



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ ПО ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ
Катедра Радиокommunikации и Видеотехнологии

маг. инж. Тодор Димитров Цветков

МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА
КАЧЕСТВЕНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА КОГНИТИВНО РАДИО

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна техника
Научна специалност: Радиопредавателна и радиоприемна техника

Научен ръководител: проф. д-р инж. Илия Георгиев Илиев

СОФИЯ, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет по Телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 07.03.2022 г. / протокол № 33.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 18.07.2022 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-10 / 31.03.2022 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Илия Илиев – председател
2. Доц. д-р инж. Росен Милетиев – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Александър Бекярски
4. Проф. д-р инж. Станимир Садинов
5. Доц. д-р инж. Габриела Атанасова

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Александър Бекярски
2. Доц. д-р инж. Росен Милетиев

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет по Телекомуникации на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1254 и на интернет страницата на ТУ-София.

Дисертантът е докторант към катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет по Телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като резултатите от тях са публикувани. Част от изследванията са вследствие на работата по научноизследователски проект.

Автор: маг. инж. Тодор Димитров Цветков

Заглавие: Методи и алгоритми за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В съвременните комуникационни системи спектърът става все по-наситен и се налага да се търсят нови методи за оползотворяването му. В последно време важна роля за решаването на този проблем играе когнитивното радио. Чрез него може да се постигне подобряване на ефективността на използване на радиочестотния спектър и основните параметри при предаване на данни в мобилните комуникации. Технологията прилага различни методи и алгоритми за детекция и анализиране на средата за разпространение. С внедряването на 5G мрежите, където честотния ресурс се използва много по-ефективно изправя когнитивните радио мрежи пред нови предизвикателства.

Когнитивното радио е новаторски подход за подобряване на използваемостта на честотния ресурс. То представлява интелигентна безжична комуникационна система способна да анализира обкръжаващия го честотен спектър като измерва, кои честоти се използват, кога се използват, какво е нивото и каква е модулацията на сигналите в тях. Резултатът от измерването на спектъра се използва при вземането на решение за предаване и приемане на информация от когнитивното устройство. То трябва да се съобразява с вече съществуващите устройства в радио средата и да не пречи на тяхната работа. Когнитивните радиа трябва бързо да се адаптират към променящата се среда и да обменят своите постоянно променящи се параметри, както помежду си, така и към останалите безжични устройства в мрежата. Механизмите и техниките на анализ, адаптиране и обмяна на параметрите са ключови в мрежите използващи когнитивно радио.

Целите на дисертационния труд са насочени към анализиране на параметрите и начините за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио, което да спомогне за създаването на методи и алгоритми за повишаване на точността и намаляване на изчислителната сложност при анализа на все по-динамично променящата се радио среда. Използването на машинното самообучение при детектирането може значително да подобри ефективността на безжичните комуникационни системи. Развитието на електрониката и компютърната техника доведе до увеличаване на изчислителната мощност, намаляване на физическите размери и удължаване живота на батерията. Това дава възможност да се приложат иновативни подходи за подобряване на производителността в системи с ограничен енергиен ресурс, съобразявайки се с изискванията на регулаторните органи в различните географски региони.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целите на дисертационния труд са насочени към анализиране на параметрите и начините за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио, което да спомогне за създаването на модели и алгоритми за намаляване на изчислителната сложност и повишаване на скоростта при анализ на радио средата.

За постигане на дефинираните цели на дисертационния труд могат да се определят следните задачи:

1. Да се изследват съвременни методи с висока разделителна способност за радиопеленгация и да се направи оценка на приложимостта им в когнитивните радио мрежи.
2. Да се предложи алгоритъм за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио чрез използване на адаптивна антенна решетка и различни методи за радиопеленгация.

3. Да се изследват съвременни методи за редуциране на пространството от независими променливи на приетите сигнали и да се направи оценка на приложимостта им в комбинация с алгоритми за клъстеризация.
4. Да се предложи алгоритъм за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио чрез комбиниране на различни алгоритми за клъстеризация с методи за първична обработка на измерванията на мощността на приетия сигнал.
5. Да се изследват разработените методи и алгоритми за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио при различни сценарии с реални данни.
6. Да се направи оценка на приложимостта на предложените методи и алгоритми за подобряване на качествените показатели в когнитивните радио системи.

Поставените задачи в дисертационния труд се решават чрез прилагането на теоретични, аналитични и симулационни методи. Теоретичните и аналитичните методи са използвани за дефиниране на основни параметри за подобряване на качествените показатели на когнитивно радио. Посредством симулационния метод се изследват разработените методи и алгоритми реализирани в програмна среда на MATLAB.

Практическа приложимост

Предложените методи и алгоритми в дисертационния труд са получени след симулации с предварително обработени данни за да се реализират различни практически сценарии. В последствие получените резултати са валидирани чрез използването на реални необработени данни. Разработено е софтуерно приложение за намиране на свободните канали в база данни със спектрограми на мощността и възможност за допълнително добавяне на реперен клъстер на шума.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в общо шест научни публикации, три от които са докладвани на международни конференции и три – в специализирани научни списания. От направените публикации, две са индексирани в Scopus и една в Google Scholar.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 192 страници, от които 44 страници са приложения, като включва увод, списък на използваните съкращения, четири глави за решаване на формулираните основни задачи, препоръки за бъдеща работа, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията, четири приложения, използвана литература и списък на фигурите. Цитирани са общо 83 литературни източници, като 81 са на латиница и 1 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 201 фигури и 4 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗ НА МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ИЗПОЛЗВАНИ В КОГНИТИВНО РАДИО

В последните няколко години интензивното използване на определени честотни ресурси води до тяхното изчерпване. Това е следствие от нарастването на броя и капацитета на безжичните устройства и неефективното използване на честотния ресурс от различни конвенционални радиокомуникационни системи. Внедряването на нови техники и похвати за по-ефективно използване на спектъра става неизбежно. Нови системи за детектиране и анализиране на спектъра трябва да бъдат въведени, които могат да адаптират своите собствени параметри, така че да не пречат на другите потребители или да се възползват от появата на спектрални пролуки. Те представляват честотни ленти освободени за определено време от съответните потребители.

За осигуряване на необходимото качество на обслужване на първични и вторични потребители, в работата е анализиран модел на когнитивно радио, работещ в телевизионния обхват. Представени са формули за регулиране на мощността за модел с една двойка вторични потребители. При появата на повече от две нелицензирани устройства в радио мрежата се прилага централен и разпределен модел за регулиране на мощността. В централният модел се използва централен контролер, който дава възможност за по-лесен и по-сигурен контрол над вторичните потребители. Всички по-сложни изчисления се прехвърлят към него и така се запазва за по-дълго време ограничения ресурс на когнитивните потребители. Реализирането на този модел е твърде скъпо и затова той не е предпочитан в практиката. Алтернативният разпределен модел няма нужда от централен контролер, когнитивните потребители общуват директно помежду си и взимат самостоятелно решенията за предаването от тях мощност. Този модел е по-лесен за реализация, но използва повече ресурси от вторичните потребители заради по-честото детектиране на спектъра, по-честата обмяна на информация между тях и поддържането на локална база данни с рейтинг система за да се гарантира сигурността им.

