базалық станция (Base Station Subsystem, BSS). Базалық станция ұялы құрылғылармен байланыс орнатып, оларды желіге қосады. Ол екі негізгі бөлімнен тұрады: базалық станция контроллері (Base Station Controller, BSC) және базалық станция (Base Transceiver Station, BTS). BSC базалық станцияларды басқарады, ал BTS радиотолқындар арқылы құрылғылармен байланыс орнатады;

3. Желілік жүйе (Network Subsystem, NSS). Желілік жүйе GSM жүйесінің жүрегі болып табылады және базалық станциялар арасындағы байланыс пен деректерді өңдеуді қамтамасыз етеді. Ол ұялы құрылғылардың бір-бірімен байланысуын, ақпаратты алмасуын және түрлі қызметтерді ұсынуын бақылап отырады. NSS компоненттері ұялы байланыс жүйесінің негізгі серверлері мен басқарушы орталықтарын қамтиды;

4. Қызметтер мен қосымшалар (Service Subsystem, SMS). GSM жүйесінде әртүрлі қызметтер мен қосымшалар жұмыс істейді, мысалы, SMS хабарламалар, мобильді интернет, дауыстық пошта, роуминг және т.б.

1.2 GSM жүйесінің мүмкіндіктері мен қызметтері

Дауыстық байланыс - GSM жүйесі арқылы қолданушылар арасында жоғары сапалы дауыстық байланыс орнатуға болады. Бұл қызметті барлық GSM пайдаланушылары пайдалана алады. Қысқа хабарламалар қызметі - GSM желісі арқылы мәтіндік хабарламалар жіберу және қабылдау мүмкіндігі берілген. Мобильді интернет - GSM жүйесінің негізінде GPRS (General Packet Radio Service) және EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) сияқты технологиялар арқылы интернетке қосылу қызметі қолжетімді. Мультимедиялық қызметтер GSM арқылы суреттер, бейнемазмұндар мен басқа да мультимедиялық файлдарды жіберу мүмкіндігі бар. Роуминг қызметі - GSM желісінің халықаралық роуминг қызметі арқылы бір елде тіркелген абонент басқа елдерде де ұялы байланыс қызметтерін пайдалана алады.

1.3 Компрессивті зондтау теориясының және оның GSM сымсыз байланыс жүйесіне қажеттілігі

GSM (Global System for Mobile Communications) стандартындағы ұялы байланыс бірнеше онжылдық бойы телекоммуникация индустриясында негізгі орын алып келеді. Ол дауыстық деректерді, хабарламаларды және мультимедиялық контентті жаһандық деңгейде жеткізу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. LTE және 5G сияқты заманауи стандарттардың дамуымен қатар, GSM технологиялары әлі де кеңінен қолданылады, әсіресе дамушы елдерде, олардың тұрақтылығы, экономикалық қолжетімділігі және кең қамту аймағы арқасында. Дегенмен, желі арқылы берілетін деректер көлемінің өсуі спектрлік ресурстарды оңтайландыру мен байланыс жүйелерінің тиімділігін арттыру қажеттілігін туындатады.

GSM-дің негізгі шектеулерінің бірі-көп жолақты тарату. Бұл радиотолқындар қабырғалардан және басқа заттардан шағылысып, сигнал өтуі мүмкін көптеген арналар жасайтындықтан болады. Бұл арналардың әрқайсысында әртүрлі кідірістер, фазалар мен амплитудалар бар, нәтижесінде кедергі және сигнал бұрмаланады.

Осыған байланысты деректерді өңдеу әдістеріне үлкен көңіл бөлінеді, олар ақпараттың артықтығын азайтуға, желінің өткізу қабілетін арттыруға және деректерді беру сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Мұндай инновациялық әдістердің бірі – компрессивтік зондтау (Compressed Sensing, CS). Сигналдарды сиретілген ұсыну теориясына негізделген бұл әдіс бастапқы деректерді Котельников - Шеннон теоремасы бойынша қажет болатын өлшемдер санынан аз өлшемдер арқылы қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Осылайша, компрессивтік зондтау спектрлік немесе ресурстық шектеулер жағдайында үлкен деректер көлемімен жұмыс істеуге арналған қуатты құрал болып табылады.

Компрессивтік зондтаудың қағидаларын GSM желілерінің қазіргі архитектурасымен біріктіру байланыс саласындағы көптеген өзекті мәселелерді шешуге мүмкіндік беретін бірегей әдіс болып табылады. Мысалы, компрессивтік зондтау әдістерін қолдану арқылы берілетін деректер көлемін қысқартуға болады, бұл әсіресе ресурстары шектеулі жүйелер, мысалы, IoT құрылғылары немесе алыс аймақтардағы желілер үшін маңызды.

1.4 GSM Жүйесіндегі Компрессивті Зондтау әдісін қолдану мүмкіндіктері

GSM желілерінде көп көлемде деректердің берілуі және шектеулі спектрлік ресурстардың болуы мәселесі бар. Осыған байланысты компрессивті зондтау (Compressed Sensing, CS) технологиясын қолдану желінің тиімділігін арттыру үшін тиімді тәсіл болуы мүмкін. Компрессивті зондтау әдісі деректерді қысу арқылы аз көлемде өлшемдермен ақпаратты қалпына келтіруге мүмкіндік береді, бұл желінің өткізу қабілетін арттырады және энергетикалық шығындарды азайтады. GSM желілерінде компрессивті зондтау әдісін қолдану келесідей мүмкіндіктер береді:

- Спектрлік тиімділікті арттыру - компрессивті зондтау әдісі арқылы деректердің қысылуын қамтамасыз ете отырып, желі ресурстарын тиімді пайдалану;
- Энергияны үнемдеу - компрессивті зондтау алгоритмдері арқылы деректерді минималды өлшемдермен жіберу энергияны үнемдеуге мүмкіндік береді, бұл әсіресе мобильді құрылғылар үшін маңызды;
- Шуға төзімділік - компрессивті зондтау әдісі GSM желілерінде деректерді шулы ортада қалпына келтіру сапасын арттырады, бұл байланыс сапасын жақсартады.

GSM сымсыз байланыс жүйесі қазіргі таңда маңызды телекоммуникациялық стандарттардың бірі болып табылады. Оның артықшылықтары мен кең таралуы көптеген елдерде ұялы байланыс қызметтерін қолжетімді етеді. Компрессивті зондтау сияқты жаңа әдістер GSM жүйелерін оңтайландыруда үлкен рөл атқарып, желі ресурстарын тиімді пайдалану мен деректердің сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Осылайша, GSM технологияларының болашағы осы инновациялық шешімдерді енгізу арқылы жаңғырып, пайдаланушыларға жоғары сапалы қызметтер ұсына алады.

Осы зерттеудің мақсаты – компрессивтік зондтауды GSM жүйелерінде сигналдарды беру мен қалпына келтіруді оңтайландыру үшін қолдану алгоритмдерін әзірлеу және зерттеу. Зерттеу спектрлік тиімділікті арттыруға, энергия тұтынуды азайтуға және жүйелердің сыртқы әсерлерге төзімділігін арттыруға бағытталған.

Сонымен қатар, GSM сигналы қабырғалар, ғимараттар және басқа кедергілер арқылы берілгенде жұтылып, әлсіреуі мүмкін. Себебі көптеген

материалдар жоғары диэлектрлік өткізгіштікке ие және радиотолқындардың энергиясын сіңіре алады. [1]

Осы мәселелерді шешу үшін деректерді қысудың әртүрлі әдістері жасалды. Осындай әдістердің бірі-екі деңгейлі компрессиялық зондтау - деректер жылдамдығын едәуір арттыруға және сымсыз байланыс жүйелеріндегі сигнал ауқымын кеңейтуге мүмкіндік береді. Бұл мақалада біз осы әдіс бойынша жүргізілген зерттеулерді қарастырамыз. Біз зерттеу нәтижелерін талдаймыз, әдіс басқа әдістерден қалай ерекшеленетіні және болашақта әдісті пайдалану сапасын қалай жақсартуға болатыны туралы тұжырымдамалар жасаймыз.

Сымсыз байланыс – телекоммуникация саласындағы зерттеулердің маңызды бағыттарының бірі. Бірнеше онжылдықтар ішінде деректер мен дауыстық байланыстардың едәуір бөлігі ішінара немесе толығымен сымсыз болады деп болжануда. Сымсыз жүйелердің негізгі міндеттерінің бірі-сымсыз ортада деректерді берудің жоғары жылдамдығын қамтамасыз ету. Осы мақсатқа жету үшін дәстүрлі іріктеу техникасының орнына компрессиялық іріктеу деп аталатын жаңа іріктеу техникасын қолдануға болады. Компрессиялық зондтау сымсыз жүйелерде жүзеге асырылуы мүмкін, өйткені нақты әлемдегі сигналдардың көпшілігі белгілі бір домен түрлендірулерінде сирек көрініске ие. Әдеттегі байланыс жүйесінде сигнал сигналдағы ең жоғары жиіліктен кемінде екі есе жоғары жиілікте таңдалады. Алайда, бұл сигналды сығудың тиімді әдістерін шектейді, өйткені бұл бүкіл сигналды іріктеуге үлкен жүктеме әкеледі, ал сигналды көрсету үшін аз ғана түрлендіру коэффициенттері қажет [2].

Екінші жағынан, қысу үлгісі бақылаулардың минималды саны бойынша бастапқы сигналды қалпына келтірудің жаңа әдісін ұсынады. Компрессивті зондтау - бұл сигнал құрылымының сиректігін қолдана отырып, Шенноннан тыс шығуға мүмкіндік беретін үлгі парадигмасы. Бұл қысылатын сигналдарды Найквист жиілігінен едәуір төмен жылдамдықпен түсіруге және бейнелеуге мүмкіндік береді. Іріктеу қадамы өте жылдам, өйткені ол сигнал құрылымын сақтайтын бейімделмеген сызықтық проекцияларды қолданады. Содан кейін сигнал әр түрлі оңтайландыру әдістерін қолдана отырып, осы проекциялардан қайта құрылады. Сығымдау сынаамасы кезінде маңызды ақпаратты және қабылдағышта жойылатын сигнал туралы ақпаратты жинаудың орнына тек маңызды сигнал туралы ақпарат жиналады. Осы теорияны жүзеге асыра отырып, деректерді беру жылдамдығын арттыру үшін таратқыштағы және қабылдағыштағы сигналды қысу және декомпрессиялау үшін қысу үлгісі немесе қысу зондтауы қолданылатын жаңа сымсыз байланыс жүйесі ұсынылды.

Соңғы жылдары нарықта сигналдарды іріктеудің әртүрлі схемалары пайда болды. Веттерли және басқалар [3] біркелкі емес сплайндар мен Дирак ағыны сияқты үздіксіз уақыт сигналдарын біркелкі іріктеу әдісін енгізді.

Алайда, мұндай іріктеу әдістерін сигналды таңдамас бұрын қайта құру ядросы туралы жеткілікті ақпарат қажет болғандықтан жүзеге асыру қиын.

Сонымен қатар, компрессиялық зондтаудың дамып келе жатқан теориясы [4] Найквист стандартымен салыстырғанда кездейсоқ проекциялардың немесе өлшемдердің аз санын оңтайландыру және есепке алудың әртүрлі әдістері арқылы біркелкі емес іріктелген сигналды табысқа жету ықтималдығы жоғары деңгейде қалпына келтіруге болатынын көрсетеді. Компрессиялық зондтауды қолданар алдында қарастырылатын негізгі элементтер келесідей: сигнал сирек кездесетін түрлендіру аймағын қалай табуға болады, уақыт аймағында сирек сигналды қалай тиімді іріктеуге болады және соңында оңтайландыру әдістерін қолдана отырып, үлгілерден бастапқы сигналды қалай қалпына келтіруге болады.

Тұтастай алғанда, Найквист жиілігімен, әсіресе сөйлеу, кескін және бейне сигналдар үшін іріктеу үшін қажет деректердің үлкен көлемі болашақ сымсыз байланыс жүйелері үшін ықтимал шешім ретінде компрессиялық зондтауды зерттеуге итермелейді. Сирек сигналдар түрлендірудегі деректер нүктелерінің шектеулі санымен ұсынылуы мүмкін сигналдар ретінде анықталады. Көптеген нақты әлем сигналдарын тиісті түрлендіру доменін қолдану арқылы осы санатқа жатқызуға болады. Мысалы, егер x сигналы синус болса, онда ол сирек емес, бірақ оның Фурье түрлендіруі өте сирек. Тағы бір мысал-сирек градиенті бар соңғы ұзындықтың шеттерінен алыс тұрақты кескін. Салдары үлкен көлемдегі деректерді алу, сондай-ақ қысу үстеме шығындарын қысу зондтауын қолдану арқылы жақсартуға болады. Нәтижесінде энергияны, жадты және өңдеуді үнемдеуге болады.

Ұсынылған тәсілде сигнал өлшем матрицасы арқылы жазылады және қысылады. Компрессиялық зондтау алгоритмінің шығысы қабылдағышқа берілетін бақылау векторын алады. Қабылдау бөлімінде сигнал l_1 нормасы немесе дөңес оңтайландыру сияқты әртүрлі оңтайландыру әдістері арқылы айтарлықтай аз үлгілерден қалпына келтіріледі. MATLAB-та сигналды найквисттен төмен қысу және оны маңызды ақпаратты жоғалтпай оңтайландырудың көптеген әдістерінің бірімен қалпына келтіру үшін модельдеу жүргізілді.

2 Компрессиялық зондтаудың негізгі теориясы

Компрессиялық зондтау теориясын Кандес және басқалар [5] және Донохо [6] 2004 жылы жасаған. Ол сигналдың кездейсоқ проекцияларын алуды және оны оңтайландыру әдістерін қолдана отырып, өлшемдердің аз санынан қалпына келтіруді қамтиды. Дәстүрлі іріктеу теоремасында сигнал Найквист жиілігімен таңдалады, ал компрессиялық зондтау арқылы сигнал Найквист жиілігінен төмен таңдалады. Бұл сигналдың сирек көрінісі бар аймаққа айналуының арқасында мүмкін болады. Содан кейін сигнал қол жетімді әр түрлі оңтайландыру әдістерінің бірін қолдана отырып, үлгілерден қалпына келтіріледі. Компрессиялық зондтау жүйесінің негізгі блок-схемасы 2.1-суретте көрсетілген.



2.1 - сурет – Компрессивті зондтаудың негізгі блок-схемасы

2.1 Сигналдарды ұсыну және сиректік

Сигналдың презентациясы мен сиректігі компрессиялық зондтауда маңызды рөл атқарады. $x \in R^L$ нақты сигналды білдірсін, егер x сигналы ортогональды негізде сирек болса $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \psi_3 \dots \dots \psi_N\}$, мұндағы N - сигнал ұзындығы, содан кейін x ұсынылуы мүмкін сызықтық комбинациясы K ($K \ll N$) базистік функциялар ретінде

$$x = \sum_{i=1}^K \theta_{n_i} \Psi_{n_i} \quad (2.1)$$

мұндағы, $\Psi_{n_i} \in \Psi, n_i \in \{1, 2, 3 \dots \dots, N\}$. $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \dots \theta_N]^T$ - x сигналының Ψ үшін коэффициенттерінің векторы болсын. x сигналының кездейсоқ өлшемін келесідей көрсетуге болады

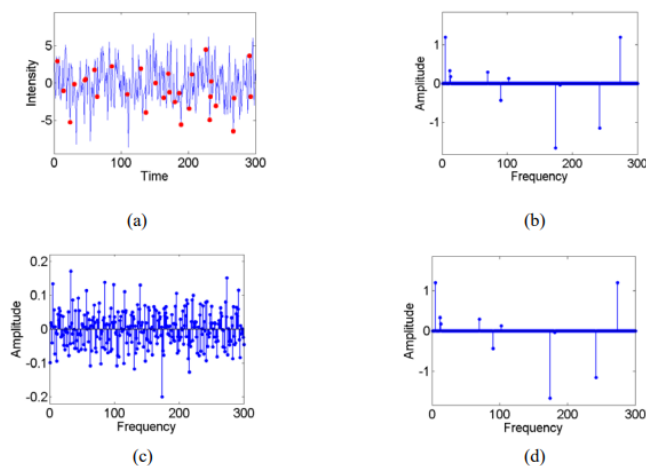
$$y = \phi \theta, \quad \phi: M \times N, \quad K < M \ll N \quad (2.2)$$

мұндағы, ϕ - біркелкі кездейсоқ өлшеу матрицасы, y - x сигналды өлшеу векторы, θ - x сигнал коэффициенттерінің векторы, ал $M = cK$ ($c < 1$) -

тамаша қайта құру үшін қажетті өлшемдер саны. Егер барлық ϕ жазбалары Гаусс үлестірімінен алынған болса, онда ' c ' тұрақтысы үш - бес диапазонда болған кезде сигнал дәл қалпына келтірілуі мүмкін [7]. Сигналдың сирек болуын қамтамасыз ету үшін қолданылатын процедура келесі төрт кезеңде орындалатын трансформациялық кодтау деп аталады [8].

1. Найквист жиілігін пайдаланып толық N - нүктелік x сигналын алу;
2. Түрлендіру коэффициенттерінің толық жиынтығын есептеу;
3. Ең үлкен K коэффициенттерді тауып, ең кіші коэффициенттерді алып тастау;
4. Ұзындықты бақылау M векторын алу үшін сигналды өлшеу матрицасына көбейту.

2.2 - суретте сигналды Найквист жиілігінен төмен қысу үшін қысу зондтауын қолдану мысалы көрсетілген [9]. Бұл мысалда бастапқы сигнал 300 санақтан тұрады. Тапсырма тек 30 үлгіні пайдаланып сигналды қалпына келтіру болып табылады. 2.2 (a) суретте уақыт аймағында сигналдың көрінісі көрсетілген. Бұл суреттен 300 үлгінің ішінен тек 30 үлгіні (қызыл нүктелер) таңдау арқылы бастапқы сигналды тамаша қалпына келтіру мүмкін невожможностигін көруге болады. Екінші жағынан, сигналдың жиілік көрінісіне компрессиялық зондтауды қолдану арқылы оны үлгілердің айтарлықтай аз санымен тамаша қалпына келтіруге болады. Осы мақсатқа жету үшін оңтайландыру әдістерін қолдану қажет. Алайда, осы мақсатта оңтайландырудың барлық әдістерін қолдануға болмайды. Мысалы, 2.2 (b) - суретте l_2 - минимизация арқылы қалпына келтірілген спектр көрсетілген. 2.2 (c) суреттегі сигнал мен 2.2 (d) суреттегі сигнал арасында айтарлықтай айырмашылықтар бар екені анық.

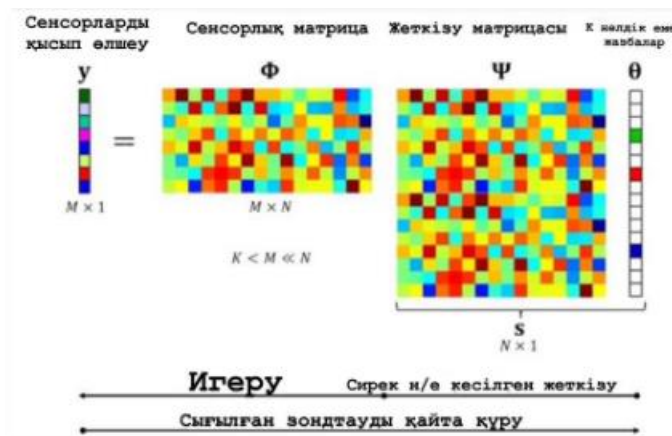


2.2 - сурет - Компрессиялық зондтауды қолдану арқылы іріктеу (a) 300 үлгіден тұратын уақыт аймағындағы сигналды ұсыну, (b) кодталатын сигналдың Фурье спектрі, (c) l_2 минимизациясы арқылы Фурье спектрін қалпына келтіру, (d) l_1 минимизациясы арқылы Фурье спектрін қалпына келтіру

Керісінше, l_1 минимизациясын қолдана отырып қайта құру нәтижесінде керемет қайта құру пайда болады. Бұл 2.2 (b) және 2.2 (d) суреттерін салыстыру кезінде айқын көрінеді. Осылайша, l_1 минимизациясына негізделген оңтайландыру әдістері компрессиялық зондтауды қолданған кезде қажет.

Бұл сигналдарды іріктеу үшін қажетті ресурстарды қысқартуы мүмкін, олардың көпшілігі кез-келген жағдайда нөлге тең. Компрессивті зондтау теориялық негізі сандық сызықтық алгебра, оңтайландыру теориясы, кездейсоқ матрица теориясы (2.3 - суретті қараңыз), қолданбалы гармоникалық талдау және т.б. сияқты көптеген басқа салалармен байланысты.

1. бірнеше нөлдік емес мәндері бар векторды алу үшін сирек негізді (бейнелеу негізі) пайдаланып сирек көрініс;
2. компрессиялық зондтау өлшемдерін алу үшін сенсорлық матрицаны пайдаланып деректерді жинау;
3. сирек векторды қалпына келтіру үшін сирек қалпына келтіру алгоритмін қолдана отырып, қысылған зондтауды қайта құру.



2.3 - сурет – Сығылған сенсордың схемасы. N ұзындығының s сөйлеу сигналы оны Фурье, вейвлет, негіз бола алатын Ψ , ұсыну негізіне проекциялау арқылы кесіледі. Нәтижесінде біз тек k нөлдік емес мәндерден тұратын θ (ұзындық N) векторын аламыз, сондықтан оны K -сирек деп айтамыз. Қабылдау $M \times N$ ұзындығының Φ матрицасын s сигналына көбейту арқылы жүзеге асырылады. сондықтан біз тек M өлшемдерін қамтитын y (өлшеу векторы) сигналын аламыз, осылайша $K < M \ll N$

2.2 Компрессивті зондтаудың ішкі тапсырмасы

Біз белгілі негізде сирек немесе қысылған деп есептейтін белгісіз $x \in R^N$ сигналын алу мәселесін қарастырамыз. Біздің қондырғымызда сенсордың

уақыт сигналы, x , жиілік аймағында қысылады деп есептейміз. Яғни, егер біз сигналды келесідей елестетсек

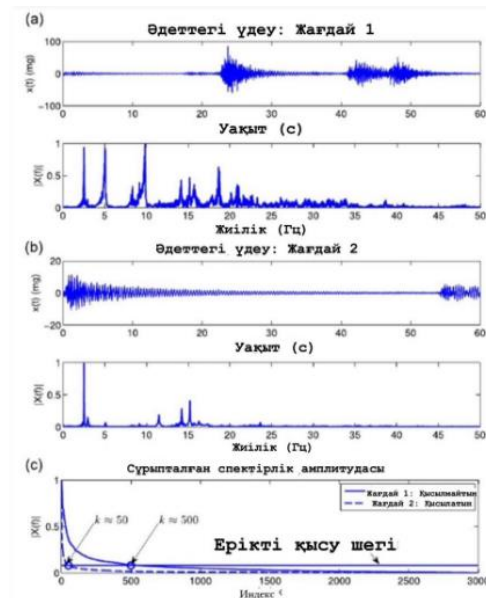
$$x = \theta s \quad (2.3)$$

мұндағы, $\theta \in \mathbb{C}^{N \times N}$ -бұл ODPF, $s \in \mathbb{C}^N$ -сәйкес Фурье коэффициенттерінің векторы, мысалы, x_i n -ші мүшесі

$$= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s_k * e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2.4)$$

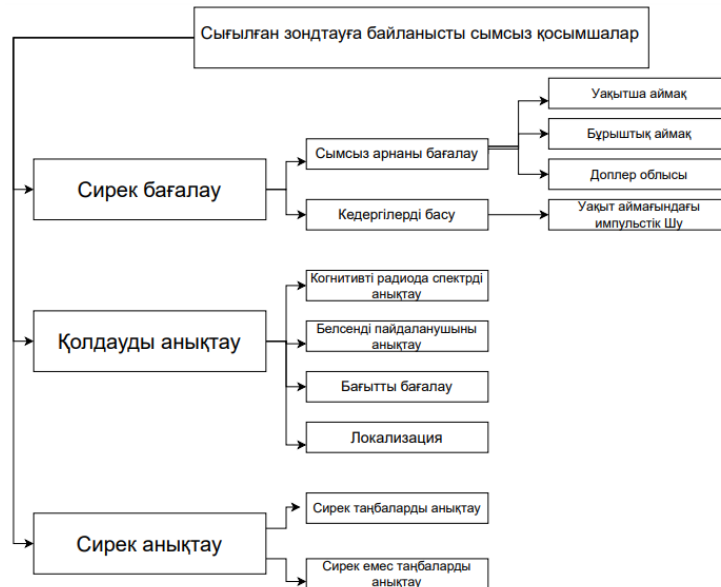
мұндағы s_k - k - Фурье коэффициенттерінің векторларының мүшесі, содан кейін s векторында тек бірнеше үлкен (модульдік) элементтер бар. [10]

Үдеудің екі типтік реакциясы 2.4-суретте көрсетілген, әдеттегі құрылымдық үдеу сигналында пайда болуы мүмкін әртүрлі сығылу деңгейлерін көрсетеді. Мұнда 2.4 (а) - суреттегі сигнал 2.4 (б) - суреттегі сигналға қарағанда аз қысылатын сигналға сәйкес келеді. x сирек немесе қысылатын $k \ll N$ деген болжам x нөлдік емес Фурье дәл немесе дәл қалпына келтірілуі мүмкін дегенді білдіреді. Екі сигналдың қысылуы 2.4 (с) - суретте көрсетілген. Мұнда Фурье коэффициенттері амплитудасы бойынша (үлкеннен кішіге) беріледі. сәйкесінше 2.4 (а) және 2.4 (б) - суреттеріндегі сигналдар үшін $k = 500$ және $k = 50$ ($N = 3000$) [11].



2.4 - сурет - Үдеудің типтік сигналдары: (а) 1-жағдай, уақыт, Жиілік сипаттамасы; (б) 2-жағдай, уақыт, Жиілік сипаттамасы; (с) 1-жағдай, 2-жағдай, шамамен сиректік деңгейлері бар сұрыпталған жиілік амплитудасы

Соңғы жылдары қысуды бағалау әдістері медициналық бейнелеу, жасанды интеллект, есептеу зерттеулері, деректерді талдау және т.б. қоса алғанда, көптеген салаларда кеңінен таралды. Сонымен қатар, соңғы жылдары мақсатты сигналдың сиректігін қолданатын әртүрлі сымсыз қосымшалар ұсынылды. Белгілі мысалдарға, басқалармен қатар, арнаны бағалау, кедергілерді басу, бағытты бағалау, спектрді анықтау және таңбаларды анықтау жатады [12].



2.5 - сурет - Сымсыз байланысты компрессиялық зондтау ішкі тапсырмаларының схемасы және олардың мысалдары

Біз компрессордың үш бөлек ішкі тапсырмасын бөлгенімізді білеміз сымсыз байланысты зондтау: сирек бағалау, қолдауды анықтау және сирек анықтау. Қажетті сигналдың аддитивті ақ Гаусс шуымен сызықтық арнада болтаын жүйенің негізгі моделінің енгізу – шығару қатынастары анықталады.

$$y = Hs + v \quad (2.5)$$

мұндағы, y – қабылдағыш сигнал векторы, $H \in \mathbb{C}^{m \times n}$ - жүйелік матрица, s - бастапқы қалпына келу керек пайдалы сигнал, ал v - Шу векторы. [13] зерттеу жұмысында бізді бірінші кезекте қалаған s векторы сирек болатын жағдайды қарастырамыз, яғни s - дегі нөлдік емес элементтердің үлесі оның өлшемінен әлдеқайда аз. Айта кету керек, қажетті вектор сирек болмаса да, оны сирек векторға жақындатуға немесе тиісті түрлендіру арқылы сирек векторға айналдыруға болады. Мысалы, нөлдік емес элементтердің Шамасы аз болған кезде, шамалы нөлдік емес.

Мысалы, егер $s = [2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0,1 \ 0,05 \ 0,01 \ 0]^T$, содан кейін біз оны 2-сирек s векторымен жуықтай аламыз $s' = [2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. бұл жағдайда жүйенің тиімді моделі $y = Hs' + v'$ мұндағы $v' = H_v s_v + v$ ($H_v = [h_7 h_8 h_9]$)

және $s_v = [0,1 \ 0,05 \ 0,01]^T$). Сонымен қатар, қажетті вектор сирек болмаса да, сигналды негіздің сызықтық қойылысы ретінде білдіру үшін $\{\psi_i\}$ базисті таңдауға болады. Мысалы, Кескін/Бейне өңдеу қоғамында дискретті Фурье түрлендіруі , дискретті косинус түрлендіруі және толқын түрлендіруі осы кезге дейін қолданылып келген. Дұрыс таңдалған базалық матрицаны $\Psi = [\psi_1 \cdots \psi_n]$ қолдана отырып, кіріс векторын $s = \sum_{i=1}^n x_i \psi_i = \psi_x$ және осылайша өрнектеуге болады,

$$y = Hs + v = H\psi + v \quad (2.6)$$

мұндағы, x - бұл s - тің өрістегі көрінісі. Бұл жаңа көрініс жүйенің моделін өзгертпейтіндіктен, біз кейінірек стандартты модельді қолданамыз [14].

Компрессиялық зондтау - сигналдың сиректігін, математикалық статистиканы және оңтайландыру теориясын біріктіретін жаңа парадигма. Найквистің іріктеу теоремасы іріктеу жиілігі бастапқы сигналдың максималды жиілігінен екі есе көп болуы керек дейді. Оның орнына, қысу өлшеу теориясы сирек сигналдарды айтарлықтай төмен іріктеу жылдамдығымен дәл қалпына келтіруге мүмкіндік береді, бұл энергияны айтарлықтай үнемдеуге әкеледі. Компрессиялық өлшеу теориясының арқасында іріктеу жиілігі енді сигнал жолағының еніне тәуелді болмайды. Кәдімгі деректерді біріктіруден айырмашылығы, сигнал бір уақытта іріктеліп, кішірейе алады. Деректерді сығымдау негізінде деректерді біріктіру тек қосу және көбейту операцияларын қажет етеді, ал қабылдағыштың Өңдеу мүмкіндіктері шексіз. Бұл компрессиялық зондтау үлгісін сымсыз сенсорлық желілер үшін өте қолайлы етеді [15].

Сығымдау зондтау әдісін қолдана отырып, ұсынылған энергияны үнемдейтін кластерлеу оның өнімділігін бағалау үшін NS-2 модельдеуін қолдану арқылы мұқият тексерілді. Энергияны үнемдейтін құрылғылар кластеріне негізделген деректерді біріктіру схемасы [16], орталықтандырылған кластерлеу [17] салыстырылды. 20, 40, 60, 80 және 100 түйіндері бар энергияны үнемдейтін кластерлеу үшін қысу әдістемесін қолдана отырып кластерлеу кідіріс көрсеткіштерін қолдана отырып бағаланады.

Зерттеудің жаңалығы компрессивтік зондтау қағидаларын GSM желілерінің қажеттіліктеріне бейімдеуден тұрады, бұл қазіргі уақытта аз зерттелген сала болып табылады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы оның спектрлік ресурстар шектеулі жағдайда GSM желілерін жаңғырту және телекоммуникациялық жаңа сын-қатерлер үшін қолдану мүмкіндігінде жатыр.

Осылайша, зерттеу GSM желілерін оңтайландыруға байланысты іргелі және қолданбалы міндеттерді шешуге бағытталған. Осы жұмыстың нәтижелері байланыс сапасын жақсартуға, инфрақұрылым шығындарын азайтуға және дәстүрлі телекоммуникациялық стандарттардың бәсекеге қабілеттілігін арттыруға мүмкіндік береді.

Мысалы, [18] жұмыста сигналды кедергілер арқылы беру кезінде оның параметрлерін бағалау үшін сымсыз арнаны талдау әдісі ұсынылған. Бұл сигнал екі түрлі жиілікте модуляцияланады, содан кейін жиіліктердің әрқайсысында параметрлерді өлшеу мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін біріктіріледі.

Авторлар жұмыста әзірлеген [19] сымсыз байланыспен байланысты қысуды анықтаудың үш бөлек ішкі тапсырмасын сипаттауға болады: сирек бағалау, қолдауды анықтау және сирек анықтау.

Талдау үшін ғалымдар жүйенің бастапқы конфигурациясын таңдады, онда мақсатты сигнал ақ Гаусс шуы (АГШ) түрінде Шу қосылатын түзу сызықты арналар арқылы беріледі. Ұсынылған енгізу-шығару қатынастары осы модельде [20].

Кәдімгі компрессиялық зондтау реконструкциясы шектеулермен азайту арқылы қайта құру үшін рұқсат етілген сигналдарды (әдетте Найквист іріктеу жиілігінен төмен жиілікте іріктеледі) пайдаланады. Бұл тәсілдің алғашқы қолданыстарының бірі жер асты қабаттары арасындағы өзгерістерді бақылау үшін өткізу қабілеті шектеулі деректерден сирек шағылысқан сигналдарды қолданатын шағылысқан толқын сейсмологиясында болды [21].

1990 жылдары Лассо моделі сирек кездесетін модельді таңдаудың статистикалық әдісі ретінде [22] танымал болған кезде, бұл әдіс толып жатқан сөздіктерден сигналдарды сирек көрсету үшін есептеу гармоникалық талдауында қолданылды. Кейбір басқа қосымшаларға радиолокациялық импульстардың когерентті емес үлгісі кіреді. Бойдтың жұмысы және т.б. Лассо моделін - сирек модельдерді таңдау үшін - аналогтық-цифрлық түрлендіргіштерге қолданды (қазіргі модельдер іріктеу жиілігін Шеннонның квантталған көрінісі бар Найквист жиілігінен жоғары пайдаланады).[23].

Деректердің блоктық жоғалуы және гетерогенді ортаға байланысты сигналдардың әлсіреуі сияқты жағымсыз әсерлерді жою үшін екі деңгейлі қысу зондтау әдісі қарастырылды. Тасымалдау кезінде пакеттердің кездейсоқ жоғалуы пассивті қысу процесі ретінде модельденген. Әрбір сымсыз сенсор құлыптау салдарынан деректердің жоғалуын болдырмау үшін белсенді қысу процесін жүзеге асырады.

2.3 Компрессивті зондтау негізінде Сәттер әдісі CS-MoM (Compressive Sensing Method of Moments)

Сығымдалған зондтау әдісі электромагниттік шашыраудың моностатикалық мәселесін шешуде сәттердің әдісінің тиімділігін түсетін көздердің санын сығу арқылы айтарлықтай жақсарты алады. Алайда, экстенсивті және тығыз бұрыштық сынама алу жағдайында оқиға қоздыру матрицасының үлкен өлшемімен байланысты есептеу жүктемесі мәселесі туындайды. Бұл жұмыс 3D нысандарының моностатикалық электромагниттік шашырау мәселесін шешу үшін сығылуды сезінуге негізделген сәттер әдісінің

тиімділігін одан әрі жақсарту үшін адаптивті кросс-аппроксимация алгоритмін қамтитын екі қабатты қысу зондтау схемасын ұсынады. Ұсынылған схема жаңа инцидент көзі негізінде компрессивті зондтауда сәттер әдісі және қайта анықталған теңдеу негізінде компрессивті зондтауда сәттер әдісін будандастыруға негізделген. Біріншіден, сыртқы қабатта бастапқы сәулелену көздері жаңа сәулелену көздерін құру үшін қайта біріктіріледі. Содан кейін әрбір жаңа түсіру көзі үшін ағымдағы коэффициенттерді алу үшін қайта анықталған теңдеу негізінде ішкі қабатта компрессивті зондтауда сәттер әдісі үлгісі салынады. Ақырында, жаңа сәулелену көздері үшін ағымдағы коэффициенттер сыртқы қабатта детерминирленген емес жүйені құру үшін өлшеу мәні ретінде қабылданады, осылайша бастапқы ток коэффициенттерін қалпына келтіреді. Ұсынылған әдісте бастапқы қозу матрицасы шығарылады, содан кейін адаптивті кросс-аппроксимация алгоритмі арқылы екі кішірек матрицаға тез толтырылады, бұл қозу матрицасын толтыру тиімділігін айтарлықтай арттырады. Ұсынылған әдіс, әсіресе қозу матрицасын толтыру кезінде, жаңа оқиға көзіне негізделген унитарлы компрессивті зондтауда сәттер әдісімен салыстырғанда, есептеу тиімділігін айтарлықтай жақсартады. Ұсынылған әдістің тиімділігі мен тиімділігін көрсету үшін кейбір модельдеу нәтижелері ұсынылған.

Соңғы онжылдықта сығуды сезінуге негізделген компрессивті зондтауда сәттер әдісі [24] деп аталатын әдіс енгізілді. Бұл интеграция матрицалық теңдеулерді шешудің және көптеген қоздыру есептерін шешудің тиімділігін айтарлықтай жақсартты. Матрицалық теңдеуді шешуді жылдамдату тұрғысынан, кем анықталмаған теңдеу негізіндегі компрессивті зондтауда сәттер әдісі моделі кедергі матрицасының және қоздыру векторының кейбір жолдарын шығарып, қолайлы сирек токты орындау арқылы матрицалық теңдеуді компрессивті зондтау теориясын қанағаттандыратын жеткіліксіз анықталған жүйеге келтіреді. түрлендіру. Зерттеу нәтижесінде сипаттамалық режимдер арқылы құрылған сирек негіз және жалпыланған ортогональды сәйкестік іздеу (gOMP) қалпына келтіру алгоритмі арасындағы құрылымдық байланысқа негізделген, жоғарыда анықталмаған теңдеу келесіге түрлендірілді. шамадан тыс анықталған теңдеу негізінде қайта құру алгоритмін компрессивті зондтауда сәттер әдісі деп атайтын жалғыз ең кіші квадраттар операциясына дейін жеңілдететін артық анықталған жүйе. Сонымен қатар, бұл модель бекітілген қадамды іздеу стратегиясын жүзеге асыру арқылы есептеу нәтижесінің тұрақтылығын қамтамасыз етеді және үш өлшемді (3D) объектінің шашырау мәселелерін шешуде компрессивті зондтауда сәттер әдісі тиімділігін арттырады.