В настоящата работа се прави анализ на алгоритмите за изчисляване на ъглите на постъпване и се оценява тяхната роля върху подобряването на качествените показатели в когнитивните радио мрежи. Разгледани са класически и подпространствени методи за изчисляване на ъглите на постъпване. Към класическите методи спадат: метод на пространствената филтрация (Метод на Бартлет) и метод с минимална дисперсия на Капон. Те се характеризират с това, че измерват мощността на сигналите във всяка една посока от координатното пространство. Посоките, от които получената мощност е най-голяма се приемат за ъглите на постъпване. Тези методи се характеризират с малка изчислителна сложност и лоша разделителна способност. Те могат да бъдат използвани в случаите, когато липсва информация за характеристиките на сигнала и се налага енергийно детектиране. Подпространствените методи като MUSIC, ROOT MUSIC и ESPRIT използват собствените вектори изведени от автоковариационната матрица за да разделят получената информация на две части: векторно подпространство на сигнала и векторно подпространство на шума. Това разделяне дава възможност за повишаване на разделителната способност при изчисляването на ъглите на постъпване. Те могат да бъдат използвани в случаите, когато имаме информация за характеристиките на сигнала при разширено (циклично) детектиране.

Използването на анализ на главните компоненти има за цел да намали размерността на събраните данни чрез премахване на всички взаимосвързани променили като в същото време се запазват всички важни атрибути. Това се постига чрез трансформация в нов масив от данни, където променливите са некорелирани. Първия главен компонент ще съдържа

най-голямо разнообразие от входните данни. Втория главен компонент ще съдържа максимално много от останалото разнообразие от входните данни, което в същото време не е корелирано с първия компонент и т.н. Целта на този анализ е да се вземат първите няколко главни компонента, които съдържат най-много информация от оригиналните данни. Редуциране на пространството може да се постигне също чрез използване на параметрите на Йорт.

Клъстеризацията има за цел да групира всички обекти, които имат сходни характеристики в еднакви класове наречени клъстери. Разгледани са няколко различни методи за клъстеризация: йерархични (агломеративни и разделящи) и нейерархични (метод на К-средните величини и К-медоиди). Йерархичната клъстеризация се основава на построяването на йерархична структура от клъстери докато се достигне до предварително зададен брой от клъстери. Този известен краен брой операции позволява по-лесно да се управляват енергийните ресурси в крайните устройства. Разбира се, това е за сметка на невъзможността да се правят корекции веднъж след като е направено решение за присъединяване. Този недостатък е отстранен при нейерархичната клъстеризация. При нея се данните се присъединяват към различните клъстери без да се постои йерархична структура. Така в процеса на класифициране е възможно да се правят корекции докато се достигне до зададения брой клъстери. Недостатък на този метод е увеличаващия се брой на операциите, когато се анализират елементи с много близки характеристики или се обработват големи бази данни.

Въз основа на описаните методи се предлага подход, който дава възможност да се използват спектрограми. Всяко софтуерно радио може да получи изображение на спектъра чрез спектрограма, следователно целесъобразно е да се използва метод свързан с обработката на спектралните характеристики във времева област. В последствие стои задачата за разпознаване на заетостта на отделните честотни канали във времева, пространствена и честотна област. В дисертацията се предлага подход използващ спектрограмите като изображения, което дава възможност за прилагане на методи основани на машинно самообучение (ML).

ГЛАВА II

СРАВНЕНИЕ И РАЗРАБОТКА НА МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЪГЪЛА НА ПОСТЪПВАНЕ

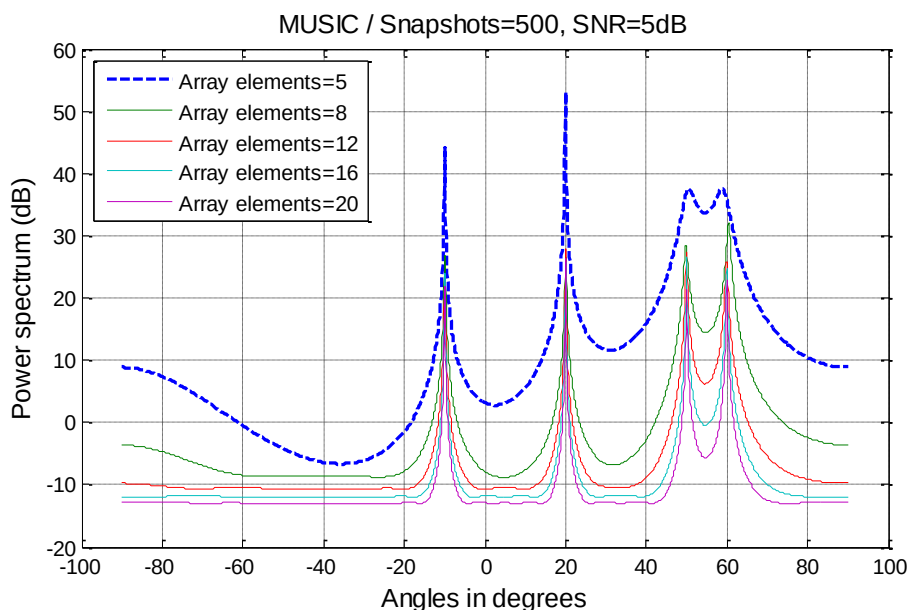
Интензивното използване на ограничения честотен ресурс създава предпоставки за усвояване на нови методи и похвати за намаляване на интерференцията между потребителите. Един от последните методи за предпазване от нежелани смущения е използването на адаптивни антенни решетки. Чрез тях е възможно формирането на радио лъч в точно определена посока. По този начин се намалява средноквадратичната грешка, увеличава се пропускателната способност на канала за връзка и се намаляват смущенията между отделните потребители.

Преди да се формира радио лъча е необходимо да се определи ъгъла на постъпване (DOA). Използването на адаптивна антенна решетка вместо единична антена може да повиши точността при определянето на ъгъла на постъпване. При обработката на приетите сигнали се използва сигнален процесор, а методите анализиращи получената спектрална информация се наричат алгоритми с висока разделителна способност. Целта на предложениия анализ е подобряване на качествените показатели на когнитивното радио чрез прилагане на адаптивна антенна решетка.