2.3.1 Екі қабатты қысуды сезіну жүйелері

Ұсынылған DL-CS-MoM моделі бағдарламаны екі бөлікке бөледі. Сыртқы қабат бастапқы сәулелену көздерімен жұмыс істейді және қозу векторларының санын айтарлықтай азайтатын жоғарыда аталған NCS-MoM

үлгісін пайдалана отырып, анықталмаған жүйені құрады. Ішкі қабат матрицалық теңдеулерді шешуді өңдеуді жылдамдату үшін қайта анықталған теңдеулер негізіндегі CS-МоМ моделін пайдаланады. Ішкі бағдарлама үшін принцип қайта анықталған жүйеге түрлендіру болып табылады, мысалы:

$$\tilde{Z}J\delta_i = \Theta\delta_i = \tilde{V}_i \quad (2.7)$$

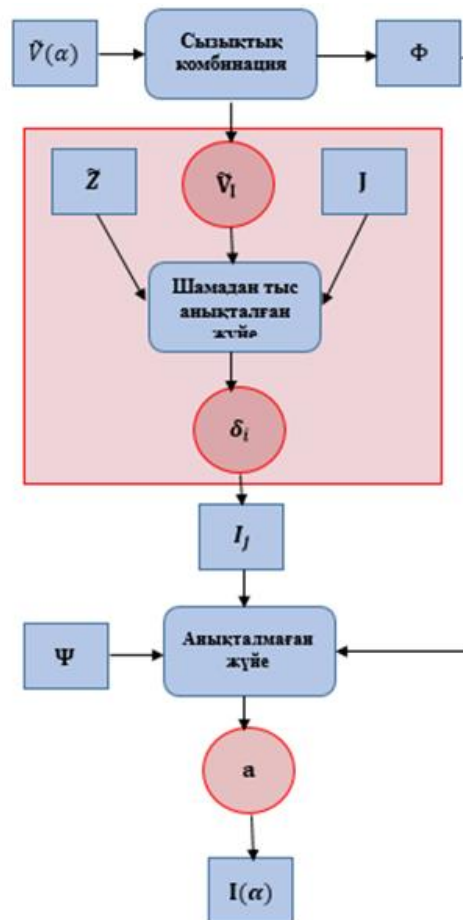
мұндағы, δ_i - I_i ағымдағы коэффициенттерінің J -ге проекциясы, яғни:

$$I_i = J\delta_i \quad (2.8)$$

Сонда ең кіші квадраттар әдісін қолданып, δ_i коэффициенттер векторының есебі келесі түрде шешіледі:

$$\delta_i = \frac{\Theta^* \tilde{V}_i}{\Theta^* \Theta} \quad (2.9)$$

мұндағы, $\tilde{V}_i$ – 2 конъюгаттық транспозициясы.



2.6 - сурет - Екі қабатты CS-МоМ моделінің құрылымдық сұлбасы

Ұсынылған DL-CS-MoM схемасы 2.6 - суретте көрсетілген.

Ішкі қабаттағы қайта анықталған теңдеулерге негізделген модель мен сыртқы қабаттағы жаңа оқиға көзіне негізделген модельдің қосындысы екі қабатты компрессивті зондтау құрылымын құрайтынын көруге болады.

2.4 Компрессиялық зондтауға арналған кейбір негізгі алгоритмдер

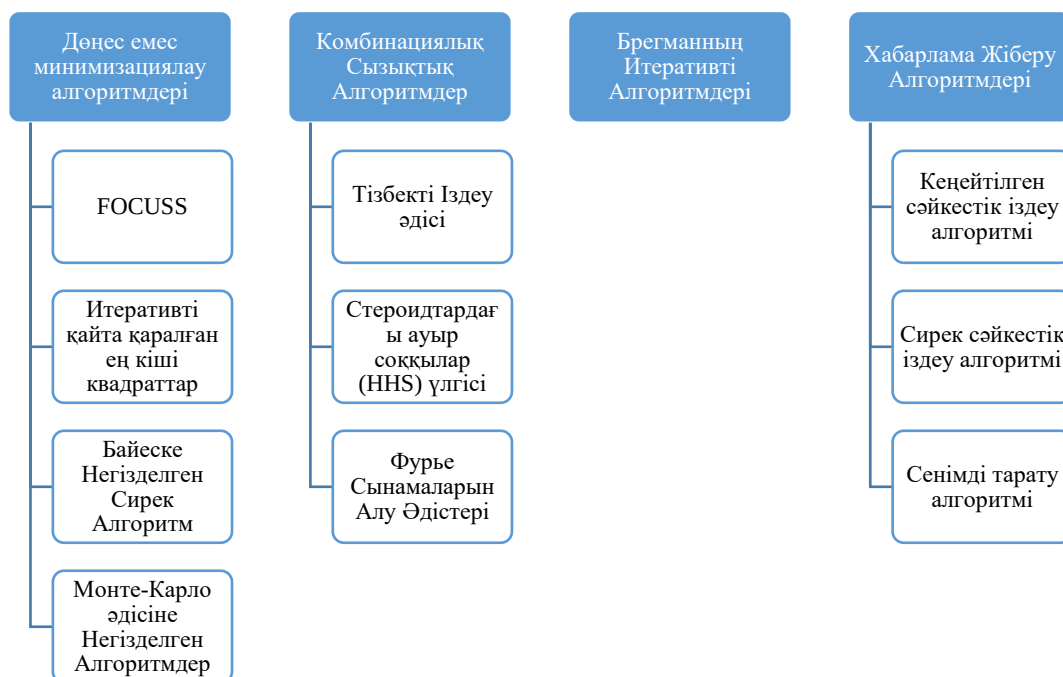
Компрессиялық зондтау - қазіргі уақытта әртүрлі салаларда кеңінен қолданылатын әдіс. Бұл салада қазірдің өзінде үлкен жұмыс атқарылды. Төменде әртүрлі зерттеушілер қысу және қалпына келтіру процесі үшін ұсынған кейбір Алгоритмдер берілген. Кестеде келтірілген жинау стратегиясының ерекшеліктері мен қолданылуы бар. Бұл алгоритмдердің кейбіреулері кестеде келтірілген. Барлық алгоритмдерде ерекше өлшеу матрицалары бар.

2.7, 2.8 – суреттерде көптеген параметрлер қарастырылған.

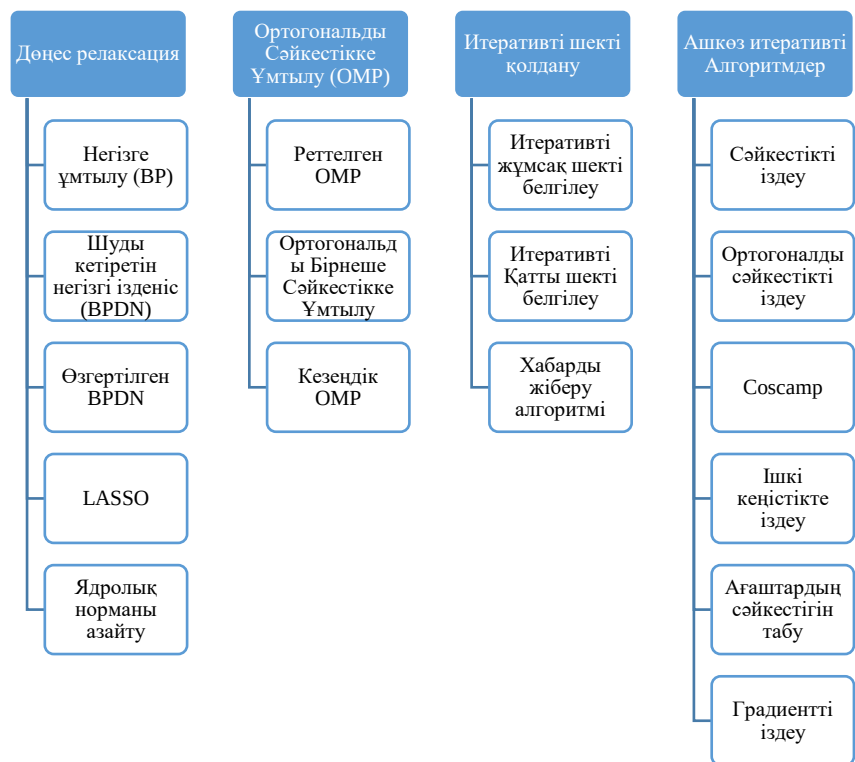
Жіктеу алгоритмінің күрделілігіне, қайта құру тиімділігіне және т. б. негізделген алгоритмдердің 8 түрлі санатына негізделген. Бұл 8 санатқа мыналар жатады:

Дөңес релаксация, ортогоналды сәйкестікті іздеуге негізделген Алгоритмдер, табалдырыққа негізделген итеративті Алгоритмдер, ашкөз Алгоритмдер, дөңес емес минимизация алгоритмдері, комбинациялық сублинарлы Алгоритмдер, хабарлама жіберу алгоритмдері, брегманның итеративті алгоритмдері.

Бұл алгоритмдердің одан әрі жіктелуі төмендегі кестелерде келтірілген.



2.7 - сурет – Қайта құру алгоритмдері



2.8 - сурет – Қайта құру алгоритмдері

3 Компрессивті зондтаудың типтік модельдері

Әрине, нақты әлемдегі үздіксіз сигналдардың көпшілігі белгілі бір артықшылыққа немесе корреляцияға ие, яғни олар беретін ақпараттың тиімді мөлшері, әдетте, сол жиілік диапазонында корреляцияланбаған сигналдар беретін максималды мөлшерден аз болады [25]. Бұған мысал ретінде дауысты сөйлеу сегменттері деп аталатын, көршілес бейне пикселдер, корреляцияланған ыдырайтын арналар конверттері және т. б. арасындағы корреляцияны келтіруге болады. Осылайша, тиісті дискретті уақыт сигналдарының тиімді еркіндік дәрежелерінің саны олардың мөлшерімен рұқсат етілгеннен әлдеқайда аз болуы мүмкін. Бұл дегеніміз, уақыт аймағындағы корреляцияланған сигналдар әдетте жиілік аймағындағы үлгілердің әлдеқайда аз санымен ұсынылуы мүмкін, өйткені корреляцияланған сигналдарда тек бірнеше маңызды емес төмен жиілікті компоненттері болады. Мысал ретінде синусоидалы сигналды келтіруге болады, ол жылдам Фурье түрлендіруімен түрлендірілгеннен кейін жиілік аймағында бір нөлдік емес тонмен ұсынылуы мүмкін. Мұны кейде энергиясын тығыздау қасиеті деп те атайды. Осы орайда компрессивті зондтау теориясы әр түрлі салаларда әзірленді және қолданылды, бұл сигналдың сиректігін классикалық Найквист іріктеу теоремасында талап етілгеннен аз үлгілер бойынша бастапқы сигналдың көшірмесін қалпына келтіру үшін қолдануға болатындығын көрсетеді.

Кесте 3.1 - Компрессивті зондтаудың типтік модельдері

Модель түрлері	Компрессивті зондтау модельдері	Математикалық өрнек	Иллюстрация
1 - модель	Стандартты компрессивті зондтау моделі	$y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s$	$\Theta = \Phi \Psi$
2 - модель	Сирек көріністер арқылы сигналдарды бөлу	$\tilde{y}$ $= \sum_{p=1}^p \Theta_p s_p$ $= \Theta_1 s_1$ $+ \sum_{p=2}^p \Theta_p s_p = \Theta s$	s_p және Θ_p сирек сигнал және p -мен өлшеу матрицасы, сирек кездесетін жалпы сигнал
3 - модель	Сирек сигнал блогы	$y = \Theta s$	$dL=N$, және $s T[1] 1 \leq l \leq L$ үшін нөлдік емес евклидтік норма

4 - модель	Көп векторлық өлшеу	$\{s_p\}_{p=1}^P$	$1 \leq p \leq P$ үшін s_p және ур - сәйкесінше p -бақылаумен байланысты сирек сигнал және өлшенген сигнал.
------------	---------------------	-------------------	---

Компрессивті зондтау теориясын қысқаша таныстыру үшін біз сирек кездесетін сигналды қарастырамыз $x \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ жұқару деңгейімен k (яғни x -де тек $k \ll n$ бар нөлдік емес элементтер), ол $\Phi \in \mathbb{C}^{m \times n}$ $m \ll n$ - мен байланысқан $y = \Phi x \in \mathbb{C}^{m \times n}$ өлшем матрицасымен сипатталады, мұндағы $y = \Phi x \in \mathbb{C}^{m \times n}$ - өлшенген сигнал. Компрессивті зондтау теориясында негізгі сұрақ y және Φ берілген $y = \Phi x$ теңдеулерінің анықталмаған жиынтығын шешу арқылы x -ты қалай қалпына келтіруге болады.

Жалпы жағдайда x сирек болмауы мүмкін, бірақ кейбір түрлендірілген доменде сирек болуы мүмкін, ол $x = \Psi s$ түрінде тұжырымдалады, мұндағы Ψ - түрлендіру матрицасы, ал s - сирек кездесетін сигнал k .

Осылайша, 3.1 – кестеден стандартты компрессивті зондтау моделін тұжырымдай аламыз. Сонымен қатар, кестеде стандартты компрессивті зондтау (1) моделінен кем емес маңызды модельдерді (2), (3) және (4) кестеден шығаруға болады, олар практикалық қосымшаларда сирек кездесетін кейбір ерекше қасиеттерді ескере отырып, сирек сигналдардың сенімді қысылуын және қалпына келуін қамтамасыз ете алады.

Нақтырақ айтсақ, (2) модель $s = [s_1^T, s_1^T, \dots, s_p^T]^T$ жиынтық сирек сигналын қалпына келтіру арқылы $\{\Theta_p\}_{p=1}^P$ әр түрлі өлшеу матрицаларымен байланысты бірнеше сирек сигналдарды бөлуге қабілетті; модель (3) кестеде көрсетілгендей s блоктық сиректігін пайдалану арқылы s бағалау тиімділігін жақсартуға қабілетті; (4) модель олардың бірдей / ішінара жалпы сиректік үлгісін пайдаланған кезде $\{s_p\}_{p=1}^P$ сирек сигналдарының p бағалау тиімділігін жақсартуға қабілетті.

Компрессивті зондтаудың стандартты моделін қарастыра отырып, біз оны теориясының келесі үш іргелі элементіне келеміз.

1) Сирек түрлендіру компрессивті зондтау үшін қажет, себебі қолайлы түрлендіру матрицасын табу Ψ бастапқы (сирек емес) x сигналын сирек s сигналына тиімді түрлендіруі мүмкін;

2) Сирек сигналды қысу Φ немесе $\Theta = \Phi\Psi$ конструкциясына жатады. Φ когеренттілік немесе Φ немесе Θ шектелген изометриялық қасиеті бойынша бағалануы мүмкін ақпараттың жоғалуын азайту кезінде өлшемдердің өлшемділігін азайтуы керек;

3) Сирек сигналды қайта құру алгоритмдері өлшенген y сигналынан x немесе s сенімді қалпына келтіру үшін маңызды. Атап айтқанда, сымсыз

байланыста кеңінен қолданылатын компрессивті зондтау алгоритмдерін келесі үш санатқа бөлуге болады.

Дөңес релаксация алгоритмдері, мысалы, негізді іздеу, сондай-ақ негізді іздеуде - шу және т.б. компрессивті зондтау мәселесін дөңес оңтайландыру мәселесі ретінде тұжырымдап, оны CVX (кез келген есептерді шешуге арналған пакет) сияқты дөңес оңтайландыру бағдарламалық құралын пайдалана отырып шеше алады. Мысалы, 3.1 - кестедегі (1) үлгісіне арналған компрессивті зондтау есебін келесі формула түрінде квадраттық бағдарламаның Лагранж релаксациясы ретінде тұжырымдауға болады.

$$\hat{s} = \arg \min_s \|s\|_1 + \lambda \|y - \Theta s\|_2, \quad (3.1)$$

мұндағы, $\|\cdot\|_1$ және $\|\cdot\|_2$ сәйкесінше l_1 - норма және l_2 - норма операторлары және $\lambda > 0$, ал алынған алгоритмдер BPDN тобына жатады. Бұл алгоритмдер әдетте өлшемдердің аз санын талап етеді, бірақ олар күрделі, мысалы, негізді іздеу алгоритмінің күрделілігі $O\left(m^2 n^{\frac{3}{2}}\right)$ тәртібінде.

Ашкөз итеративті алгоритмдер тіректердің жиынтығын ашкөз итеративті түрде анықтайды. Олардың күрделілігі төмен және қалпына келтіру жылдамдығы жоғары, бірақ сигналдар өте сирек болмаған кезде өнімділікті жоғалтудан зардап шегеді. Бұл алгоритмдердің өкілдері күрделілігі $O(kmn)$ болатын Orthogonal Matching Algorithms (OMP), CoSaMP және Subspace Search (SP) алгоритмдері болып табылады [26].

Сирек Байездік оқыту және болжалды хабарды жіберу сияқты Байездік қорытынды алгоритмдер априори сиректеуді ескере отырып, Байестік перспективадан сирек белгісіз сигналды шығарады. Бұл алгоритмдердің күрделілігі адамнан адамға өзгереді. Мысалы, сенімнің таралуын пайдалана отырып, Байездік қысу сезгіштігінің күрделілігі мысалы, MMV [27] моделіне бейімделген топтық сирек BPDN, бір мезгілдегі OMP (SOMP) және топтық сирек Байестік компрессивті зондтау алгоритмдері перспективалы болып табылады.

Компрессивті зондтау теориясы 2004 жылы пайда болғаннан бері ол кеңінен дамыды, кеңейтілді және практикалық жүйелерге қолданылды. Осылайша, Эльдар зерттеу тобы компрессивті зондтау теориясына негізделген MIMO, CR, UWB және т.б. радарлардың прототиптерін ұсынды [28]. Күмәнсіз, дамып келе жатқан компрессивті зондтау теориясы бізге суб-Найквисттік іріктеу жылдамдығын қолдануға қарамастан сигналды қайта құрудың революциялық құралын береді. Сондықтан жаңа 5G сымсыз желілерінде компрессивті зондтау теориясын пайдалану қызу зерттеу тақырыбына айналды. Сымсыз желілердің барлық аспектілерінің тән сиректігін зерттеу және пайдалану арқылы біз тиімдірек 5G желілерін жасай аламыз.

3.1 Нақты синусоидтың жиілігін компрессиялық бағалау үшін тиімді зондтау

Ең кіші квадраттар әдісімен жиілікті бағалаудың сызықтық әдістері танымал, өйткені олар тұйық пішінге ие және оларды орындау оңай. Дегенмен, олар қайта құрудан кейін ғана қысу жиілігін бағалау үшін қолданылады. Себебі компрессивті зондтау бастапқы синусоидалы үлгілердің уақыт тәртібін бұзады. Бұл сәйкестік компрессивті зондтау үлгілерін алу үшін тиімді оқу схемасын ұсынады. Олар Найквист жиілігі бар сигнал үлгілерінің қосындылары. Матрицаны көбейту және кездейсоқ модулятордың алдын-ала интеграторы қажет емес. Ең кіші квадраттар әдісімен өзгертілген бағалау әдісі жиілікті қайта құрусыз сығымдау кезінде алынған үлгілерден тікелей бағалауға мүмкіндік береді. Бұл бағалаудың дәлдігі екі мысалда көрсетілгендей теориялық төменгі шекараға сәйкес келеді.

Көптеген синтетикалық және табиғи сигналдар синусоидалы пішінге ие және синусоидалық жиілікті бағалау әртүрлі салаларда зерттеу тақырыбы болып табылады. Жиілікті бағалауды қажет ететін радиолокация, сонар және байланыста көптеген мысалдар бар. Радар немесе сонар жаңғырығының ығысқан тасымалдаушы жиілігін бағалау мақсатты доплерді анықтауға мүмкіндік береді, ал кейбір кең таралған спектрге қарсы жүйелер секіру жиілігін бағалау компонентін қамтиды.

Кең жолақты электронды қабылдағыштары іріктеудің жоғары жылдамдығын және жадының үлкен көлемін қажет етеді. Деректерді жинауға компрессивті зондтау тәсілі іріктеу жылдамдығын және деректер өлшемін азайтуға мүмкіндік береді. Компрессивті зондтаусыз және оны пайдаланған кезде алынған үлгілер сәйкесінше бастапқы үлгілер және компрессивті зондтаудың үлгілері болсын. Бастапқы үлгілерінен бағалауға арналған жиілікті бағалау құралы әдетте компрессивті зондтау үлгілеріне қолданылмайды. Бұл қысу зондтау үлгілерінің бастапқы үлгілердегі уақыт тәртібін сақтамауымен байланысты. Оның орнына олар бастапқы үлгілердің өлшенген қосындысы болып табылады.

Айқын нұсқа - алдымен компрессивті зондтау үлгілерінен сигналды қайта құру, содан кейін келу бағытына қарсы бағалау. Дегенмен, қайта құрастырылған үлгілерден жиілікті бағалаудың үш кемшілігі бар:

- 1) Сызықты емес қайта құру процесі көп уақытты қажет етеді;
- 2) Нақты жиілік үздіксіз. Дегенмен, қайта құрастырылған жиілік дискретті жиілік негіздерінің жиынтығына жатады. Егер олардың арасында сәйкессіздік болса, онда азайтылмайтын қателер маңызды болуы мүмкін;
- 3) Әдетте, сигнал ақ гаусс шу (АГШ) қоспасын қамтиды. Алайда, реконструкцияланған үлгілерде бұл қасиет жоқ. АГШ негізіндегі бағалаулар енді оңтайлы емес және біржақты болуы мүмкін.

Артық кетуді болдырмаудың бір жолы - шығындар функциясын азайтатын тор жиілігін табу. Бұл функция тор жиілігінен жасалған компрессивті зондтау үлгілері мен өлшемдерден алынған үлгілер арасындағы

айырмашылықты өлшейді. Жиілік рұқсаты шығындар функциясының Ньютондық минимизациясы [29], немесе тор нүктелері арасындағы куб интерполяциясы арқылы жақсарады. Жоғарыда талқыланды ақ гаусс шу (АГШ) N көмегімен ол синус толқынына емес, тек компрессивті зондтау өлшемдеріне қосымша болатынын ескеруіміз керек.

3.1.1 Компрессивті зондтау негіздері

Сирек сигнал s бейнесіне ие, ал сиректік нөлдік емес элементтер санына тең. Мысалы, элементтері жиілігі ω_3 синусоидының үлгілері болып табылатын $s = [\cos \omega_1, \cos \omega_2, \cos \omega_3, \dots, \cos \omega_{N-1}]^T$ сигналының сирек көрінісі бар.

$$\Phi = \begin{bmatrix} \cos \omega_0 0 & \cos \omega_1 0 & \dots & \cos \omega_{L-1} 0 \\ \cos \omega_0 1 & \cos \omega_1 0 & \dots & \cos \omega_{L-1} 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos \omega_0 (N-1) & \cos \omega_1 (N-1) & \dots & \cos \omega_{L-1} (N-1) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

және

$$\alpha = [000100 \dots 0]^T \quad (3.3)$$

Компрессивті зондтау өлшемі s арқылы берілген s өлшемді қысқартылған сызықтық түрлендіру болып табылады

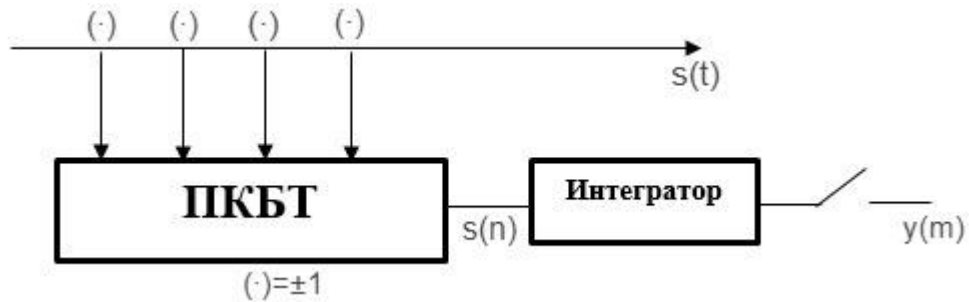
$$y = As = A\Phi\alpha \quad (3.4)$$

мұндағы y -ден s қалпына келтіру (қайта құру) алдымен (3.3) - формуладан α -ны, содан кейін (3.4) - формуладан s -ті табу арқылы жүзеге асады. (3.2) – формуласында басқа теңдеулерге қарағанда белгісіздері көп, сондықтан α үшін бірегей шешім жоқ. Дегенмен, α сирек болғандықтан, минимизациялау арқылы бір бірегей жуық шешімді алуға болады

$$\alpha = \min \sum_{i=0}^{L-1} |\alpha_i|, \quad (3.5)$$

$$y = A\Phi\alpha \quad (3.6)$$

мұнда y - тен s -тің идеалды қалпына келуі мүмкін, егер A және белгілі бір математикалық шарттарды қанағаттандырса. Сонымен қатар, үлгілердің (немесе өлшемдердің) саны, M саннан көп болуы керек, оның мәні α сиректігіне байланысты.



3.1 - сурет - Төрт ПКБТ бір уақытта $s(t)$ көбейтетін интегратор

Компресситві зондтау теориясы сонымен қатар Найквист жиілігінен төмен сирек аналогтық сигналдың үлгілерін алуға негіз береді. Бұл компресситві зондтау үлгілерін ОЖ-ны қабаттастырмай қалпына келтіру үшін пайдалануға болады. Бұл CS іріктеу схемасын жүзеге асырудың бірнеше жолы бар, ең көп таралғаны RMPI. Ол псевдокездейсоқ бит тізбегі (PRBS) генераторынан, көбейткіштерден, интегратордан және іріктеушіден тұрады. RMPI алдымен аналогтық сигналды $s(t)$ PRBS арқылы көбейтеді, өнімді біріктіреді, содан кейін бір компресситві зондтау үлгісін шығару үшін интегратор шығысын үлгілейді.

3.1-суретте мысал ретінде төрт ПКБТ бір уақытта $s(t)$ көбейтетін интегратор көрсетілген. Интегратор шығысы 4 бит сайын бір рет жиілікте таңдалады. Осылайша, әрбір КЗ үлгісі төрт ОЖ-ның өлшенген (± 1 -ге тең) сомасын білдіреді. А зондтау матрицасы пішінге ие

$$A = \begin{bmatrix} (\cdot)(\cdot)(\cdot)(\cdot) & 0_{1 \times 4} & \cdots & 0_{1 \times 4} \\ 0_{1 \times 4} & (\cdot)(\cdot)(\cdot)(\cdot) & \cdots & 0_{1 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{1 \times 4} & 0_{1 \times 4} & \cdots & (\cdot)(\cdot)(\cdot)(\cdot) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Қорытындылай келе, компресситві зондтау үлгілерін алудың екі жолы бар: s өлшемді түрде азайтылған ОЖ түрлендіруі болып табылатын компресситві зондтау пайдалану және қысу дискретизациясын пайдалану, яғни Найквист жиілігінен төмен аналогтық сигналды таңдау [30].

3.2 Жиілік-айырмашылықтың келу бағытын DOA (Direction of arrival) бағалаудың негізгі идеялары

Компресситві зондтауда жиілік-айырымдылық келу бағытын бағалау (Compressive Frequency-Difference Direction-of-Arrival (DOA) Estimation) әдісі кең жолақты сигналдардың келу бағытын анықтауда кеңінен қолданылады. Бұл әдіс жиілік айырмашылығын пайдаланып, кеңістіктік алиасинг әсерін

азайтады және кең жолақты сигналдарды төменгі жиілікте өңдеуге мүмкіндік береді.

3.2.1 Жиілік-айырмашылықта сигналдың келу бағалауының негізгі идеялары

Жиілік айырмашылығының сәулеленуі кезінде кең жолақты сигналдар бірнеше жиіліктерде ақпарат тасымалдайды және әр жиілік компонент кеңістікте әртүрлі фазалық ауысымға ие бола алады.

Жиілік айырмашылығын (Difference Frequency) қолдану арқылы кеңістіктік фазалық өзгерістер төмендетіледі, бұл өлшеу мен есептеуде тиімділік береді.

Компрессивті зондтау (Compressive Sensing): Сигналдардың сиректілігі принципіне негізделеді, яғни DOA спектрі аз мөлшерлі белсенді бағыттарды қамтиды. Өлшеулердің аз саны сигналды толық қалпына келтіруге жеткілікті. Кең жолақты сигналдарды өңдеу кезінде төменгі жиіліктегі айырмашылықтар арқылы кең жолақты ақпараттың өңдеу кешенділігі азаяды. Ал кеңістіктік алиасинг әсерін азайту үшін жоғары жиілікті компоненттер төмен жиілікте өңделеді.

Жиілік-айырмашылық сигналы төмендегідей сипатталады:

Сигнал моделі: Кең жолақты сигналдарды белгілі бір жиілік диапазонында сипаттаймыз. Егер f_1 және f_2 сигналдың екі жиілігі болса, онда айырмашылық жиілігі:

$$f_d = f_2 - f_1 \quad (3.7)$$

мұнда f_d төменгі жиілікті жаңа сигналдың параметрі болып табылады. Өлшеу кезінде кеңістік бағыттары үшін сигнал

$$y = \Phi x + n \quad (3.8)$$

мұндағы, y – өлшеу векторы; Φ - кездейсоқ проекциялық матрица; x - ізделінетін бағыт (DOA спектрі); n – шу.

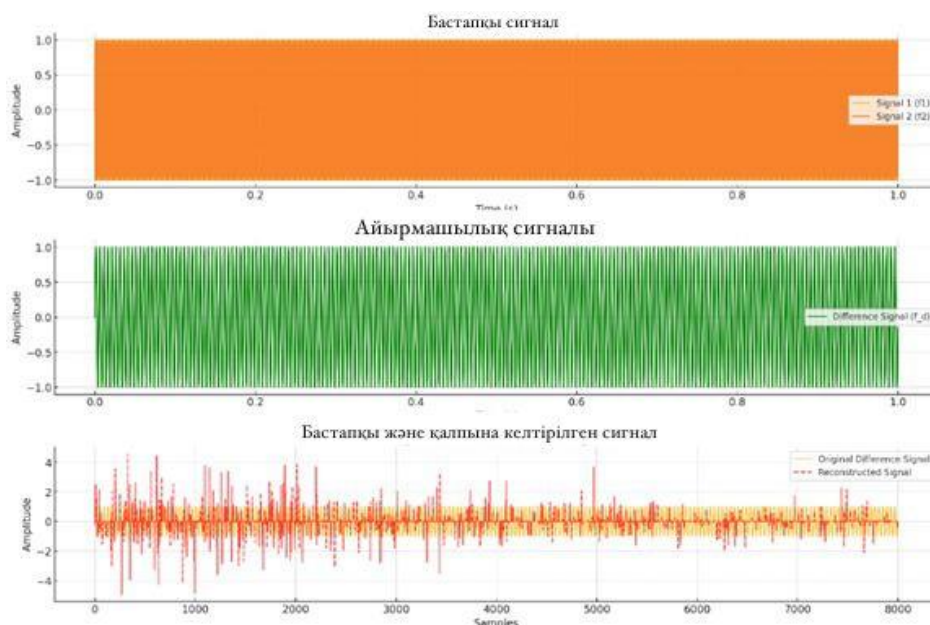
Осы сигналды қалпына келтіру үшін l_1 – норманы минимизациялауды қолданамыз:

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_1 \quad \text{шарт: } \Phi x = y \quad (3.9)$$

Бұл жаңа жиілік компонент кеңістіктегі фазалық ақпаратты төмендетеді және сигналдың кеңістіктегі таралу бағыттарын тиімді анықтауға мүмкіндік береді. Сигналдардың сиректілігі кеңістіктік спектрде сигналдар аз ғана бағыттарда энергиясы бар. Мысалы, бірнеше нүктелік көздерден таралған сигналдар DOA спектріnde сирек таралған болады.

Өлшеулердің аздығы есебінен аз орындалған деректерді толық спектрді қалпына келтіру үшін пайдаланады.

3.3 – суреттегі графикте кең жолақты жиілік сигналдарының бастапқы формасы мен олардың жиілік айырмашылығы көрсетілген: Бұл график үш сигналды көрсетеді: f_1 , f_2 , және олардың жиілік айырмашылығын f_d . f_d төменгі жиілікті болғандықтан, ол кеңістіктік алиасингті төмендетуге мүмкіндік береді.



3.2 - сурет – Кең жолақты жиілік сигналдарының бастапқы формасы мен олардың жиілік айырмашылығы (Python бағдарламасы терезесі)

Графикте келесі нәтижелер көрсетілген:

1. Бастапқы сигнал : Екі бастапқы жиіліктегі сигналдар $f_1=1000$ Гц және $f_2=1200$ Гц);
2. Айырмашылық сигналы: Айырмашылық жиілігінің сигналы $f_d=200$ Гц, ол кеңістіктік таралу үшін төменгі жиілікте өңделеді;
3. Бастапқы және қалпына келтірілген сигнал: Компрессивті зондтау арқылы алынған бастапқы айырмашылық сигналы мен қайта қалпына келтірілген сигналдың салыстырмасы. Қалпына келтірілген сигнал бастапқыға өте жақын.

3.3 Қолданыстағы зерттеу нәтижелерін талдау және салыстыру

[31] жұмыста сығылған зондтау радарына негізделген объектіні анықтауға бағытталған. Өз жұмысында олар қысылған зондтау үшін кеңістіктік домен MIMO радар массивін пайдаланып нысананы қалай локализациялау керектігін көрсетеді және әртүрлі мақсаттар туралы білімді қажет ететін Multi-Branch Matching Pursuit (MBMP) алгоритмін ұсынады.

MBMP алгоритмінің үстінде автор нысананы анықтаудың теориялық моделін ұсынады, оның соңғы әдіспен салыстырғанда артықшылықтары бар.

Ол көптеген өлшем векторларының барлық жиынтықтарын қамтиты бейімделу қасиетіне ие және жалған дабыл жағдайларын, сондай-ақ анықтау ықтималдығын тудыратын деректерді қамтамасыз етеді. Бұл әдіс кез келген сезгіш матрицаны баптаудың өзіндік артықшылығына ие. Автор бір сезгіш матрица ішінде нысанды анықтаумен байланысты l_1 норма мәселесін шешу үшін Кешенді шамамен хабарды жіберу (CAMP) үлгісін пайдаланды. Авторлар сығымдауды талдау үшін анықтау құрылымын ұсынды, онда олар белгісіз параметрлерді пайдаланды.

Зау Х. мен Росин П.Л. ұсынған [32] жылдам градиенттік компрессивті зондтау әдісі шулы бейне және сурет сигналдарын өңдеу үшін ұсынылған. Олар сигналдарды сиректеу үшін ортогоналды түрлендіруді қолданған, содан кейін сигналды қайта құруды жаңа градиенттік әдіспен біріктірілген дөңес оңтайландыру мәселесін шешу арқылы жүзеге асырған. Авторлардың мақсаты – шулы бейне және суреттер сигналдарын қалпына келтіру мәселелерін анықтау. Содан кейін, олар градиенттік компрессивті зондтаудың есептеу тиімділігін қалай арттыруға болатынын көрсетеді. Бұл стратегияда шулы сигналдың дөңес оңтайлануын сипаттайтын Липшиц градиентінің итерациялық параметрі Липшиц тұрақтысымен алмастырылған. Бұл әдіс басқа классикалық алгоритмдерге қарағанда тиімдірек нәтиже көрсетуге қабілетті.

Упадхья В. жартылай жиілік коэффициентінен компрессивті зондтауға негізделген W -норма үлгісін ұсынды [33]. Олар шектеулері бар оңтайлы дөңес мәселені шешіп, жоғары өлшемді сигналды қайта құрды. Бұл стратегия жиіліктің төмен және жоғары компоненттерінің тиімділігін сақтап, басқарып, іріктеу метрикалары мен сигналдарды (бейне немесе сурет сигналдары) қалпына келтіру арасындағы байланыстарды шешеді. Интерполяция әдісі жиілік туралы толық емес ақпарат болған кезде фильтрлермен біріктіріліп қолданылады және суреттер/бейне кадрларын қайта құру үшін жартылай жиілік коэффициенттерінен қалпына келтіру жүзеге асырылады. Бұл әдістің басты мақсаты – гибриді әдістердің артефактілерін азайту. Зерттеу жоғары дискретті косинустық түрлендіру (DCT) мен Винер әдісінің негізгі мәселесі болып табылатын сақина әсері және контурлық әсер сияқты әртүрлі әсерлерден аулақ болуға бағытталған. Бұл әдіс компрессивті зондтаудың басқа әдістері мен гибриді әдіспен салыстырғанда PSNR және SSIM көрсеткіштері бойынша жоғары нәтиже береді.

SRM (Structured Random Matrix) басқа кездейсоқ метрикалармен салыстырғанда нақты уақыттағы компрессивті зондтау қосымшалары үшін тиімдірек. Зерттеу SRM-ге қатысты бірнеше тәсілдерді қамтиды, себебі ол теорияға сәйкес жылдам сандық есептеулерді қамтамасыз етеді. Бұл әдіс блокқа негізделген өңдеуді қолдайды. Сондықтан, жоғары деңгейде үйлеспеушілікке ие сиректеу негізімен жақсырақ жуықтау зондтау матрицасы қажет. Мұнда зондтау матрицасының жолдық компоненттері сиректеу негізінде ешқандай көрініске ие болмайды. Өкілдік және негіз матрицалары

арасындағы үйлесімсіздікті есептеу үшін өзара үйлесім коэффициенті қолданылады. Гаусс немесе Бернулли сияқты субгаусстық таралым кездейсоқ проекция немесе кездейсоқ айнымалылар матрицасын береді, бірақ олар танымал зондтау метрикалары болып саналмайды. Зондтау матрицасының негізгі қасиеті – сигналды оның бастапқы доменінде, маңызды ақпаратты немесе зондтау тиімділігін жоғалтпай сезініп, түсіру қабілеті.

Кесте 3.2 - Әдебиеттерге шолуды салыстырмалы талдау

Жұмыстың мақсаты	Қолданылатын эксперименттік сигнал	Қайта құру үшін қолданылатын Алгоритм	Нәтиже/шығыс ретінде пайдаланылатын параметрлер
Әртүрлі сенсорлардан алынған өлшемдерді біріктіру	Әр түрлі нұсқалары бар спутниктік сурет	l_1	Әртүрлі спутниктік суреттермен прогрессивті декодтау мен кәдімгі декодтауды салыстыру.
Дыбыстық сигналдар үшін қысуды сезінуді қолдану	Әртүрлі дыбыстық сигналдар, мысалы, керней, сөйлеу және т.б.	OMP	Әртүрлі дыбыстық сигналдардың қуат спектрі және SNR графигі.
Төмен қоздырылған сигналдарды сығымдау арқылы сезіну.	Сөйлеу сигналдары	Сәйкестіктерді табу және ортогональды сәйкестіктерді табу	SNR мен өлшемдер арасындағы графиктер, әртүрлі сигналдар үшін орташа SNR.
Құрылымдық сығымдауды анықтау және оның қолданылуы	Түрлі кескін сигналдары	CoSaMP	Сигналды қалпына келтіру үшін алгоритмдік және теориялық тәсілдер қолданылады.
КЗ үшін әртүрлі параметрлерді бағалау	AWGN әсер ететін әртүрлі сигналдар	OMP	Изометрия қасиетінің негіздемесі.
Белгісіз параметрі бар компрессивті сезіну	Мақсатты анықтау сигналы	Көп салалы сәйкестік іздеу [MBMP]	Қысымды сезіну арқылы мақсатты анықтаудың соңғы және дәл талдауы

3.2 – кестенің жалғасы

Сөйлеу және музыкалық сигналдарды компрессивті түрде қайта құру	Фортепиано түріндегі музыкалық сигнал және сөйлеу сигналы.	DCT домені DST домені	1)Реконструкцияланған сигналды уақыт және жиілік облыстарында көрсету. 2) Бастапқы және қайта құрастырылған сигнал үшін MSE есебі.
Сығылған зондтау және оны сирек желіні қайта құруда пайдаланудың жүйелік перспективасы	Аудио, сурет және бейне сигнал	Сәйкестік және ортогоналды сәйкестік іздеу.	Sparse Network қайта құру мәселесін шешу.