II.1. Методика на изследването и резултати:

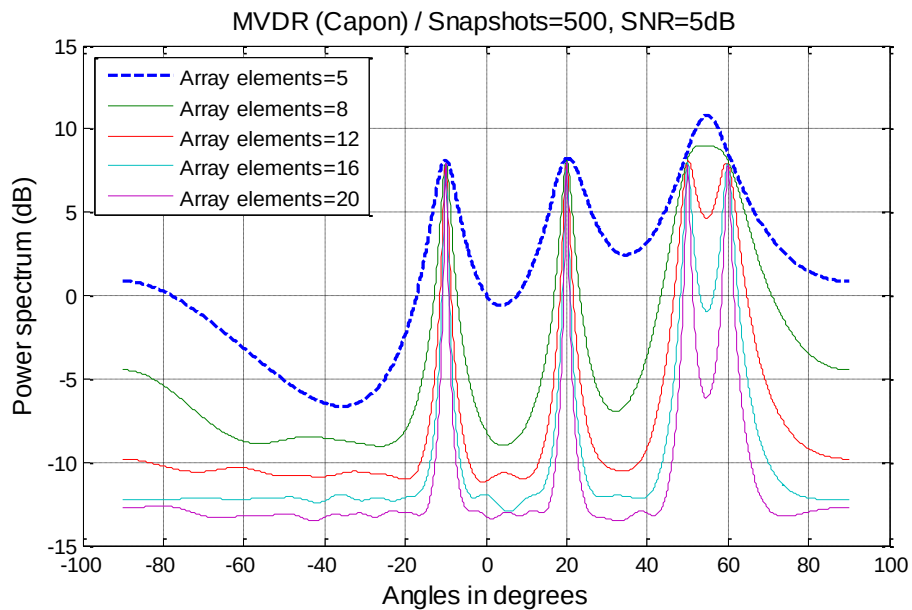
Предприет е подход на симулационно изследване на точността за определяне на ъгъла на постъпване и относителната изчислителна сложност на следните методи и алгоритми: MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS. За целта са съставени софтуерни модели на изследваните методи и алгоритми в програмна среда на MATLAB по метода на Монте Карло. Теоретичните основи на методите са описани в ГЛАВА I на дисертационния труд. Всеки един от експериментите е пробиран с 100 опита и резултатът им е осреднен за да се осигури висока достоверност при сравнението между различните алгоритми. За оценката на производителността е избрана комбинация от ъгли на постъпване разположени на далечно ($\theta_1 = -10^\circ$ и $\theta_2 = 20^\circ$) и близко ($\theta_3 = 50^\circ$ и $\theta_4 = 60^\circ$) разстояние един от друг. В анализа се отчитат броя на елементите на масива,

- Изследване на въздействието на броя на елементите на антенната решетка върху производителността при отношение сигнал/шум 5dB и брой на проби 500.
- Изследване на въздействието на броя на пробите върху производителността при отношение сигнал/шум 5dB и брой на елементите от масива 12. При извеждането на пространствените спектри на MUSIC и Капон (MVDR) е използвано отношение сигнал/шум съответно -10dB и 0dB.
- Изследване на въздействието на различно отношение сигнал/шум върху производителността при брой на пробите 500 и брой на елементите от масива 12.



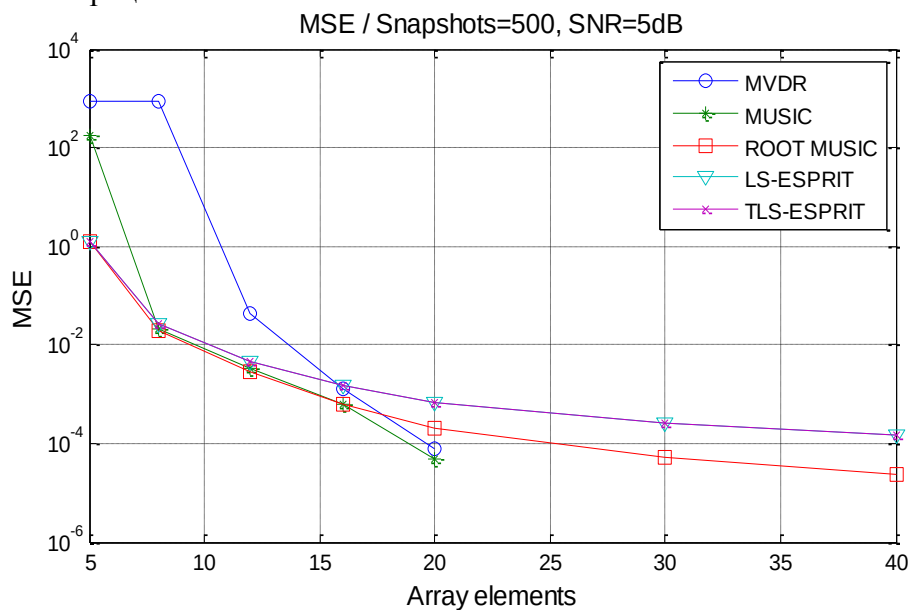
Фигура II.2 Въздействие на броя на елементите на антенната решетка върху производителността при алгоритъма на MUSIC

На Фигура II.2 и Фигура II.3 са показани пространствените спектри за различен брой на елементите на антенната решетка съответно за алгоритмите на MUSIC и Капон (MVDR). При разположени далече един от друг ъгли на постъпване $\theta_1 = -10^\circ$ и $\theta_2 = 20^\circ$ се формират добре изразени пикове и при двата метода. Това дава възможност за безпроблемно изчисляване на ъглите на постъпване дори и при най-малкия брой на елементите на антенната решетка. Когато ъглите на постъпване $\theta_3 = 50^\circ$ и $\theta_4 = 60^\circ$ са разположени близко един до друг, броя на елементите на антенния масив се оказва решаващ при определянето на посоката на пристигане на сигналите. Алгоритъмът на MUSIC дава различни пикове при малък брой на елементите на антенната решетка, докато при алгоритъмът на Капон (MVDR) тези пикове могат да бъдат различени едва при поне 10 елемента на антенния масив.

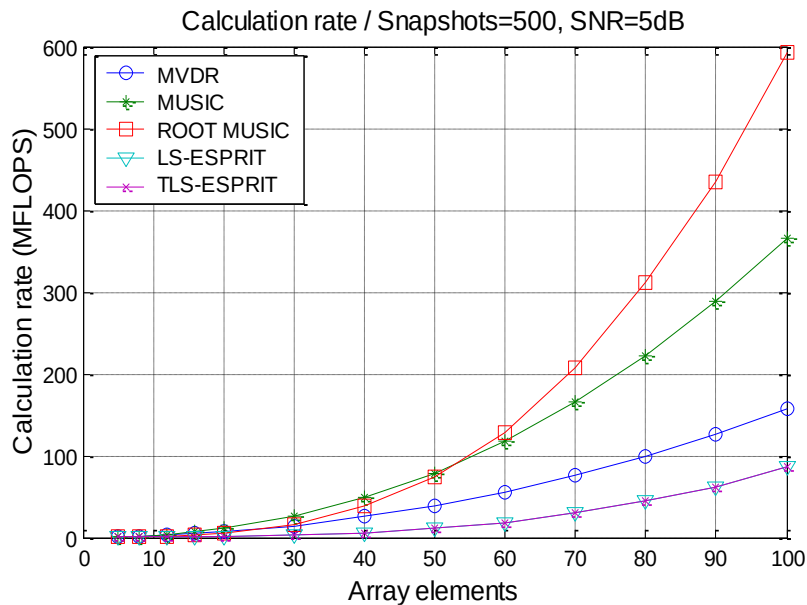


Фигура II.3 Въздействие на броя на елементите на антенната решетка върху производителността при алгоритъма на Капон (MVDR)

На Фигура II.4 е показана средноквадратичната грешка за различен брой на елементите на антенната решетка при алгоритмите на MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS. При нисък брой на елементите на антенната решетка се забелязват нетипично високи стойности на средноквадратичната грешка при алгоритъма на MUSIC. Това се дължи на избраната стъпка от 0.1° при анализиране на пространствения му спектър. Когато стъпката се намали на 0.01° средноквадратичната грешка намалява до нивата на ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS. Намаляването на стъпката от своя страна води до покачване на сложността, която отнема повече процесорно време и повишава броя итерации.