4 Компрессивті зондтау арқылы сигналды қалпына келтіру әдісінің басты артықшылықтары

Компрессивті зондтау (Compressive Sensing, CS) — үлкен көлемдегі деректерді аз өлшеммен жинауға және оларды кейін қалпына келтіруге мүмкіндік беретін инновациялық әдіс. Бұл әдістің бірнеше басты артықшылығы бар:

1. Өлшеулер санын азайту:

— Компрессивті зондтау сигналды толық өлшемді емес, аз өлшемді деректер негізінде қалпына келтіруге мүмкіндік береді;

— Бұл әсіресе үлкен көлемді деректер мен жоғары жиілікті сигналдар үшін маңызды. Егер дәстүрлі әдіспен 1000 өлшеу қажет болса, компрессивті зондтау арқылы бұл санды 200-ге дейін азайтуға болады.

2. Есептеу тиімділігі:

— Кәдімгі сигналды өңдеу әдістерімен салыстырғанда компрессивті зондтау есептеулерді азайтады. Бұл әдіс өз кезегінде:

— Жылдамырақ процессингті қамтамасыз етеді;

— Қажетті есептеу ресурстарын азайтады. Деректерді сақтау және өңдеу үшін аз ресурстар қажет.

3. Шуды басу және төзімділік:

— Компрессивті зондтау шуға төзімділігімен ерекшеленеді;

— Сигналдың маңызды компоненттері қалпына келтіріліп, шу әсерінен болатын қателіктер минималды деңгейде болады. Радиолокацияда немесе медициналық кескіндерді өңдеуде компрессивті зондтау арқылы сапалы сигнал алуға болады.

4. Сирек сигналдарды қалпына келтіру:

— Компрессивті зондтау, яғни сирек кездесетін сигналдарды тиімді қалпына келтіру үшін ерекше пайдалы;

— Бұл әдіс деректердің маңызды компоненттерін таңдап, аз көлемді деректерден толық сигналды қалпына келтіреді. Биологиялық сигналдарды немесе бейнені қалпына келтіруде разреженность жиі кездеседі.

5. Мәліметтерді жинаудың төмен құны. Компрессивті зондтау сенсорлар санын азайтуға мүмкіндік береді, бұл жабдықтың құнын төмендетеді. Жоғары ажыратымдылықты кескіндерді жинау үшін аз көлемдегі сенсорлар қолданылады.

6. Көпсалалық қолдану мүмкіндігіне келсек, компрессивті зондтау көптеген салаларда қолданылады, мысалы:

— Медициналық бейнелеу (МРТ, КТ);

— Радиолокация және спектрлік анализ;

— Биомедициналық сигналдар (ЭКГ, ЭЭГ);

— Жасанды интеллект және деректерді қысу;

— Сымсыз жүйе (желі оптимизациясы).

7. Динамикалық сигналдарды өңдеу. Компрессивті зондтау уақыт бойынша өзгеретін сигналдарды, әсіресе тез өзгеретін динамикалық

сигналдарды тиімді өңдейді. Қозғалыстағы объектілерді радиолокация арқылы бақылау.

8. Төмен өлшеу жылдамдығы. Дәстүрлі әдістерде үлкен өлшемдегі сигналды өңдеу үшін жоғары жылдамдық қажет. Компрессивті зондтау арқылы өлшеу жылдамдығын төмендетуге болады. Медициналық томографияда кескін алу уақыты азаяды.

Осы артықшылықтарды қорытындылай келе, компрессивті зондтау технологиясы, әсіресе, деректерді қысу, қайта өңдеу және сирек сигналдарды талдау салаларында жоғары тиімділік пен ресурстарды үнемдеуді қамтамасыз етеді. Бұл әдіс аз ресурстармен үлкен ақпараттық көлемді өңдеуді қажет ететін заманауи жүйелер үшін таптырмас құрал болып табылады.

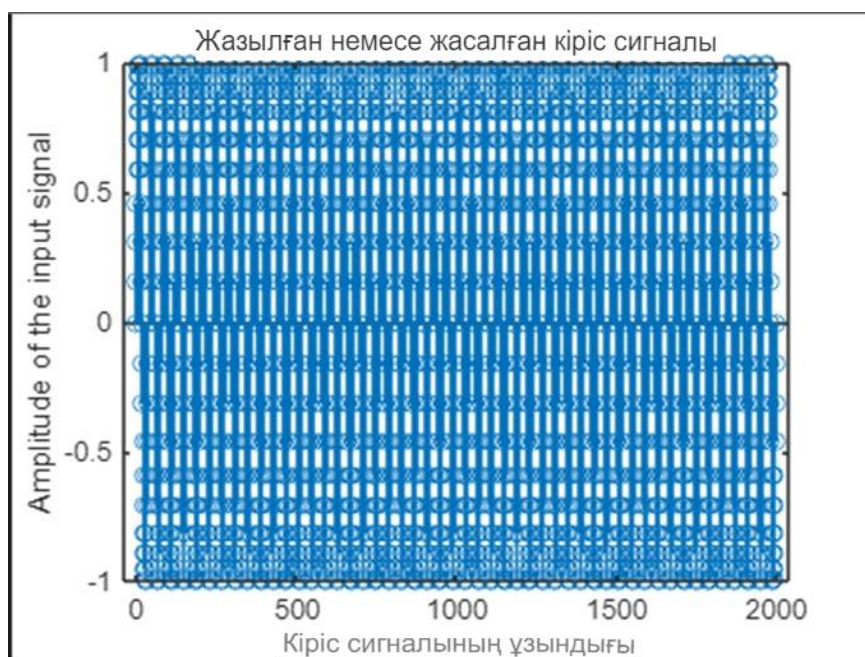
4.1 Деректер жылдамдығын арттыру үшін сымсыз жүйеде компрессивті зондтау әдісінің моделі

Бұл тарауда деректер жылдамдығын арттыру үшін сымсыз жүйеде қысуды зондтауды қолдану ұсынылады. Мақсат-ағымдағы және мүмкін болашақ сымсыз жүйелердегі деректер жылдамдығын арттыру. Ұсынылған жүйеде сигнал компрессиялық зондтау арқылы Nyquist жиілігінен төмен таңдалады. Содан кейін Сығылған спектр сымсыз жүйе арқылы беріледі және маңызды ақпаратты жоғалтпай қабылдағышта сәтті қалпына келтіріледі. Жобаның бірінші кезеңінде сигнал 4.1 - суретте көрсетілген кездейсоқ Лаплас сандар генераторының көмегімен модельденді. Сигналды модельдеу үшін Лаплас сандар генераторын пайдалану туралы шешім қабылданды, өйткені мұндай типтегі сигналдар әдетте лапласиандық үлестірімге ие.

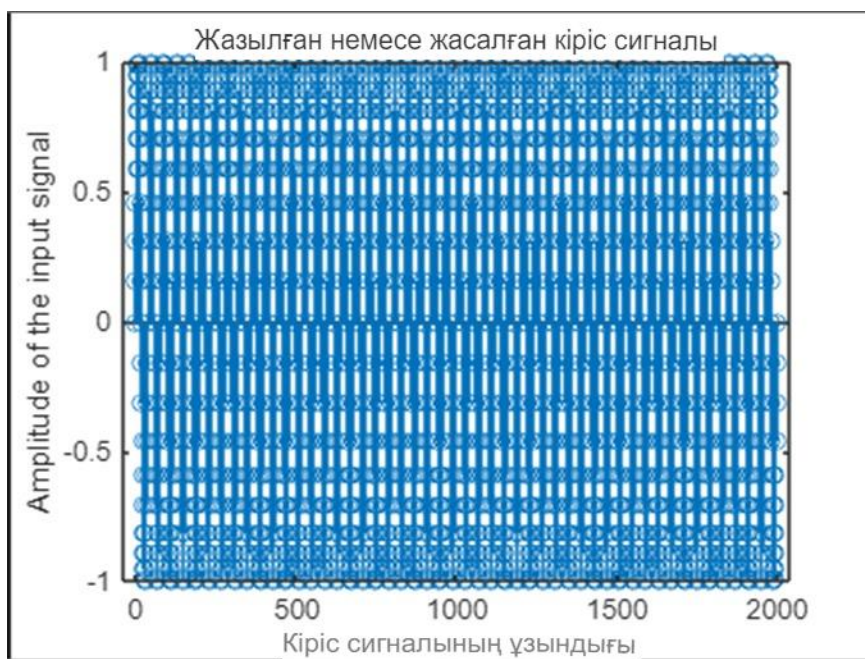
Модельденген сигнал FFT көмегімен дискретті жиілік аймағына түрлендірілді. Осы түрлендіруден алынған нәтижелер 6-суретте көрсетілген. Екінші кезеңде сигналға компрессиялық зондтауды қолданар алдында сигнал үшін маңызды коэффициенттерді жою үшін шекті терезе қолданылды. Басқаша айтқанда, кіші амплитудасы бар барлық коэффициенттер нөлге көбейтілді. 4.2 - суретте шекті қолданғаннан кейін FFT спектрі қалай көрінетіні көрсетілген. Компрессивті зондтаудың мақсаты - FFT спектрінің сирек болуын қамтамасыз ету.

Үшінші кезеңде шекті спектр кездейсоқ сандардан тұратын матрица болып табылатын өлшеу матрицасына көбейтіледі. Сығымдау зондтау алгоритмінің шығыс сигналы мобильді жүйеге беру үшін аналогты-цифрлық түрлендіргіш арқылы цифрлық сигналға түрлендіріледі. Қабылдау бөлігінде өлшеу матрицасы мен бақылау векторын (векторлық сигнал) қолдана отырып, кіріс сөйлеу сигналына жақын бастапқы болжам жасалды. Ақырында, сөйлеу сигналы қол жетімді оңтайландыру әдістерінің бірімен айтарлықтай аз бақылаулардан қалпына келтірілді. Оңтайландыру Модулінің шығысындағы қалпына келтірілген сигнал 4.3 - суретте көрсетілген. Нақты сигнал мен

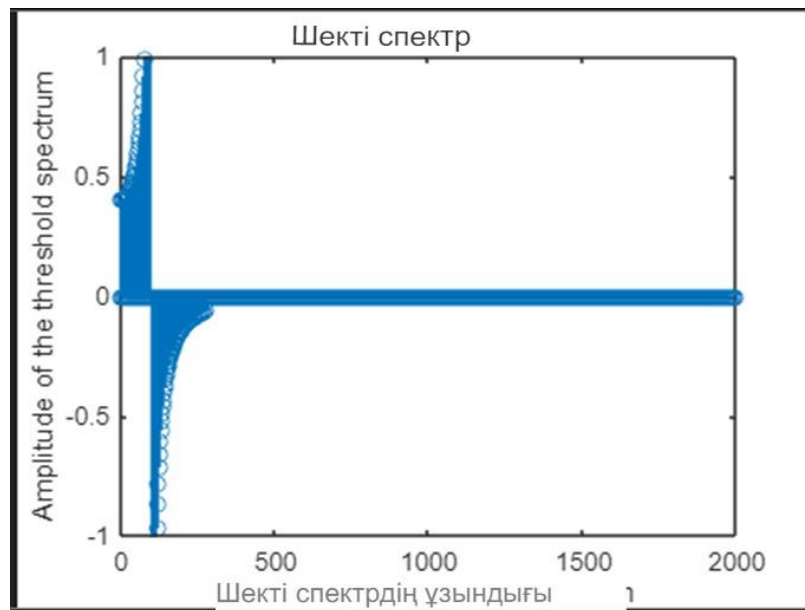
қалпына келтірілген сигнал арасындағы айырмашылық екі сигнал арасындағы қатені (4.4 – суретті қараңыз) көру үшін есептелген [34].



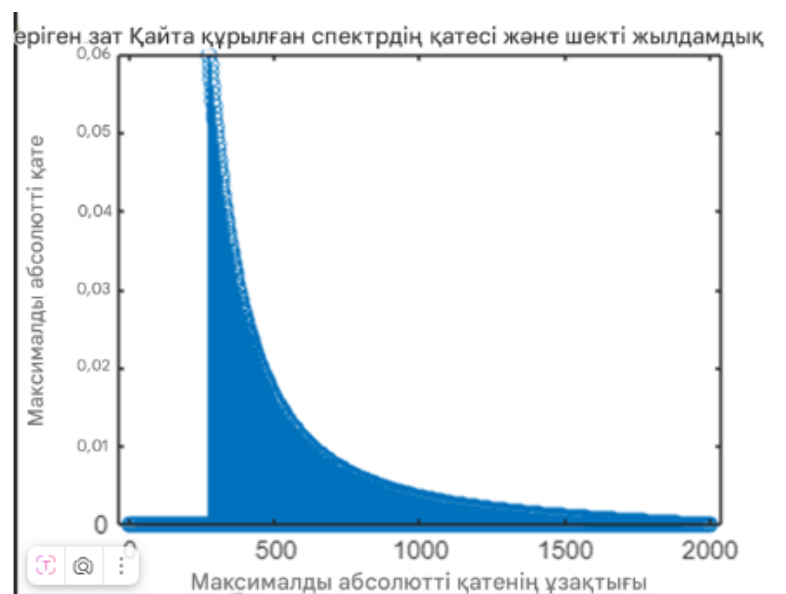
4.1 - сурет - Кіріс сигналы



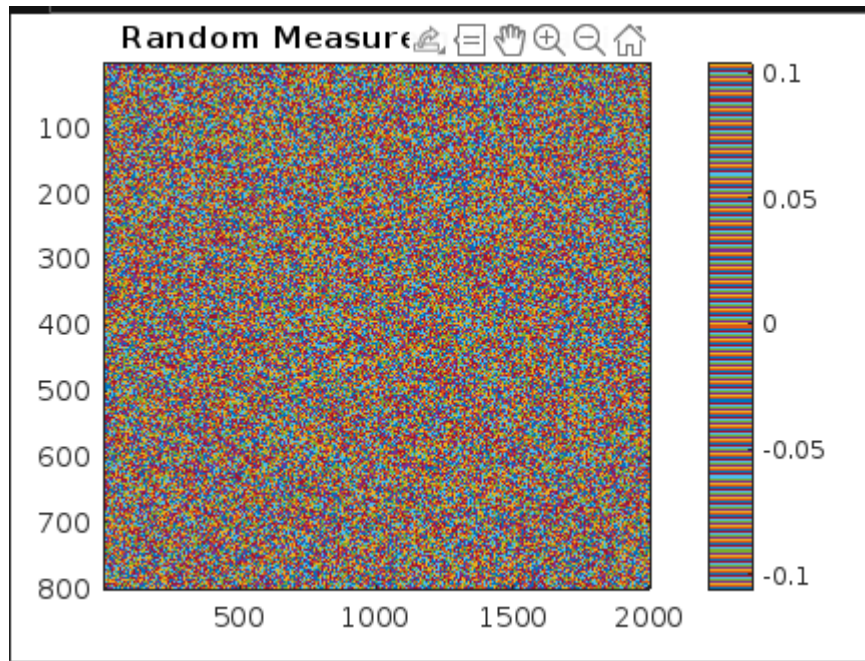
4.2 - сурет - Кіріс сигналының қуат спектрі



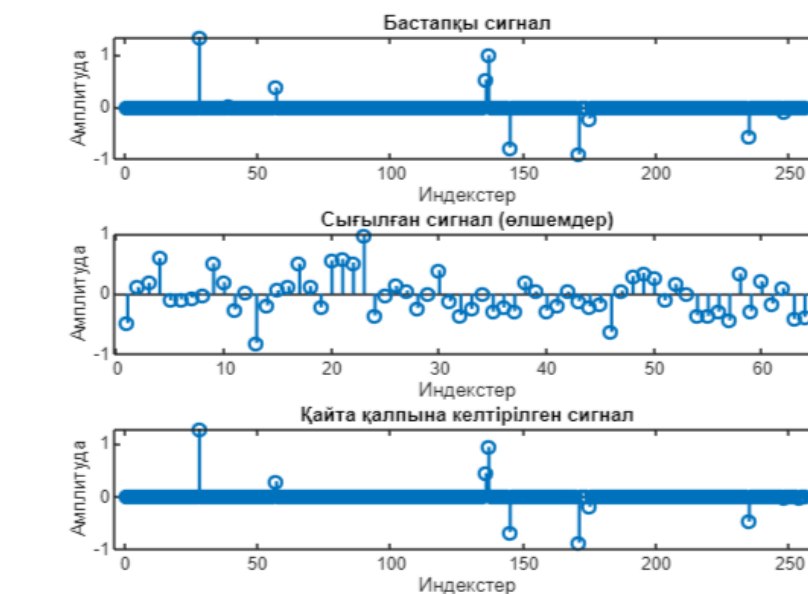
4.3 - сурет - l_1 минимизациясын қолдана отырып, FFT спектрі қайта құрылды



4.4 - сурет - Қайта құрылған және нақты спектр арасындағы қателік



4.5 - сурет - Кездейсоқ өлшеу матрицасы



4.6 - сурет - Деректер жылдамдығын арттыру үшін сымсыз жүйеде компрессивті зондтау

FFT фурье талдауын және цифрлық сигналдарды өңдеуді айтарлықтай жеңілдететін революциялық алгоритм 4.5 - суретте бейнеленді. FFT алгоритмі бірнеше амалдарды қолданады және дискретті сигналдың Фурье түрленуін

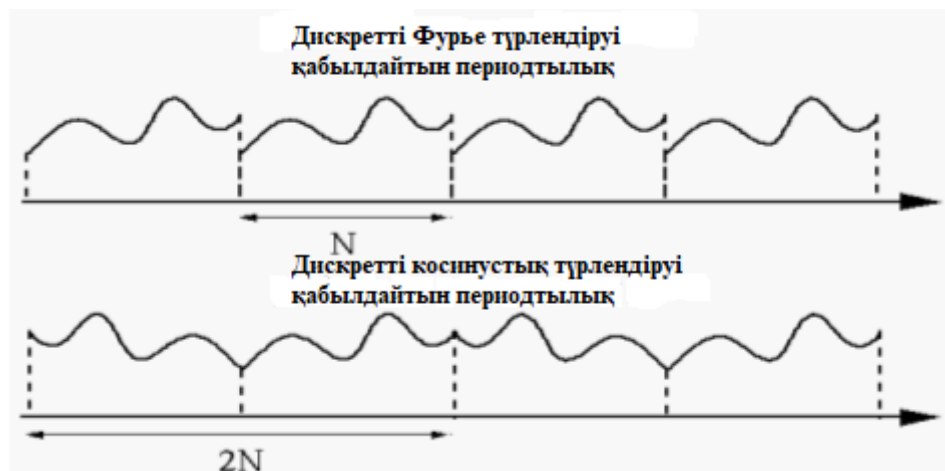
$N \log_2(N)$ операцияларында есептей алады. MATLAB-та FFT іске асырылған кезде екі факторды ескеру қажет:

1. FFT сандар кешендерін пайдаланады;
2. оң және теріс жиіліктерді есептейді.

Дәл осы жерде компрессиялық зондтауда FFT енгізу қиынға соғады. Негізгі мәселе мынада, компресс-зондтауды күрделі санға қолдану жалықтыратын және күрделі процесс болып табылады

FFT туындаған жағдайды жеңу үшін Оның орнына Дискретті Косинус Түрлендіруі (DCT) жүзеге асырылады. DCT концептуалды түрде DFT-мен бірдей, тек ол энергияны DFT -ге қарағанда төмен ретті коэффициенттерге шоғырландыруда жақсы жұмыс істейді. Басқа DCT-нің маңызды қасиеті-барлық спектрлік коэффициенттердің тек нақты болуы.