Фигура II.4 Средноквадратична грешка за различен брой на елементите на антенната решетка при алгоритмите на MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS

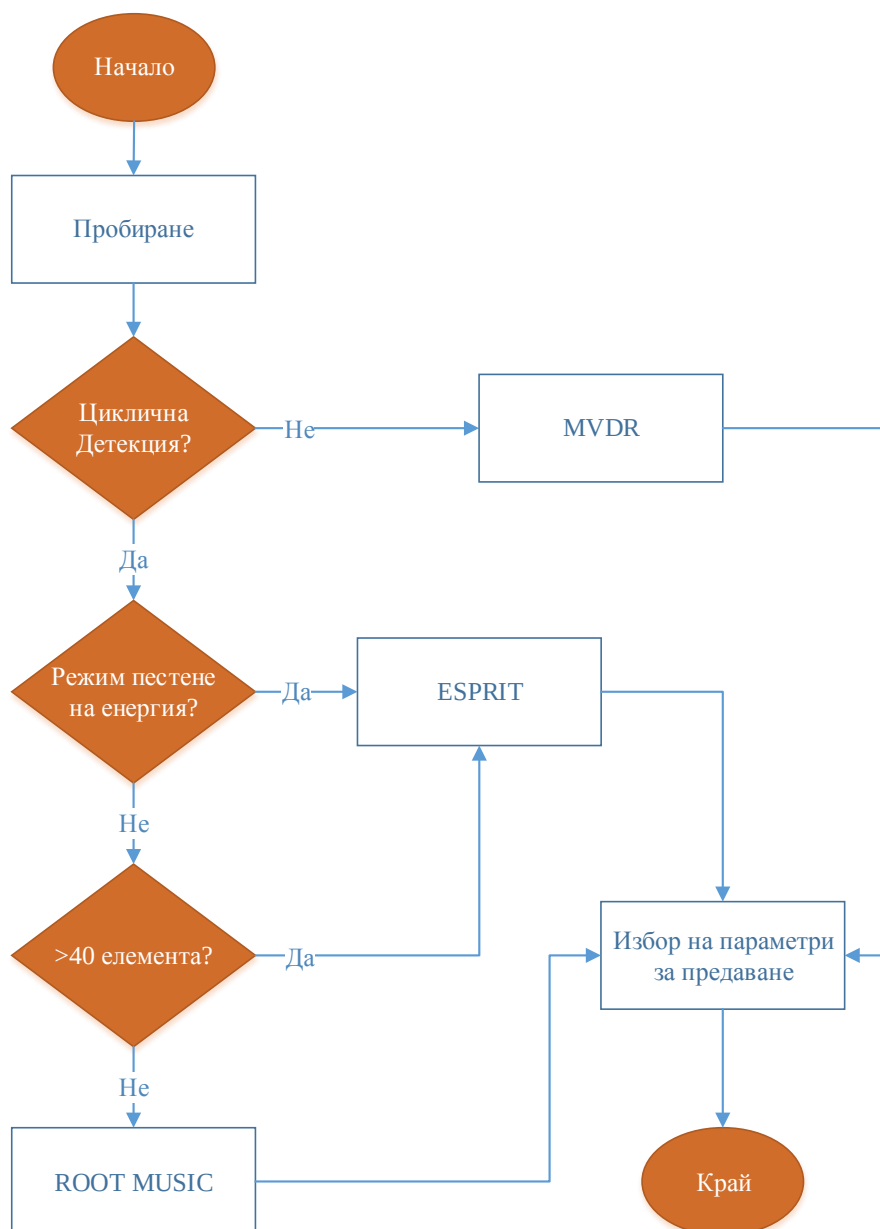


Фигура II.7 Изчислителна сложност за различен брой на елементите на антенната решетка при алгоритмите на MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS

На Фигура II.7 е показана изчислителната сложност за различен брой на елементите на антенната решетка при алгоритмите на MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS. С увеличаването на броя на елементите на антенния масив се увеличава изчислителната сложност, а от там се увеличава процесорното време необходимо за пресмятане на ъглите на постъпване от всички алгоритми. Това се оказва съществен фактор при подбор на метод за определяне на посоката на пристигане на сигналите при когнитивно радио, тъй като устройствата са с малка мощност и имат на разположение ограничен ресурс. От графиката се вижда, че изчислителната сложност драстично се покачва при алгоритъма на ROOT MUSIC след около 40 елемента на антенната решетка. При използването на този метод за голям брой елементи на антенния масив е силно препоръчително да бъде избрана архитектура на процесорното ядро, която се представя по-добре в пресмятането на корен квадратен.

II.2. Алгоритъм за определяне на ъгъла на постъпване

В следствие на получените резултати от горните изследвания в работата се предлага алгоритъм за избор на метод за определяне на ъгъла на постъпване - Фигура II.18. След първоначално инициализиране на системата се осъществява детектиране на спектъра. Когато се съберат достатъчно проби се прави оценка на характеристиките на приетите сигнали. Проверява се дали устройството е в режим на пестене на енергия и каква е размерността на антенната решетка използвана при събирането на данните. На базата на тези проверки се избира метод за определяне на ъгъла на постъпване, като се използва метод на Капон (MVDR) при липса на информация за характеристиките на сигнала. Когато устройството е в режим на пестене на енергия или антенната решетка е с повече от 40 елемента се прилага ESPRIT алгоритъм, който използва най-малко процесорно време от всички изследвани алгоритми. Най-висока точност се получава при ROOT MUSIC алгоритъм, който се прилага при циклична детекция с антенна решетка по-малка от 40 елемента и изключен режим на пестене на енергия. Получените резултати се използват за избор на подходящи параметри за предаване към други когнитивни устройства, така че да не се смущава комуникацията между лицензираните ползватели на честотния спектър и по този начин се повишават качествените показатели в когнитивните радио системи спрямо класическите системи - системите без антенна решетка.