Кіріс сигналы периодты деп есептесек, DFT шамасы кеңістіктік инвариантты болады (кіріс фазасы маңызды емес), бұл DCT үшін дұрыс емес. DCT уақыт сигналына кезеңділікті енгізу кезінде үзілістерді енгізбейді, ал DFT-де уақыт сигналы кесіліп, мерзімді деп қабылданады. Нәтижесінде уақыт доменінде үзілістер енгізіліп, сәйкес артефактілер жиілік доменіне енгізіледі. Алайда, уақыт сигналын кесу кезінде біркелкі симметрия қабылданатындықтан, DCT-де ешқандай үзілістер немесе байланысты артефактілер енгізілмейді. FFT мен DCT арасындағы салыстыру 4.7 - суретте көрсетілген.



4.7 - сурет - DFT және DCT периодтылығын салыстыру

4.2 Екі қабатты компрессивті зондтаудағы негізгі параметрлер: жиілік және бұрыш бойынша талдау

Бастапқы сирек сигналды генерациялау үшін:

1. Екі өлшемді x сигнал сирек матрица ретінде $N_\theta \times N_f$ модельденеді.
2. Нөлдік емес элементтер матрица бойынша кездейсоқ таратылады және белсенді бұрыштық θ және жиілік f компоненттеріне сәйкес келеді.

Параметрлары ретінде аламыз:

$N_\theta = 360$ – бұрыштық дискретизациялар саны

$N_f = 100$ – жиіліктік дискретизациялар саны

$S_\theta = 15$ – белсенді бұрыш саны

$S_f = 20$ – белсенді жиілік саны

Кейінірек зондтау үшін белгілі сипаттамалары бар сирек сигнал жасаймыз. Келесі қадамда өлшеу матрицасын құрамыз. Ол үшін Φ_1 және Φ_1 өлшеу матрицалары сигналды төменгі өлшемді кеңістікке проекциялау үшін қолданамыз. $\sqrt{M_\theta}$ және $\sqrt{M_f}$ матрицаларының нормалануы сигнал энергиясының біркелкі таралуын қамтамасыз етеді. Матрица параметрлерінің мәні: $M_\theta = 180$ – бірінші кезеңдегі өлшеулердің саны, $M_f = 75$ - екінші кезеңдегі өлшеулердің саны.

Компрессивті өлшеу кезінде x сигналы алдымен Φ_1 ішкі кеңістігіне, содан кейін Φ_2 ішкі кеңістігіне проекцияланып, y сығылған өлшемдерін жасайды.

Матрица өлшемі $y: M_\theta \times M_f$. Компрессивті өлшеудің формуласын ала аламыз:

$$y = \Phi_1 * x * \Phi_2^T \quad (4.1)$$

Өлшемдерге қосымша ақ Гаусс шуы нақты жағдайды көрсету үшін қосылады.

$$SNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right), \quad (4.2)$$

Шуға параметр беретін болсақ $SNR = 20$ дБ.

Сигналды қайта қалпына келтіруде Ортогональды сәйкестікке мтылу алгоритмі арқылы әрбір өлшеу бағанында орындалады. OMP ең корреляциялық элементтерді бір-бірлеп қосып, қайта құру қатесін азайтады. Қайта қалпына келтіру формуласы:

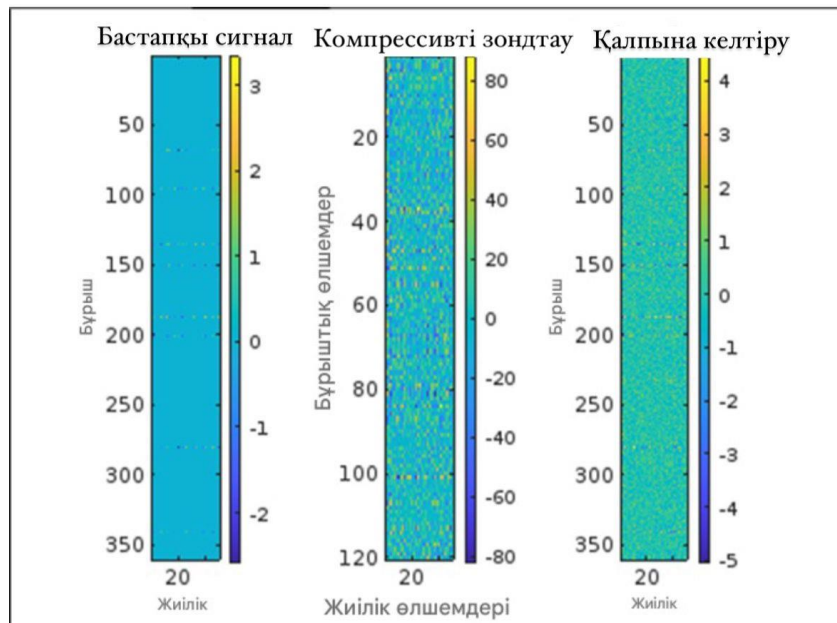
$$\|y - \Phi * x\|_2^2 \leq \epsilon \quad \text{шартында} \quad \hat{x} = \arg \min \|x\|_1, \quad (4.3)$$

PSNR (Шың сигнал-шу қатынасы) бағалауы:

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{\max(x^2)}{MSE} \right), \quad (4.4)$$

мұндағы:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x[i] - x_{rec}[i])^2, \quad (4.5)$$



4.8 - сурет - Екі қабатты компрессивті зондтаудың жалпы моделі

4.8 - суреттегі график кодта жасалған сигналды көрсетеді. Сигнал екі өлшемді матрица болып табылады, мұнда нөлдік емес мәндер (түсті аймақтар) белсенді компоненттерді көрсетеді. График сигналдардың көпшілігінің жоқтығын (қара түспен көрсетілген) және белсенді компоненттердің бірнеше жерде шоғырланғанын көрсетеді. Бұл сигналдың сирек екенін білдіреді. Көлденең ось жиіліктерді көрсетеді. Тік ось бұрыштарды көрсетеді. Бұл график кейінгі қысу және қалпына келтіру үшін негіз болады. Бұл сигналдың тиімді қайта құру үшін жеткілікті қарапайым құрылымы бар болып табылады.

Қайта құрылған сигналдың сипаттамасын талдайтын болсақ, онда қалпына келтіру алгоритмінің нәтижесін көрсетеді. Сигнал қысылғаннан кейін және шуды қосқаннан кейін алгоритм оны бастапқы күйіне қайтаруға әрекет жасады. Қайта құрастырылған сигнал түпнұсқаға дерлік ұқсайды, бірақ шу мен алгоритм қателеріне байланысты шамалы айырмашылықтар болуы мүмкін. Көлденең ось жиіліктерді көрсетеді. Тік ось бұрыштарды көрсетеді. Алгоритм сигналды жоғары дәлдікпен қалпына келтіре алды. Бұл таңдалған компрессивті зондтау және қалпына келтіру әдісінің тиімді екенін растайды.

Қалпына келтіру қатесінің графигі бастапқы және қайта құрылған сигналдар арасындағы айырмашылықты көрсетеді. Қате аз болған жағдайда сигнал дәл қайта құрылады. Түсі ашық болған жерде шамалы ауытқулар бар. Көптеген аймақтарда сәтті қалпына келтіруді көрсететін жеңіл ауытқулар байқалады. Сигнал амплитудасы төмен аймақтарда қателер жиі кездеседі,

себебі шу бұл аймақтарға күштірек әсер етеді. Қателер аз, бұл әдістің жоғары дәлдігін көрсетеді. Сигналдың көп бөлігі айтарлықтай бұрмаланусыз қалпына келтіріледі.

Бастапқы сигнал сирек, оны графиктегі белсенді аймақтардың шектеулі санынан көруге болады. Бұл оны қысу арқылы сезінуге қолайлы етеді. Екінші график қалпына келтірілген сигналды көрсетеді. Ол бастапқыға көрнекі түрде ұқсас, бұл қалпына келтіру алгоритмінің жоғары тиімділігін растайды. Үшінші график шудың әсері жоғары кейбір аймақтарды қоспағанда, қайта құру қателерінің минималды екенін көрсетеді. Бұл ұсынылған әдістің сәттілігін растайды [35].

4.3 Екі қабатты компрессивті зондтаудағы негізгі параметрлер: бұрыштық және жиілік бойынша талдау

Екі қабатты компрессивті зондтау әдісі – бұл сигналды аз өлшеулер арқылы тиімді түрде қысу және кейіннен жоғалтусыз қалпына келтіруді қамтамасыз ететін заманауи әдіс. Бұл әдістің сымсыз байланыс желілерінде қолданылуы оның бұрыштық (θ) және жиілік (f) координаталары бойынша жұмыс істеу мүмкіндігімен тікелей байланысты. Әдістің математикалық негізін терең түсіну үшін оның негізгі параметрлері: 4.8 – суретте көрсетілген бұрыш бойынша зондтау және жиілік бойынша зондтау талданады. Бұл екі компонент бір-бірімен байланысты болғанымен, әрқайсысы сигналдың әртүрлі сипаттарын компрессивті түрде өлшеуге және тиімді қалпына келтіруге жауап береді. Олардың математикалық сипаттамалары мен физикалық мәнін жеке-жеке қарастырып, жалпы екі қабатты зондтау моделін толық талдайық.

Бұрыш бойынша зондтау (M_θ) – сигналдың бұрыштық координаталарына негізделген сирек сипаттамаларын компрессивті түрде өлшеуге арналған процесс. Бұл әдіс, әсіресе, антенналық массивтер мен радиолокация жүйелерінде маңызды рөл атқарады.

Сигналдың бұрыштық компоненттері бойынша компрессивті зондтау төмендегідей математикалық сипаттамада көрінеді: Бұрыштық дискретизация санын N_θ деп аламыз. Ал белсенді бұрыштық компоненттер саны S_θ (сиректік). Осында өлшеулер саны M_θ , келесі теңдеу арқылы анықталады:

$$M_\theta \geq C_1 \cdot S_\theta \cdot \log\left(\frac{N_\theta}{S_\theta}\right) \quad (4.6)$$

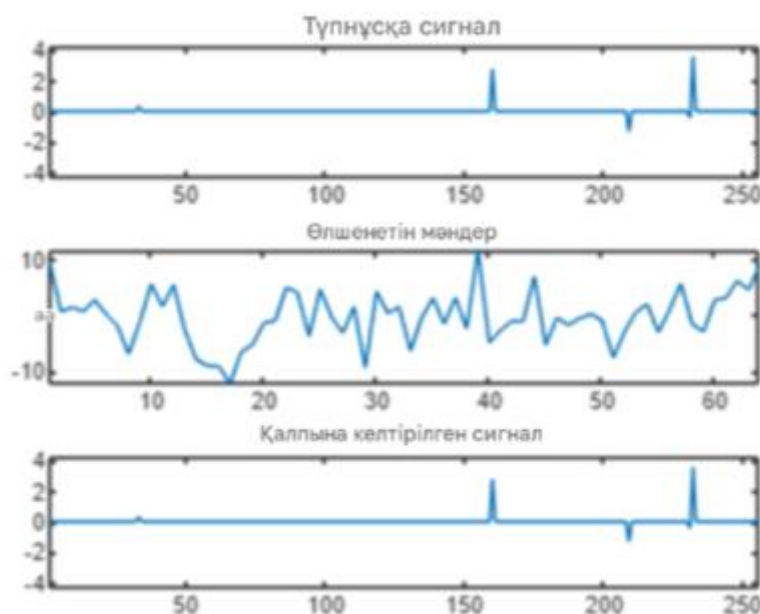
мұндағы, C_1 – тұрақты коэффициент.

Проекциялау процесі кезінде сигналдың бұрыштық координаталары өлшеу Φ_θ матрицасының көмегімен қысылады:

$$y_\theta = \Phi_\theta * x_\theta \quad (4.7)$$

мұндағы: y_θ — бұрыш бойынша сжатылған өлшеулер векторы ($M_\theta \times 1$), Φ_θ — $M_\theta \times N_\theta$ өлшемді матрица, x_θ — бұрыштық сигнал ($N_\theta \times 1$).

Бұрыш бойынша талдауға қойылатын шарт ретінде матрица қасиеті кіреді. Φ_θ өлшеу матрицасы ортогоналды немесе кездейсоқ болуы керек. Мысалы, Хаадамар немесе Гаусс матрицасы мысалында болады. Ал өлшеулер санының жеткіліктілігі M_θ сигналы сирек компоненттерді толық сипаттау үшін жеткілікті болуы керек. Бұрыштық зондтау сымсыз байланыс жүйелерінде қолданылғанда, антенна диаграммаларын немесе радиолокациялық бағыттарды нақты талдауға мүмкіндік береді. Бұрыштық зондтаудың артықшылығы: өлшеулер санын азайту арқылы есептеу жүктемесін төмендетеді.



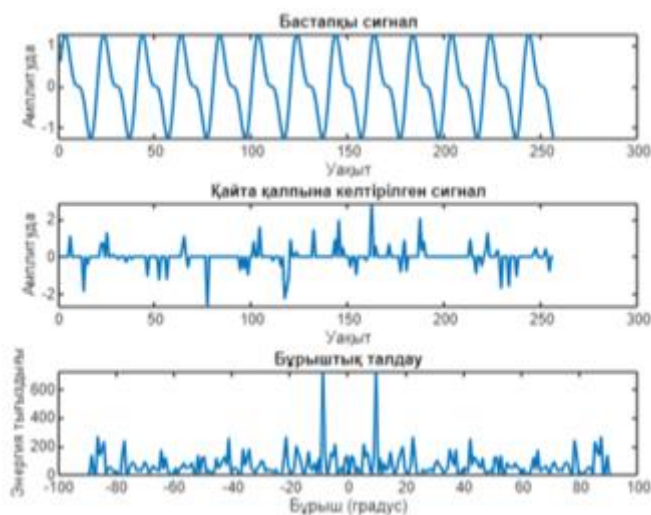
4.9 - сурет – Бұрыштық аймақтағы сирек сигналды қалпына келтіру

Кесте 4.1 - MatLab ортасында жасалған 4.9 – суреттің графиктеріне түсіндерме.

График	Не көрсетеді	Маңызды сәттер
Бастапқы сигнал	$P = 5$ нөлге тең емес мәндері бар сирек сигнал	Сигнал сирек, көп бөлігі нөл, ал нөлге тең емес шыңдар кездейсоқ орналасқан.
Өлшенген мәндер	Өлшеу матрицасы A арқылы алынған бастапқы сигналдың сығылған көрінісі	Өлшеулер саны ($K = 64$) сигнал ұзындығынан ($N = 256$) аз, бірақ сигналды қалпына келтіру жеткілікті.
Қалпына келтірілген сигнал	Сығылған өлшеулерден алынған сигналдың l_1 -норманы минимизациялау әдісі арқылы қалпына келтірілген нұсқасы	Қалпына келтірілген сигнал бастапқы сигналға ұқсайды, бұл компрессивті зондтаудың тиімділігін дәлелдейді.

Бастапқы сигнал (бірінші график) өлшеулерден (екінші график) алынған деректер негізінде сәтті қалпына келтірілді (үшінші график), тіпті өлшеулер саны (K) сигнал ұзындығынан (N) әлдеқайда аз болғанда да. l_1 -норманы минимизациялау (LASSO) әдісі сығылған деректерден разреженный сигналды дәл қалпына келтіруге мүмкіндік береді.

Сигналды бұрыш параметрін қолданып компрессивті зондтау ретінде 4.10 суреттегі графикті қарастырамыз.



4.10 - сурет - Негіз параметр бұрыш болғандағы компрессивті зондалған сигнал

Бастапқы сигнал графикінде Y осы сирек сигналдың мәндерін білдіреді. Көптеген мәндер нөлге тең болады деп күтілуде, тек бірнеше нүктелер нөлдік емес мәндерге ие болады. Ал X осы бұрыштарды білдіреді (немесе сигнал векторындағы әрбір компоненттің индексі). Бұл жағдайда бұл жай 1-ден 100-ге дейінгі индекстер (параметр $N = 100$). Бұл кодта сирек сигнал *randperm* функциясын қолдана отырып жасалады, ол кездейсоқ 5 индексті таңдайды (*sparsity* = 5 параметрімен анықталады) және бұл индекстерге қалыпты үлестірімнен кездейсоқ мәндерді тағайындайды. Барлық басқа мәндер нөлге тең болып қалады. Осылайша, графикте нөлдік емес мәндері бар 5 нүктені және нөлге тең болатын 95 нүктені көреміз.

Ал қалпына келтірілген сигнал графикі үшін Y осы non-negative Least Squares (*lsqnonneg*) әдісімен алынған қалпына келтірілген сигнал. Бұл барлық мәндер оң болуы керек деген шектеумен қалпына келтіру қатесін азайту мәселесін шешетін тәсіл. Ал X осы дәл бірінші графикадағыдай. Бұл 1-ден 100-ге дейінгі бірдей индекстер. Ең дұрысы, қалпына келтірілген сигнал мүмкіндігінше бастапқы сигналға ұқсас болуы керек, мұнда нөлдік емес нүктелер бастапқы сигналдағыдай индекстерге сәйкес келеді. Графиктер ең кіші квадраттарға негізделген қалпына келтіру әдісін қолдана отырып, сирек

сигналдың өлшемдерден қалай қалпына келтірілетінін көрсетеді. Әдіс қарапайым жағдайларда жақсы жұмыс істей алатынына қарамастан, іс жүзінде бұрмалану немесе жоғалту деңгейі әрқашан болады, әсіресе өлшемдер саны сигнал өлшемінен айтарлықтай аз болса.

Жиілік бойынша зондтау (M_f) - сигналдың жиілік координаталарына негізделген сирек компоненттерін компрессивті түрде өлшеу әдісі. Бұл әдіс телекоммуникация, спектрді басқару және деректер тасымалдау жүйелерінде маңызды.

Математикалық сипаттама

Жиілік бойынша сигнал N_f дискретті жиілік компоненттерімен сипатталады. Белсенді жиілік компоненттер саны S_f ($S_f \ll N_f$).

Жиілік бойынша өлшеу матрицасы $\Phi_f M_f \times N_f$ өлшемімен беріледі, мұндағы M_f – жиілік бойынша өлшеулер саны ($M_f < N_f$)

Сығылған өлшеуде жиілік бойынша зондтау процесі:

$$y_f = \Phi_f * x_f \quad (4.8)$$

мұндағы: y_f — бұрыш бойынша компрессивті өлшеулер ($M_f \times 1$), Φ_f — жиілік бойынша өлшеу матрицасы, x_f — бастапқы жиілік сигналы ($N_f \times 1$).

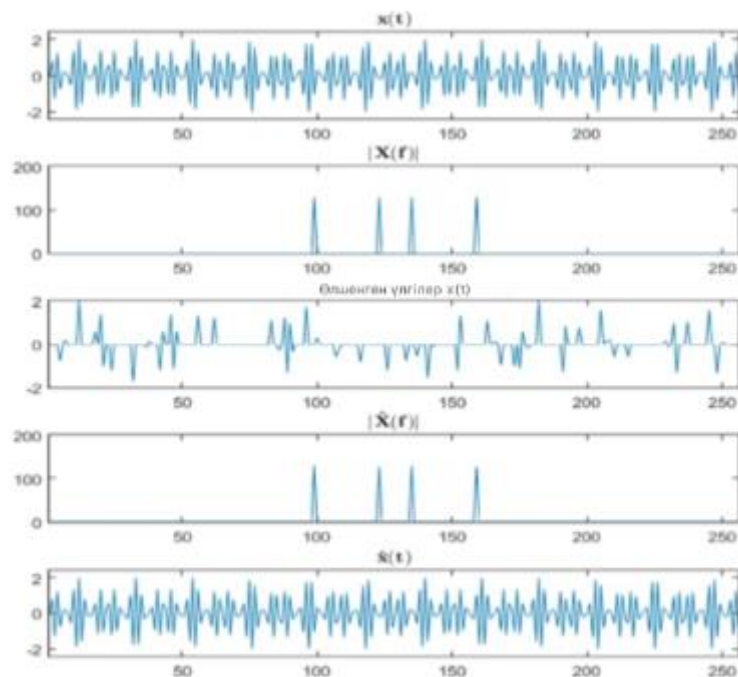
Φ_f матрицасы кездейсоқ немесе ортогоналды болуы мүмкін (мысалы, Фурье матрицалары). M_f өлшеулер саны S_f сирек сигналды сипаттауға жеткілікті болу шарты орындалуы керек.

$$M_f \geq C_2 \cdot S_f \cdot \log\left(\frac{N_f}{S_f}\right) \quad (4.9)$$

мұндағы, C_2 – жиілік бойынша зондтау тұрақтысы.

Сигналдың келу бағыты бойынша орташа квадраттық қате

$$OKK_{KB} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \sqrt{\frac{1}{CNT} \sum_{cnt=1}^{CNT} (\bar{\theta}_{i,cnt} - \bar{\theta}_i)} \quad (4.10)$$



4.10 - сурет - Жиіліктік аймақтағы сирек сигналды қалпына келтіру

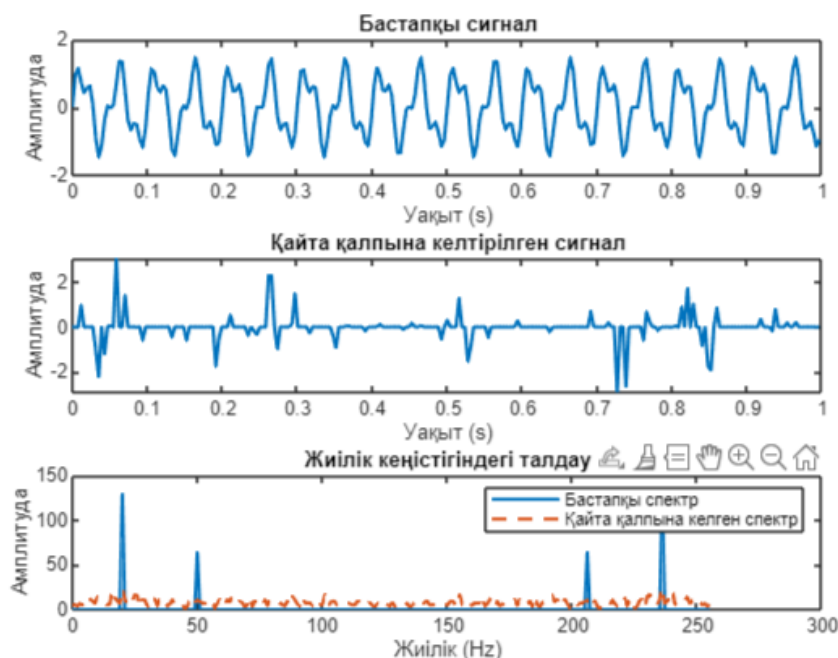
Кесте 4.2 - MatLab ортасында жасалған 4.10 – сурет бойынша графикке түсіндерме.

График	Не көрсетеді	Маңызды сәттер
Бастапқы сигнал	Уақыттық сигнал $x(t)$, екі синусоиданың қосындысы	Сигнал бастапқы болып табылады және сирек қасиетке ие.
Сигнал спектрі	Сигналдың жиілік аймағындағы көрінісі	$X(f)$
Өлшенген уақыттық мәндер	Сығылған деректер: кездейсоқ таңдалған $K=64$ мәндер	Сигналдың толық емес нұсқасы.
Қалпына келтірілген спектр	Қалпына келтірілген жиілік аймағындағы көрініс	$ \hat{X}(f) $
Қалпына келтірілген сигнал	Қалпына келтірілген уақыттық сигнал $\hat{x}(t)$ кері Фурье түрлендіру арқылы алынған	Уақыттық сигнал бастапқы сигналмен сәйкес келеді, компрессивті зондтаудың тиімділігі дәлелденді.

Компрессивті зондтау әдісі $x(t)$ сирек сигналын $K = 64$ өлшем арқылы сәтті қалпына келтіреді ($K < N$). 4.10 – сурет бойынша графиктерді 4.2 – кестеде талдаймыз. Қалпына келтірілген спектр $|\hat{X}(f)|$ және уақыттық сигнал $\hat{x}(t)$ бастапқы деректерге сәйкес келеді. Әдіс сигналдарды аз деректер

көлемінен дәл қалпына келтіру үшін тиімді және оны радиолокация, телекоммуникация сияқты салаларда қолдануға болады.

Жиілік бойынша компрессивті зондтаудың тағы бір моделін 4.11 – суретте талдайық.



4.11 - сурет – Жиіліктік бойынша сигналды компрессивті зондтау

X-ось: Бұл жиілік доменіндегі компоненттердің орындары немесе индекстері болып табылады. Сигналды жиілік доменінде көргенде, әрбір x - осіндегі мән белгілі бір жиілік компонентін білдіреді. **Y-ось:** Бұл жиілік компоненттерінің амплитудаларын немесе мәндерін білдіреді. Әрбір сигналдың жиілік доменінде таңдалған компоненттің күшін немесе амплитудасын көрсетеді. Егер компонент нөлдік мәнге ие болса, ол графикте көрсетілмейді. Ал егер ол нөлден үлкен болса, ол графикте биік төбелер ретінде көрсетіледі.

Алғашқы сигнал: Жиілік компоненттері белгілі бір индекстерде кездейсоқ таралады. Бұл көрсетілген индекстерде амплитудалар бар, ал басқа индекстерде амплитудалар нөл болады.

Қалпына келтірілген сигнал: Қалпына келтірілген сигнал да сирек болады, бірақ қайта қалпына келтірілген компоненттердің индекстері мен амплитудалары бастапқы сигналға жақын болуы керек.

4.4 Екі қабатты компрессивті зондтау: жалпы модель

Екі қабатты компрессивті зондтау бұрыштық және жиіліктік зондтауды бірге пайдаланып, өлшеулерді екі деңгейде жүзеге асырады. Бұл әдіс сигналдың екі өлшемді құрылымын тиімді пайдаланады.

Жалпы модель:

$$y = \Phi_{\theta} * x * \Phi_f^T \quad (4.10)$$

мұндағы: y — екі қабатты компрессивті өлшеулер нәтижесі ($M_{\theta} \times M_f$), Φ_{θ} — бұрыштық өлшеу матрицасы ($M_{\theta} \times N_{\theta}$), Φ_f — жиілік бойынша өлшеу матрицасы ($M_f < N_f$), x — бастапқы сирек сигнал ($N_{\theta} \times N_f$).

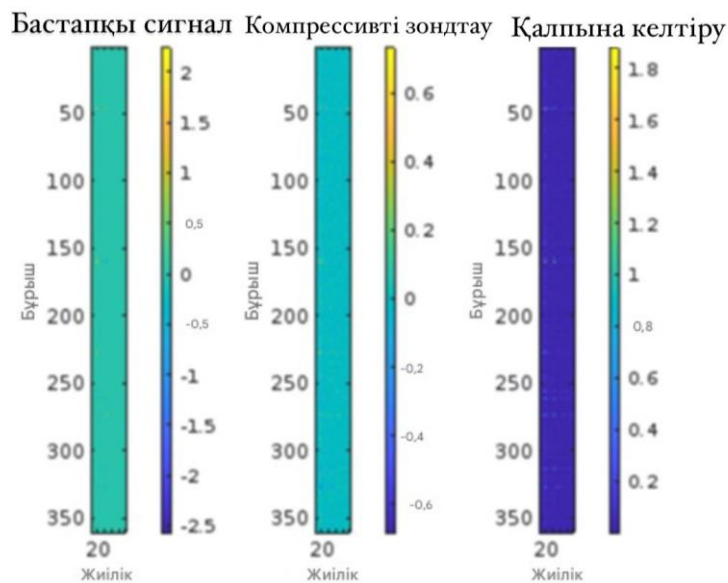
Қалпына келтіру шарты:

1. Матрицалар (Φ_{θ} және Φ_f) кездейсоқ немесе ортогональ болуы керек;
2. Сирек сигналды толық қалпына келтіру үшін өлшеулер саны жеткілікті болуы тиіс:

$$M_{\theta} * M_f \geq C * S_{total} * \log\left(\frac{N_{total}}{S_{total}}\right) \quad (4.11)$$

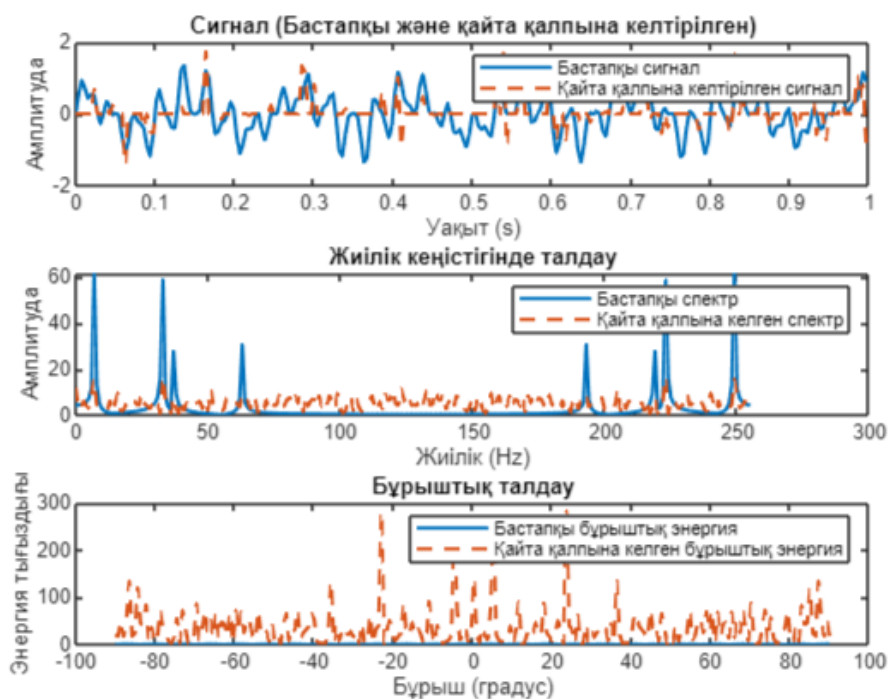
мұндағы: $S_{total} = S_{\theta} * S_f$, $N_{total} = N_{\theta} * N_f$.

Ерекшеліктеріне бұрыштық және жиілік өлшеулер бір уақытта жүзеге асырылуы, өлшеулер саны азайып, есептеу жүктемесі төмендеуі жатады. Шу және кедергілерге төзімділігі жоғары.



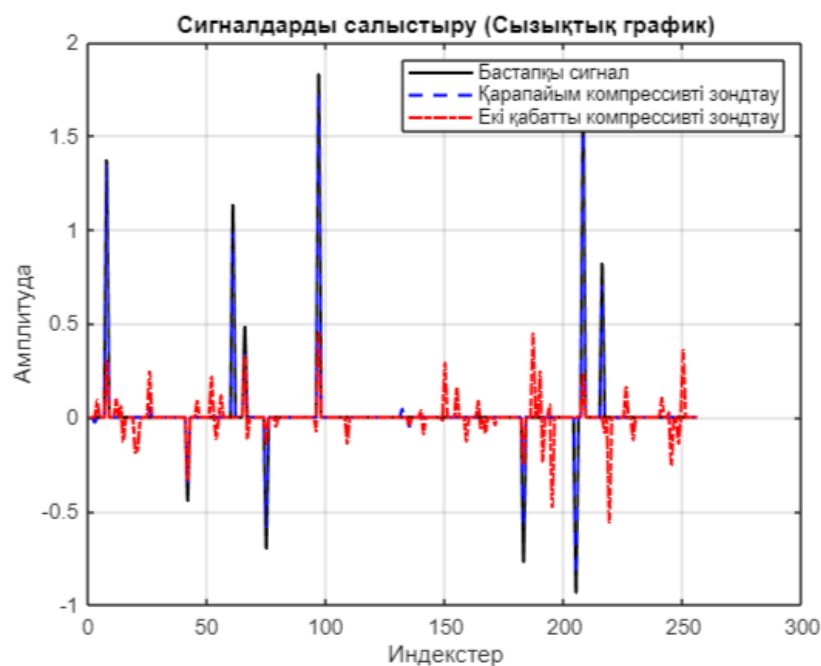
4.12 - сурет - Сигналды екі қабатты компрессивті зондтаумен қалпына келтіру және қателіктерді бағалау процесі

4.12 – суретте сигналды екі қабатты компрессивті зондтаумен қалпына келтіру және қателіктерді бағалау процесін талдаймыз. Бастапқы сигнал. Бұл графикте x бастапқы екі өлшемді разреженный сигналын көрсетеді. Сигнал бұрыштық бағыт ($N_\theta=360, S_\theta = 15$) және жиілік бағыт ($N_f = 100, S_f = 10$) бойынша сирек. Сирек сигнал дегеніміз – сигналдың көп бөлігі нөлге тең, тек кейбір жерлерде ғана мәндері бар. Графикте қара фонда (нөлдік мәндер) бірнеше ашық нүктелер бар, олар белсенді (нөлдік емес) компоненттерді көрсетеді. Бұл график бастапқы сигналды көрсетеді, біз осы сигналды сығылған өлшемдерден қалпына келтіруге тырысамыз.



4.13 - сурет - Сигналды екі қабатты компрессивті зондтаумен қалпына келтіру

Қалпына келтірілген сигнал. Бұл график қалпына келтірілген сигналды (x_{rec}) көрсетеді, ол матрица әдісін қолдану арқылы алынды. Қалпына келтіру сығылған өлшемдер негізінде жүргізіледі: $\Phi_\theta * x * \Phi_f^T$. Қалпына келтірілген сигнал бастапқы сигналға ұқсас, бірақ кейбір нүктелердің жарықтығы немесе орны сәл өзгеше болуы мүмкін. Шуды қосу және қалпына келтіру әдісінің шектеулері салдарынан кейбір қателер пайда болуы мүмкін. Бұл график сигналды қалпына келтіру нәтижесін көрсетеді. Егер сигнал бастапқыға ұқсас болса, қалпына келтіру тиімді болғанын білдіреді.



4.14 - сурет - Компрессивті зондталған және екі қабатты компрессивті зондталған сигналдарды салыстыру

Қалпына келтіру қателігі. Бұл график бастапқы сигнал (x) мен қалпына келтірілген сигнал (x_{rec}) арасындағы айырмашылықты көрсетеді. Қателік келесі формула бойынша есептеледі:

$$\text{Қателік} = |x - x_{rec}| \quad (4.12)$$

Графикте қателік төмен (нөлге жақын) болса, график қараңғы болады. Егер жарқын аймақтар байқалса, бұл қалпына келтіру әдісі сол жерлерде дұрыс жұмыс істемегенін көрсетеді. Бұл график қалпына келтірудің дәлдігін бағалауға мүмкіндік береді. Қателік аз болған сайын, әдістің тиімділігі жоғары болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Екі қабатты компрессивті зондтау әдісі сымсыз байланыс желілеріндегі деректерді сығу және қалпына келтіру процестерін жетілдірудің тиімді құралы ретінде жоғары маңызға ие. Бұл әдіс деректердің екі негізгі өлшемін – бұрыш пен жиілікті – пайдалана отырып, ақпаратты ықшам түрде өңдеуді қамтамасыз етеді. Әдіс тек маңызды компоненттерді сақтай отырып, артық деректер көлемін азайтады және байланыс арналарын тиімді пайдалану арқылы желінің өткізу қабілетін арттырады.

Компрессивті зондтау технологиясы ресурстарды, соның ішінде энергия мен спектрді үнемдеу тұрғысынан да тиімді. Ол қуаттылығы шектеулі құрылғылар мен сенсорлық желілер үшін үлкен маңызға ие, себебі энергияны үнемдей отырып, ақпараттың сапасын жоғалтпай, сенімді деректер алмасуды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, әдіс радиожілік спектрін тиімді пайдаланып, арнаның сыйымдылығын барынша оңтайландырады. Бұл қасиеттер оны қазіргі 5G және болашақ 6G желілері сияқты жоғары технологиялы байланыс жүйелерінде кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

Эксперименттік нәтижелер екі қабатты компрессивті зондтау әдісінің қалпына келтіру дәлдігінің жоғары екенін және шудың әсеріне төзімді екенін көрсетеді. Бұл зерттеу әдістің тек теориялық маңыздылығын ғана емес, сонымен қатар практикалық қолдану мүмкіндіктерін де дәлелдеді. Әдіс радиолокация, сенсорлық желілер, IoT құрылғылары, және деректерді жоғары жылдамдықпен жіберуді қажет ететін басқа да салаларда табысты қолданылуы мүмкін.

Қорыта айтқанда, екі қабатты компрессивті зондтау әдісі – сымсыз байланыс желілерінің өнімділігі мен тиімділігін арттыруда маңызды және перспективалы шешім. Бұл зерттеудің нәтижелері жаңа буын байланыс технологияларының негізін қалап, олардың сенімділігін, жылдамдығын және ресурстарды пайдалану тиімділігін жаңа деңгейге көтеруге ықпал етеді.