Фигура II.18 Алгоритъм за определяне на ъгъла на постъпване

II.3. Изводи

В настоящата работа се прави анализ на алгоритмите за изчисляване на ъглите на постъпване и се оценява тяхното пряко въздействие върху подобряването на качествените показатели на когнитивното радио. Разгледани са алгоритмите на MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS. Сравнението между тях е направено на базата на въздействието на броя на елементите на антенната решетка, броя на пробите, отношението сигнал/шум, използваното процесорно време и броя на итерациите. В симулациите е използвана комбинация от ъгли на постъпване разположени на близко и далечно разстояние един от друг за оценка на разделителната способност при различните условия на приемане. Наблюдава се очакваното повишаване на точността с увеличаване на броя на елементите на антенния масив, броя на пробите и отношението сигнал/шум за всички разгледани алгоритми. Всеки един от алгоритмите показва своите предимства и недостатъци. Метода на Капон (MVDR) спада към класическите методи за изчисляване на ъгъла на постъпване и може да бъде използван в случаите, когато липсва информация за характеристиките на сигнала и се налага енергийно детектиране. Той има най-ниска производителност в

сравнение с всички разгледани методи, но използва по-малко процесорно време и по-малък брой на операциите в сравнение с алгоритъма на MUSIC. MUSIC, ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS спадът към категорията на подпространствени методи за изчисляване на ъгъла на постъпване и могат да бъдат използвани в случаите, когато имаме информация за характеристиките на сигнала при разширено (циклично) детектиране. MUSIC се представя най-добре при симулациите за броя на елементите на антенния масив, броя на пробите и отношението сигнал/шум, но използва най-много процесорно време и изпълнява най-много итерации в сравнение с останалите методи в тази категория. Това го прави най-неефективния алгоритъм при използването му в когнитивните устройства, на които се налага често сканиране на спектъра и разполагат с ограничен ресурс. При малък брой елементи на антенната решетка, малък брой на пробите и малко отношение сигнал/шум трябва да се използва по-малка стъпка при сканиране на пространствения спектър за да не се изгуби високата му производителност. Това неминуемо води до драстично увеличаване на изчислителната сложност, което допълнително натоварва когнитивните устройства. Тези проблеми са решени при алгоритъма ROOT MUSIC за сметка на леко влошаване на производителността. Неговата изчислителна сложност и използваното процесорно време са значително по-малки в сравнение с алгоритъма на MUSIC. При антенни решетки с повече от 40 елемента, броят на итерациите драстично се покачва и неговото използване при когнитивните устройства става силно непрепоръчително. При ESPRIT-LS този недостатък не съществува и изчислителната му сложност е най-малката спрямо всички разгледани методи до сега. Производителността му е много по-добра от тази при метода на Капон (MVDR), но отстъпва на MUSIC и ROOT MUSIC. ESPRIT-TLS подобрява показателите на ESPRIT-LS за сметка на малко по-високата изчислителна сложност. ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS са най-подходящи за използване при когнитивното радио за определяне на ъгъла на постъпване при наличието на информация за характеристиките на приеманите сигнали.

Резултатите получени в настоящата работа дават представа за ефективността на алгоритмите за изчисляване на ъгъла на постъпване при използването им за подобряване на качествените показатели в когнитивните радио мрежи. Затова е предложен обобщен алгоритъм за определяне на ъгъла на постъпване - Фигура II.18, който взема предвид характеристиките на приетите сигнали, размерността на антенната решетка и наличните енергийни ресурси при избора на метод за определяне на ъгъла на постъпване, което води до увеличаване на ефективността на когнитивните устройства и по този начин се повишават качествените показатели в когнитивните радио системи спрямо класическите системи - системите без антенна решетка.

ГЛАВА III

СРАВНЕНИЕ И РАЗРАБОТКА НА МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ДЕТЕКТИРАНЕ НА СВОБОДНИТЕ КАНАЛИ

Както се видя от предишната част на настоящата разработка чрез детектиране на спектъра, когнитивното радио изисква събирането на информация за обкръжаващата го радио среда. След анализиране на измерените данни, то може да адаптира параметрите на мрежата, в която се използва, така че да се намалят нивата на смущенията, да се оптимизира разположението на радиочестотните ресурси – честотни канали времеви интервали, посока на излъчване и т.н. Затова от особено значение е прилагане на високо ефективни методи за детектиране заетостта на спектъра. На съвременния етап това става чрез прилагане на подходи от областта на машинното обучение и изкуствения интелект.

На основата на натрупаните резултати от тази работа, в следствие на денонощното измерване и монитиране на спектъра, в настоящата част се представя изследване на различни методи за клъстеризация подходящи за анализиране на сигнали получени от широк честотен обхват. Разгледани са методи използващи агломеративна клъстеризация,

К-средни величини и К-медоиди. Сравнена е тяхната ефективност при детектиране на свободни канали на базата на броя на клъстерите, отношението сигнал/шум, средноквадратичната грешка, относителното изчислително време и заетостта в канала.

Предлага се предварителна обработка на данните от измерването да се извърши чрез анализ на главните компоненти. Постигнато е значително намаляване на изчислителната сложност. Целта на предложения анализ е подобряване на качествените показатели на когнитивното радио чрез прилагане на предварителен анализ на главните компоненти и клъстеризация.

III.1. Методика на изследването и резултати:

В работата е изследван подход с комбиниране на различни методи за клъстеризация с алгоритми и методи за първична обработка на измерванията на мощностните спектрограми на приетия сигнал от създадената база данни.

Базата данни е получена в резултат от денонощен мониторинг на спектъра чрез софтуерно дефинирано радио. Монитиран е 900MHz честотен обхват за мобилни клетъчни комуникации, от която могат да бъдат извадени различни сценарии на използвани системи и активност на заемане на честотните канали.

Методите за първична обработка водят до редуциране на пространството от независими променливи, като улесняват процеса на клъстеризацията и намаляват изчислителната сложност на обработка. По този начин обработката и най-вече детектирането на свободни канали става възможно и може да се имплементира в съвременните радиокомуникационни системи от следващо поколение.

Изследваните имат за цел да определят кои от методите имат най-висока точност и най-ниска изчислителна сложност. Изследвани са методите и алгоритмите, математически описани в предишната част. Всяка комбинация от тях се използва за детектиране на свободните канали от радио интерфейса на мрежите от следващи поколения. За детектиране са изследвани следните комбинации:

- 1. Детектиране без предварителна обработка и:**
 - Агломеративна клъстеризация с Евклидово разстояние и метрика за присъединяване по метода на Вард;
 - Клъстеризация с К-средни величини и квадратно Евклидово разстояние;
 - Клъстеризация с К-медоиди и Евклидово разстояние.
- 2. Детектиране с PCA анализ на предварителна обработка и:**
 - Агломеративна клъстеризация с Евклидово разстояние и метрика за присъединяване по метода на Вард;
 - Клъстеризация с К-средни величини и квадратно Евклидово разстояние;
 - Клъстеризация с К-медоиди и Евклидово разстояние.
- 3. Детектиране с Йорт анализ на предварителна обработка и:**
 - Агломеративна клъстеризация с Евклидово разстояние и метрика за присъединяване по метода на Вард;
 - Клъстеризация с К-средни величини и квадратно Евклидово разстояние;
 - Клъстеризация с К-медоиди и Евклидово разстояние.
- 4. Детектиране с модифициран Йорт анализ на предварителна обработка и:**
 - Агломеративна клъстеризация с Евклидово разстояние и метрика за присъединяване по метода на Вард;
 - Клъстеризация с К-средни величини и квадратно Евклидово разстояние;
 - Клъстеризация с К-медоиди и Евклидово разстояние.