ТЕРМИНДЕР ТІЗІМІ

- GSM** – Ұялы байланыс үшін жаһандық жүйе.
MS – Ұялы станция.
BSS – Базалық станциялар қосалқы жүйесі.
NSS – Желіні коммутациялау қосалқы жүйесі.
BSC – Базалық станция контроллері.
BTS – Базалық таратқыш станция.
SMS – Қысқа хабарламалар қызметі
GPRS – Жалпы пакет радиоқызметі.
EDGE – GSM желілері үшін деректер жылдамдығын арттыру технологиясы.
gOMP – Жалпыланған ортогональды сәйкестік іздеу.
RMPI – Көпжолды кедергілердің интеграторы.
CS – Компрессивті зондтау
CS-MoM – Компрессивті зондтау алгоритмдерінде MoM (Moment Method) математикалық негізде сигналдарды қалпына келтіру
DOA – Келу бағыты
MIMO – Көп кіріс, көп шығыс.
MBMP – Үлгі негізіндегі қозғалысты жоспарлау.
DCT – Дискретті косинус түрленуі.
SRM – Кеңістіктік ресурстарды басқару.
FFT – Жылдам Фурье түрленуі.
MATLAB – Матрица зертханасы.
DFT – Дискретті Фурье түрленуі.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Dan Li, Yanan Ma, Guangteng Fan and Yaowen Fu, “A Joint Angle and Frequency Spectrum Estimation Algorithm Using Difference Coarray” MDPI Journal, vol.33, no.10 , pp. 2234-2238, 17 April 2023.
- 2 Zhai, W.T.; Wang, X.R.; Cao, X.B.; Greco, S.M.; Gini, F. Reinforcement learning based dual-functional massive MIMO systems for multi-target detection and communications. IEEE Trans. Signal Process. 2023.
- 3 А. Муханбет, Е.С. Нурахов, Т.С. Иманкулов [FPGA көмегімен сандық сүзгілерді қолдана отырып, суретті өңдеу мен шығаруды жүзеге асыру] ISSN 2790-0886 (print) 12 Тамыз 2021.
- 4 Кулакаева Е.А Дайнеко А.З. Айтмагамбетов Ж.Ж. Онгенбаева [Жерсеріктік радиобақылау кезінде калман сүзгісінің көмегімен сигналды бағалау] Вестник Алматинского университета энергетики и связи Том 3 № 58 (2022).
- 5 L.Zhan, Y.Liu, “Improved WLS-TF Algorithm for Dynamic Synchronized Angle and Frequency Estimation,” IEEE Power and Energy Society General Meeting, vol. 2014-October, no. October, October, 2014.
- 6 Dan Li, Yanan Ma, Guangteng Fan and Yaowen Fu, “A Joint Angle and Frequency Spectrum Estimation Algorithm Using Difference Coarray” MDPI Journal, vol.33, no.10 , pp. 2234-2238, 17 April 2023.
- 7 Zhai, W.T.; Wang, X.R.; Cao, X.B.; Greco, S.M.; Gini, F. Reinforcement learning based dual-functional massive MIMO systems for multi-target detection and communications. IEEE Trans. Signal Process. 2023.
- 8 А. Муханбет, Е.С. Нурахов, Т.С. Иманкулов [FPGA көмегімен сандық сүзгілерді қолдана отырып, суретті өңдеу мен шығаруды жүзеге асыру] ISSN 2790-0886 (print) 12 Тамыз 2021.
- 9 Кулакаева Е.А Дайнеко А.З. Айтмагамбетов Ж.Ж. Онгенбаева [Жерсеріктік радиобақылау кезінде калман сүзгісінің көмегімен сигналды бағалау] Вестник Алматинского университета энергетики и связи Том 3 № 58 (2022).
- 10 L.Zhan, Y.Liu, “Improved WLS-TF Algorithm for Dynamic Synchronized Angle and Frequency Estimation,” IEEE Power and Energy Society General Meeting, vol. 2014-October, no. October, October, 2014.
- 11 Wang, X.R.; Li, W.L.; Chen, C.V. Hand gesture recognition using radial and transversal dual micromotion features. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2022, 58, 5963–5973. [Google Scholar] .
- 12 Кадирбаева Г.К., Чежимбаева К.С., Оразалиева С.К., Жетенбаев Н.Т. [Фазалық ығысуы бар талшықты Брэгг торларының принципі мен қасиеттерін зерттеу] Вестник Алматинского университета энергетики и связи No 1(56) 2022, DOI 10.51775/2790-0886_2022_56_1_133.
- 13 Gurbuz, Z.S.; Griffiths, D.H.; Charlish, A.; Rangaswamy, M.; Greco, S.M.; Bell, K. An overview of cognitive radar: Past, present, and future. IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 2019, 34, 6–18. [Google Scholar].

- 14 Y.S.Zheng, B.X.Yang, M.L.Yang, "Direction of Arrival Estimation Method for Spatially Adjacent Coherent Sources Based on Spatial Filtering," *Journal of Electronics & Information Technology*, vol.38.no.12, pp.3100-3106, Dec. 2016.
- 15 H. ZainEldin et al "Image compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: a survey" *Ain Shams Eng. J.* (2015).
- 16 W. Liu, S. Jin, C. Wen, and M. Matthaiou, "A tractable approach to uplink spectral efficiency of two-tier massive MIMO cellular HetNets," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 348–351, Feb. 2015.
- 17 T. S. Chen, K. N. Hou, W. K. Beh, and A. Y. Wu, "Lowcomplexity compressed-sensing-based watermark cryptosystem and circuits implementation for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Very Large Scale Integration Syst.*, vol. 27, no. 11, pp. 2485–2497, Nov. 2019
- 18 M.Wang, D. Xiao, and Y. Xiang, "Low-cost and confidentiality-preserving multi-image compressed acquisition and separate reconstruction for internet of multimedia things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 3, pp. 1662–1673, Feb. 2021.
- 19 T. Bianchi, V. Bioglio, and E. Magli, "Analysis of one-time random projections for privacy preserving compressed sensing," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 11, no. 2, pp. 313–327, Feb. 2016.
- 20 G. Kuldeep and Q. Zhang, "Design prototype and security analysis of a lightweight joint compression and encryption scheme for resourceconstrained IoT devices," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 165–181, Jan. 2022.
- 21 G. Kuldeep and Q. Zhang, "Energy concealment based compressive sensing encryption for perfect secrecy for IoT," in *Proc. IEEE Glob. Commun. Conf.*, 2020, pp. 1–6.
- 22 B. Zhang, L. Yang, K. Wang, and Y. Cao, "Block compressed sensing using two-dimensional random permutation for image encryption-thencompression applications," in *Proc. IEEE 14th Int. Conf. Signal Process.*, 2018, pp. 312–316.
- 23 Wang, X.R.; Amin, G.M.; Ahmad, F.; Aboutanios, E. Interference DOA estimation and suppression for GNSS receivers using fully augmentable arrays. *IET Radar Sonar Navig.* 2017, 11, 474–480.
- 24 Ma, Y.N.; Cao, X.B.; Wang, X.R. Off-grid DOA estimation with arbitrary-spaced linear array using single snapshot. In *Proceedings of the 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Boston, MA, USA, 22–26 April 2019; pp. 1–6.
- 25 Ma, Y.N.; Cao, X.B.; Wang, X.R.; Greco, S.M.; Gini, F. Multi-source off-grid DOA estimation with single snapshot using nonuniform linear arrays. *Signal Process.* 2021, 189, 108238. [CrossRef]
- 26 Chen, P.; Chen, Z.; Zhang, X.; Liu, L. SBL-based direction finding method with imperfect array. *Electronics* 2018, 7, 426.
- 27 Ling, Y.; Gao, H.; Ru, G.; Chen, H.; Li, B.; Cao, T. Grid reconfiguration method for off-grid DOA estimation. *Electronics* 2019, 8, 1209.

28 Pal, P.; Vaidyanathan, P.P. A grid-less approach to underdetermined direction of arrival estimation via low rank matrix denoising. *IEEE Signal Process. Lett.* 2014.

29 D.M. Oshakbay, Zh.Zh. Akhmetova¹*, P. Popov [The usage of monte carlo simulation in defining the critical systems resilient to cyber-attacks] *Вестник Алматинского университета энергетики и связи* No 1(60) 2023.

30 Elad, M., & Bruckstein, A. M. *Sparse and Redundant Representations: From Theory to Applications in Signal and Image Processing.* Springer, 2010.

31 Baraniuk R. G. *Compressive Sensing [Lecture Notes]* // *IEEE Signal Processing Magazine.* – 2007. – Vol. 24, No. 4. – P. 118–121. – DOI: 10.1109/MSP.2007.4286571.

32 Зау, Х., Росин, П. Л. Adaptive Block Compressive Sensing for Noisy Images // *Cognitive Internet of Things: Frameworks, Tools and Applications.* – Studies in Computational Intelligence. – January 2020. – DOI: 10.1007/978-3-030-04946-1_38. – P. 389–399.

33 Упадхья В. *Compressive Sensing: Methods, Techniques, and Applications* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 1099, No. 1. – DOI: 10.1088/1757-899X/1099/1/012012. – Presented at: International Conference on Applied Scientific Computational Intelligence using Data Science (ASCI 2020), Jaipur.

34 Хабай, А., Абдраимова, Д.Б., Тайсариева, К.Н., & Джунусов, Н.А. (2024). Екі қабатты компрессорлық зондтау әдісін қолдана отырып, сымсыз желіге сигналдың келу бағытын талдау. *ҚазККА Хабаршысы*, № 5(134), 416-425. DOI: 10.52167/1609-1817-2024-134-5-416-425.

35 Хабай А., Абдраимова Д.Б., Әбдіжәлел Қ.Н. Применение метода компрессионного зондирования в системе беспроводной связи gsm. В сборнике: *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. Сборник трудов XX Международной научно-практической конференции.* Москва, 2023. С. 318-325.

А қосымшасы

Бұрыштық аймақтағы сирек сигналды қалпына келтірудің Matlab
бағдарламасында коды

```
% Initialize constants and variables
rng(0);          % set RNG seed
N = 256;         % length of signal
P = 5;          % number of non-zero peaks
K = 64;         % number of measurements to take (N < L)
x = zeros(N,1); % original signal (P-sparse)

% Generate signal with P randomly spread values
peaks = randperm(N);
peaks = peaks(1:P);
x(peaks) = randn(1, P);
amp = 1.2*max(abs(x));
figure; subplot(3,1,1); plot(x); title('Original signal'); xlim([1 N]); ylim([-amp
amp]);

% Obtain K measurements
A = randn(K, N);
y = A*x;
subplot(3,1,2); plot(y); title('K measured values'); xlim([1 K]);

% Perform Compressed Sensing recovery
x0 = A.'*y;
xp = l1eq_pd(x0, A, [], y);
subplot(3,1,3); plot(real(xp)); title('Recovered signal'); xlim([1 N]); ylim([-amp
amp]);
```

Жиіліктік аймақтағы сирек сигналды қалпына келтірудің Matlab
бағдарламасында коды

```
>> % Initialize constants and variables
rng(0);          % set RNG seed
N = 256;         % length of signal
P = 2;          % number of sinusoids
K = 64;         % number of measurements to take (N < L)

% Generate signal with P randomly spread sinusoids
```

А қосымшасының жалғасы

```
% Note that a real-valued sinusoid has two peaks in the frequency domain
freq = randperm(N/2)-1;
freq = freq(1:P).';
n = 0:N-1;
x = sum(sin(2*pi*freq/N*n).', 2);

% Orthonormal basis matrix
Psi = dftmtx(N);
Psi_inv = conj(Psi)/N;
X = Psi*x;          % FFT of x(t)

% Plot signals
amp = 1.2*max(abs(x));
figure; subplot(5,1,1); plot(x); xlim([1 N]); ylim([-amp amp]);
title('$\mathbf{x(t)}$', 'Interpreter', 'latex')
subplot(5,1,2); plot(abs(X)); xlim([1 N]);
title('$|\mathbf{X(f)}|$', 'Interpreter', 'latex');

% Obtain K measurements
x_m = zeros(N,1);
q = randperm(N);
q = q(1:K);
x_m(q) = x(q);
subplot(5,1,3); plot(real(x_m)); xlim([1 N]);
title('Measured samples of $\mathbf{x(t)}$', 'Interpreter', 'latex');

A = Psi_inv(q, :); % sensing matrix
y = A*X;          % measured values

% Perform Compressed Sensing recovery
x0 = A.'*y;

X_hat = l1eq_pd(x0, A, [], y, 1e-5);

subplot(5,1,4); plot(abs(X_hat)); xlim([1 N]);
title('$|\mathbf{\hat{X}(f)}|$', 'Interpreter', 'latex');

x_hat = real(Psi_inv*X_hat); % IFFT of X_hat(f)

subplot(5,1,5); plot(x_hat); xlim([1 N]); ylim([-amp amp]);
title('$\mathbf{\hat{x}(t)}$', 'Interpreter', 'latex');
```

Б қосымшасы

Бұрыш бойынша компрессивті зондтаудың MatLab бағдарламасындағы
коды

```
>> % Parameters
N = 100; % Number of angles
M = 30; % Number of measurements
sparsity = 5; % Number of non-zero angles

% Generate sparse signal (in the angular domain)
x = zeros(N, 1);
x(randperm(N, sparsity)) = randn(sparsity, 1); % Random non-zero components

% Create measurement matrix (random sampling)
Phi = randn(M, N);

% Measurements
y = Phi * x;

% Sparse recovery using Non-negative Least Squares
x_rec = lsqnonneg(Phi, y); % This solves the problem  $\min ||\text{Phi} * x - y||_2$ 

% Plot the original and reconstructed signals
subplot(2,1,1);
stem(x);
title('Original Signal');

subplot(2,1,2);
stem(x_rec);
title('Reconstructed Signal');
```

Б қосымшасының жалғасы

Жиілік бойынша компрессивті зондтаудың MatLab бағдарламасындағы коды

```
>> % Parameters
N = 128;      % Signal length (number of frequency components)
M = 40;      % Number of measurements (M < N)
sparsity = 10; % Number of non-zero frequency components

% Step 1: Generate a sparse frequency signal
x = zeros(N,1);
non_zero_freqs = randperm(N, sparsity); % Random indices for non-zero
frequency components
x(non_zero_freqs) = randn(sparsity, 1); % Non-zero values at the selected
frequencies

% Step 2: Create random measurement matrix (random sampling)
Phi = randn(M, N); % Measurement matrix of size M x N (M < N)

% Step 3: Take measurements (y = Phi * x)
y = Phi * x;

% Step 4: Recover the signal using L1 minimization (using linprog)
% Linear programming: minimize L1 norm of the signal
cvxSolver = 'linprog'; % Using linprog solver

% Define the optimization problem
f = ones(N,1); % L1 norm is the sum of absolute values
A = Phi;
b = y;

% Solve the problem using linprog
options = optimoptions(cvxSolver, 'Display', 'off'); % Turn off display for
optimization
x_rec = linprog(f, [], [], A, b, zeros(N, 1), []);

% Step 5: Plot the original and reconstructed signal
subplot(2,1,1);
stem(x);
title('Original Frequency Signal');

subplot(2,1,2);
stem(x_rec);
title('Reconstructed Frequency Signal');
```

СЫН-ПІКІР

«7M06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының магистранты

Абдраимова Диана Бауыржанқызының

магистрлік диссертация жұмысына

Тақырыбы: «GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану»

Орындалды:

а) теориялық және практикалық бөлімі - 51 бет

б) графикалық бөлімі - 9 бет

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУЛЕР

Диссертант Абдраимова Диана Бауыржанқызының магистрлік диссертациялық жұмысы GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану арқылы заманауи телекоммуникация саласындағы өзекті мәселелерді шешуге бағытталған. Жұмыста компрессивті зондтау әдісінің теориялық негіздері терең қарастырылып, GSM жүйелеріндегі мәліметтерді өңдеу тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін шешімдер ұсынылған. Сонымен қатар, әдістің артықшылықтары және оның телекоммуникациялық жүйелерде қолданылу мүмкіндіктері айқын көрсетілген.

Диссертацияда компрессивті зондтау әдісінің GSM жүйесіндегі деректерді қысу, жылдам өңдеу және спектр тиімділігін жақсарту тұрғысынан маңыздылығы нақты дәлелдермен көрсетілген. Жұмыста теориялық зерттеулерді практикалық деректермен үйлестіре отырып, маңызды ғылыми ұсыныстар жасалған.

Жұмысты бағалау

Жұмыстың құрылымы жүйелі, мазмұны логикалық дәйекті және материалдың мазмұны жақсы құрылған. Сонымен қатар, GSM байланыс жүйесіндегі екі қабатты компрессивті зондтау әдісінің тиімділігі нақты көрсетілген. Алайда, жұмысқа қосымша нақты объектілерде жүргізілген эксперименттер деректерін және бұл әдісті коммерциялық қолдану үшін кәсіпорындардың мүдделері туралы ақпаратты толықтыру ұсынылады. Бұл зерттеудің практикалық маңыздылығын арттырады деп есептеймін.

Менің ойымша, диссертант Абдраимова Д.Б. «7M06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасын бойынша “техника ғылымдарының магистрі” академиялық дәрежесін алуға және «өте жақсы» (А, 90%) бағалануға лайық деп санаймын.

Рецензент

Energo University,

«Телекоммуникациялық инженерия»

кафедрасының қауым. профессоры, PhD, т.ғ.к

Ермекбаев М.М.

(қолы)

«13»

Бақтар

2025 ж.

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю

қызметі

«13»

01

аты-жөні

2025 ж.



**«7M06201 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының
магистранты**

**Абдраимова Диана Бауыржанқызының
магистрлік диссертациясына**

СЫН-ПІКІР

**Тақырыбы: «GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті
зондтау әдісін қолдану»**

Абдраимова Диананың магистрлік диссертациялық жұмысы "GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану" тақырыбына арналған және телекоммуникация саласындағы өзекті мәселелерді зерттеуді мақсат етеді. Жұмыста GSM желілерінде екі қабатты компрессивті зондтау әдісінің желілік ақауларды және деректердің жоғалуын қалпына келтіру тұрғысынан маңыздылығы зерттелген. Әдістің тиімділігін бағалау үшін бұрыштық және жиіліктік параметрлер бойынша екі қабатты компрессивті зондтау MATLAB бағдарламалық ортасында модельденіп алынған нәтижелерге талдау жасалған.

Диссертациялық жұмыс ғылыми талаптар мен логикалық құрылымға сәйкес ұйымдастырылған. Зерттеу барысында компрессивті зондтау әдісінің теориялық негіздері қарастырылып, оның GSM сымсыз байланыс жүйесінде қолданылуының артықшылықтары нақты дәлелденген. Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы – компрессивті зондтаудың жаңа әдістерін енгізу арқылы GSM жүйесінің тиімділігін арттыру және спектрлік ресурстарды үнемдеуге бағытталуында. Бұл зерттеу GSM жүйелерінің жұмысын оңтайландыру және спектрлік тиімділікті жоғарылату мәселелерін шешуге елеулі үлес қосады.

Жалпы алғанда, диссертация жоғары ғылыми деңгейде орындалған, зерттеу нәтижелері нақты және дәйекті түрде баяндалған. Сондықтан бұл жұмысты жоғары бағалап, магистрлік диссертацияны "өте жақсы" (A+, 95%) деген бағаға лайық деп санаймын және қорғауға ұсынамын.

Пікір беруші:
Ғылыми жетекшісі,
қауымд.профессор, PhD
«20» _____ 2025 ж.



Хабай А.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Абдраимова Диана Бауыржанқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 2

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 26

Знаки из здругих алфавитов: 23

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

10.01.2025 г.
Дата

Марксұлы С.
проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Абдраимова Диана Бауыржанқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 2

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 26

Знаки из здругих алфавитов: 23

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

10.01.2025 г.
Дата



Таштай Е.
Заведующий кафедрой

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Абдраимова Диана Бауыржанқызы

Тақырыбы: GSM сымсыз байланыс жүйесіне екі қабатты компрессивті зондтау әдісін қолдану

Жетекшісі: Сұңғат Марксұлы

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.6

Дәйексөз (35): 0.4

Әріптерді ауыстыру: 23

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 26

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

10.01.2025 г.
Күні



Таштай Е.
Кафедра меңгерушісі