5. За сравнение е добавен и метод за енергийна детекция, който е настроен да работи при същите параметри както клъстеризиращите методи.

При всички методи с предварителна обработка се извършва редуциране на пространството по следния начин:

- При PCA анализ се взимат първите четири стойности на главните компоненти.
- При Йорт анализ се взимат четири параметъра: активност, мобилност, комплексност и средна стойност:

$$Mean(f) = \frac{1}{N} \sum f(t) \quad (III.1)$$

- Предложен е метод за редуциране на пространството на базата на метода на Йорт, в който се променя изчисляването на активността по следния начин:

$$Activity(f) = Mean(f^2(t)) \quad (III.2)$$

Използват се резултати от измерванията на приетата мощност, натрупани в базата данни за:

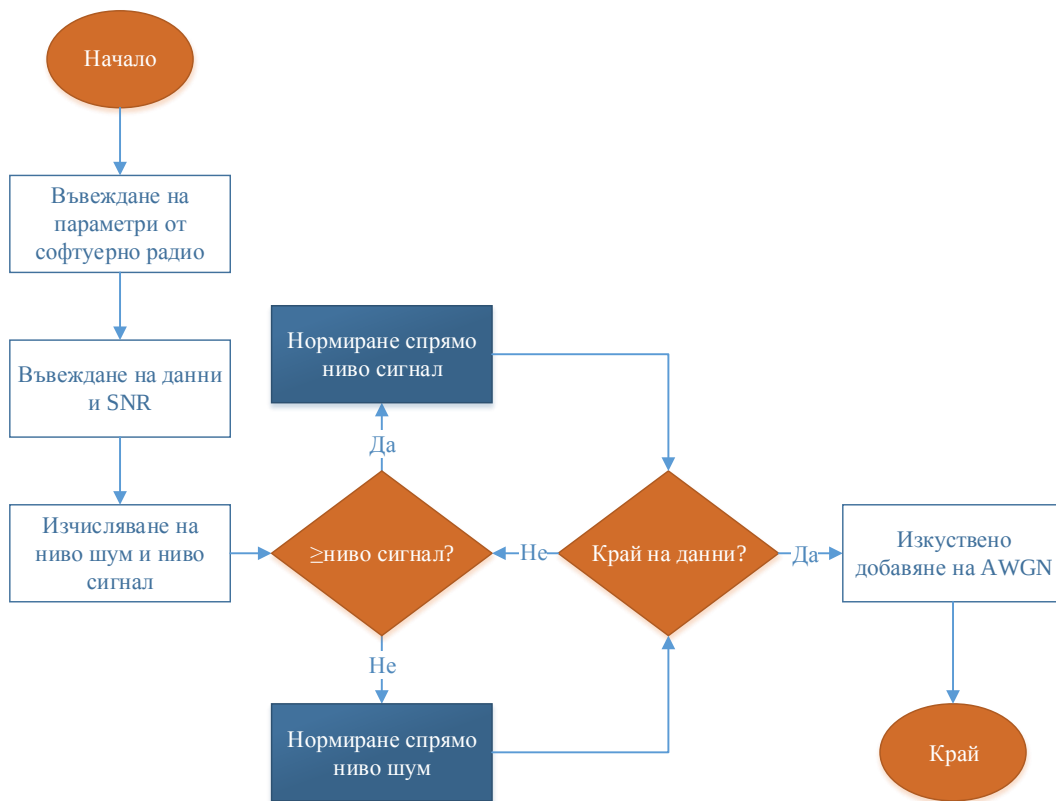
- Различни честотни ленти;
- Различна активност на използвания спектър във времето и по честота;
- Различно времеви интервали и периоди от време;
- Различна дисперсия на мощността на приетия сигнал.

За да могат методите да се изследват симулационно с реални спектрограми от база данни в работата се предлага следния обобщен подход на пробиране на методите и алгоритмите и техните комбинации за детектиране на спектъра:

1. Взима се извадка от базата данни с реални резултати от измервания на спектъра. Същата се нормира спрямо отношение сигнал/шум и се оценява комплексната заетост на спектъра. Формира се еталонна извадка. Отношението сигнал/шум е избрано да бъде 10dB.
2. За всяка комбинация са направени симулационни изследвания в програмна среда на MATLAB, като се променя отношението сигнал/шум на изкуствено добавен адитивен бял Гаусов шум.
3. Оценката на заетостта на канала, получена с изследвания метод за детектиране на спектъра се сравнява с еталонната извадка и евристично определените свободни зони от изследвания спектър.
4. Всеки експеримент е пробирен по 100 пъти и получените данни са осреднени за да се осигури тяхната статистическа достоверност.
5. Активността в канала е съответно 5% и 15%.

Таблица III.1 Изследвани сценарии с различна заетост на спектъра

Сценарий:	Заетост на канала:	Тип данни:
A1	47%	симулирани
A2	18%	симулирани
A3	74%	симулирани
A5	95%	симулирани
A8	6%	симулирани



Фигура III.2 Алгоритъм за нормиране на база данни

На Фигура III.2 е показан алгоритъм за нормиране на база данни с реални резултати от измервания. След въвеждането на параметрите от софтуерно дефинираното радио се изчислява честотната му лента:

$$B = \frac{f_s}{N} \quad (\text{III.3})$$

където N е броят на точките използвани за преобразуването на Фурие, а f_s е честотата на дискретизация на софтуерно дефинираното радио. След това се въвежда базата данни с реални резултати от измервания на спектъра съгласно Таблица III.1 и изследваното отношение сигнал/шум. На следваща стъпка се изчислява нивото на мощността на шума в приемника:

$$P_n = N_0 + 10 \lg(B) + NF \quad (\text{III.4})$$

където N_0 е спектралната плътност на мощността на топлинния шум, B е широчината на честотната лента и NF е коефициентът на шума на приемника на софтуерно дефинираното радио. Спектралната плътност на мощността на топлинния шум се дефинира по следния начин:

$$N_0 = kT \quad (\text{III.5})$$

където $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ е константата на Болцман, а T е температурата по скалата на Келвин. Нивото на мощността на сигнала в приемника се определя по следната формула:

$$P_s = P_n + \gamma \quad (\text{III.6})$$

където P_n е мощността на шума, а γ е отношението сигнал/шум. След това започва обхождане на базата данни като се прави сравнение с нивото на мощността на сигнала в приемника и се нормира спрямо ниво сигнал, ако е по-голямо и спрямо ниво шум, ако е по-малко или равно. Когато се достигне до края на базата данни се добавя изкуствено адитивен бял Гаусов шум с плътност на разпределението:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.7})$$

където σ^2 е дисперсията на шума, а μ е математическото очакване на разпределението.

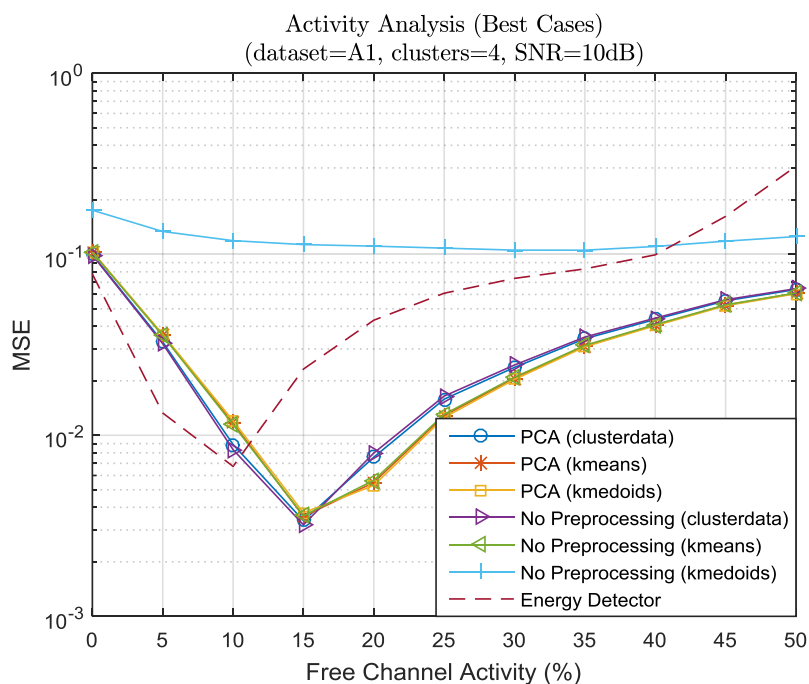
III.1.1. Сценарий A1 - 47% заетост на спектъра от честотния обхват

Общата заетост в изследвания времеви интервал и честотен обхват е 46.97%. Данните са нормирани предварително за да може да се направи точна оценка на средноквадратичната грешка при последващата обработка и за да се постигне по-голяма достоверност на получените резултати.

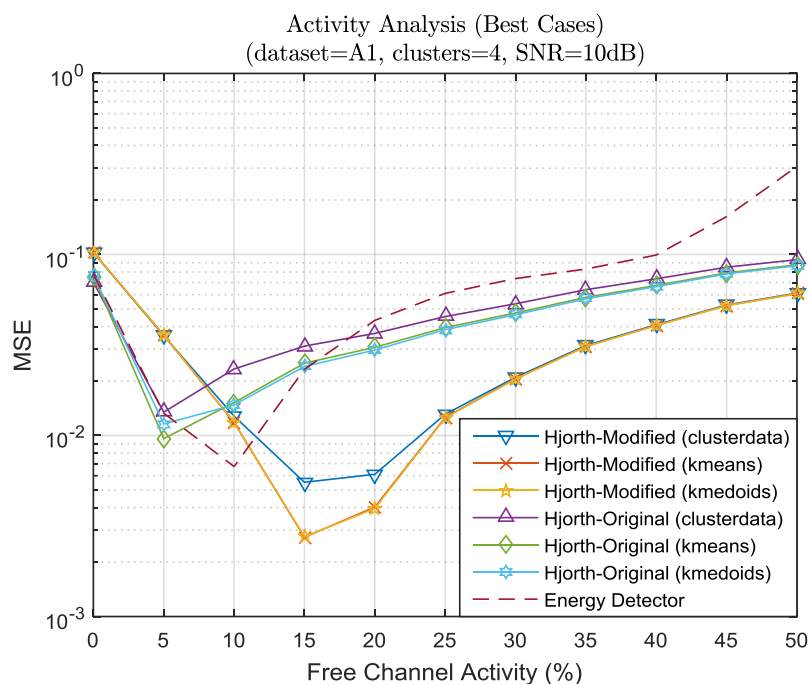
III.1.1.1. Изследване на средноквадратичната грешка при различна заетост в канала при данни A1

Изследването е направено, като се променя % от време за което се смята, че разглеждания честотен канал е свободен. За всеки изследван метод и комбинации от тях се изчислява средноквадратичната грешка от 100 опита. Грешката се определя като се сравняват оценките от метода, с който е направено детектиране на заетостта на канала с оценката от двоична карта на заетостта за всяка честота. Всички резултати са получени при отношение сигнал/шум 10dB. Параметърът заетост на канала е важен, защото той определя интегралният праг, с който се извършва оценката дали даден канал е свободен или зает.

На Фигура III.6 е показана средноквадратичната грешка при различна заетост в канала без предварителна обработка и с предварителен анализ на главните компоненти. За сравнението са използвани три метода за клъстеризация съответно агломеративни, К-средни величини и К-медоиди. За всеки един от тях се прави изследване с и без предварителен анализ на главните компоненти. Накрая е добавен и метод за енергийна детекция, който е настроен да работи при същите параметри както клъстеризиращите методи. При заетост на канала от 15% почти всички предложени методи показват най-добри резултати с изключение на метода с К-медоиди без предварителна обработка.



Фигура III.6 Средноквадратична грешка при различна заетост в канала без предварителна обработка и с предварителен анализ на главните компоненти

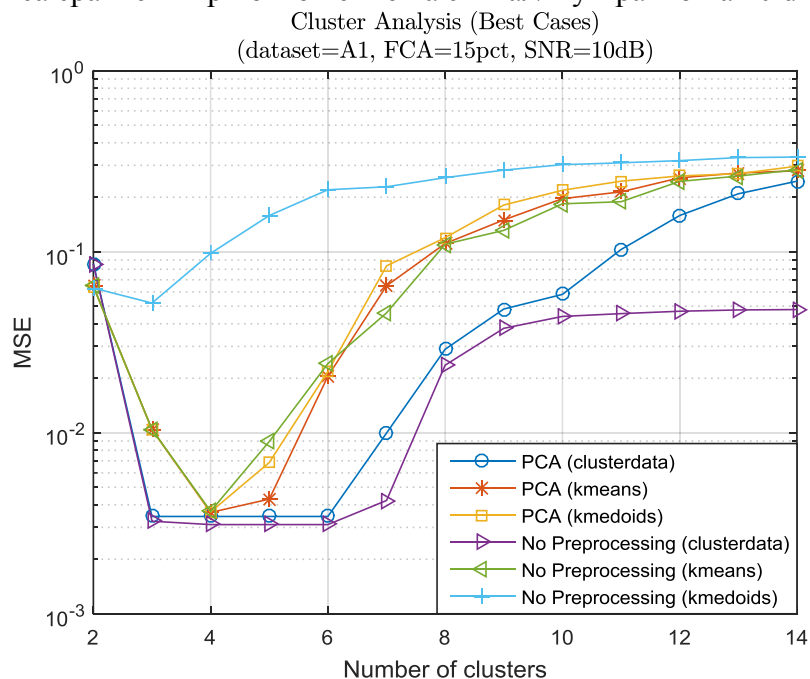


Фигура III.7 Средноквадратична грешка при различна заетост в канала с предварителна обработка с модифицирани и немодифицирани параметри на Йорт

Немодифицираните параметри на Йорт постигат най-добри резултати при 5% заетост в канала. Това е значително подобряване в сравнение с модифицираните параметри на Йорт, където най-добри резултати се получават при 15-20% заетост в канала.

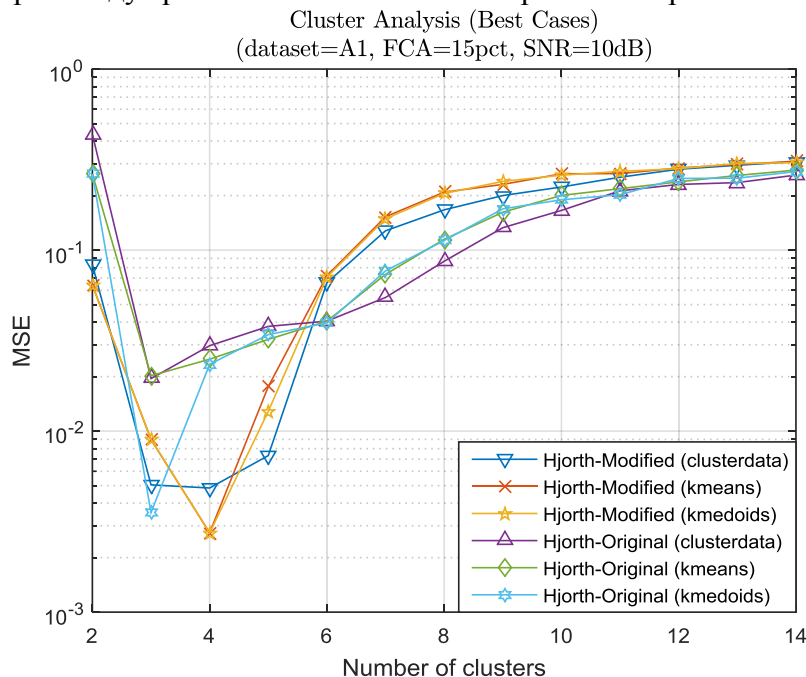
III.1.1.2. Изследване на средноквадратичната грешка в зависимост от броя на клъстерите за данни A1

Броят на използваните клъстери пряко определя изчислителната сложност. Затова тук се изследва зависимостта на грешката от броя на използвани клъстери при клъстеризация. Всички методи са сравнени при отношение на сигнал/шум равно на 10 dB.



Фигура III.21 Средноквадратична грешка при различен брой на клъстерите без предварителна обработка и с предварителен анализ на главните компоненти

На Фигура III.21 се вижда, че минималния брой на клъстерите, при който грешката е най-малка варира между три и шест. Оптималният брой клъстери всички методи е четири.

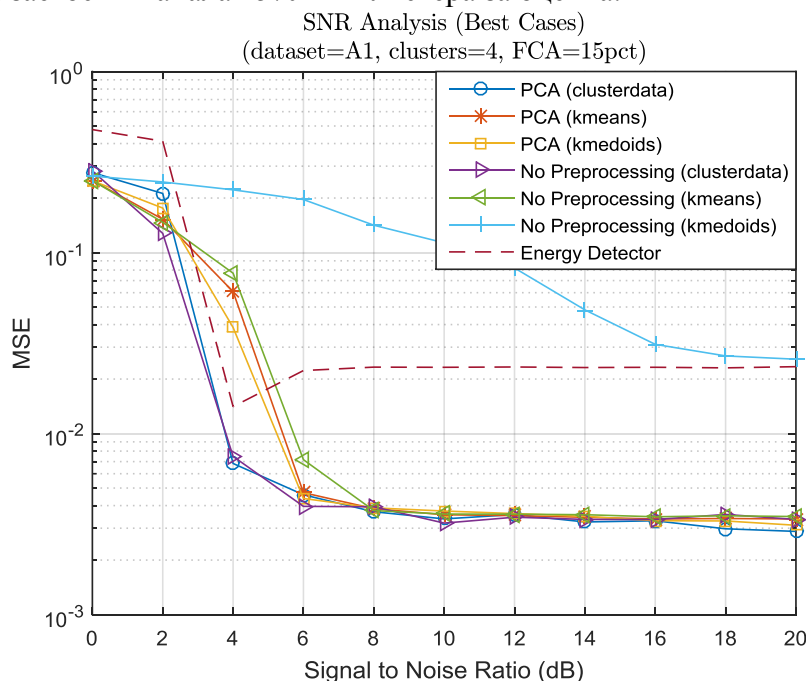


Фигура III.22 Средноквадратична грешка при различен брой на клъстерите с предварителна обработка с модифицирани и немодифицирани параметри на Йорт

Фигура III.22 показва, че при немодифицираните параметри на Йорт оптималния брой на клъстерите е три докато при модифицираните параметри на Йорт е четири. При различните методи оптималният брой клъстери варира между три и четири.

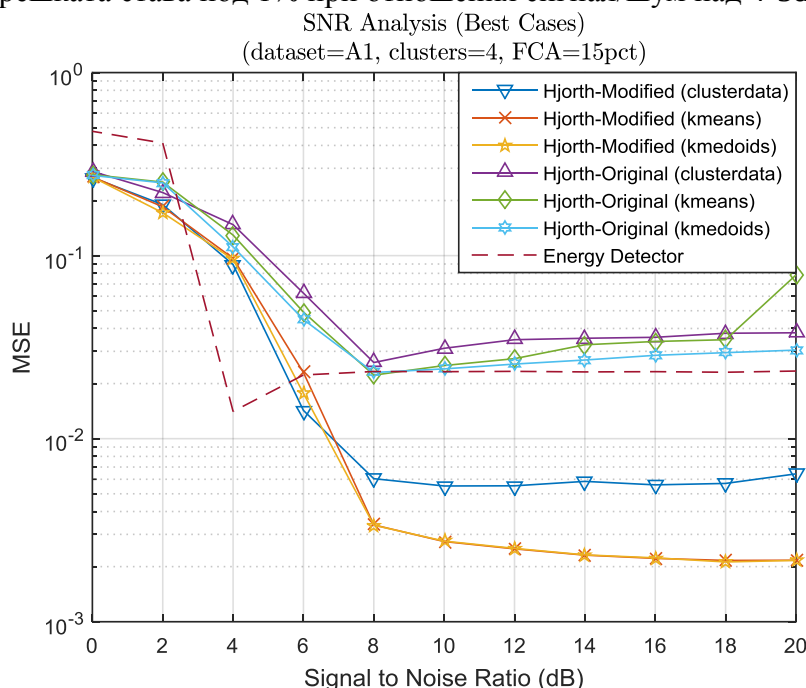
III.1.1.3. Зависимост на средноквадратичната грешка при промяната на отношението сигнал/шум за данни A1

Изследването е извършено чрез добавяне на адитивен бял Гаусов шум към еталонните данни, праг на заетост в канала 15% и 4 клъстера за оценка.



Фигура III.34 Средноквадратична грешка при различно отношение сигнал/шум

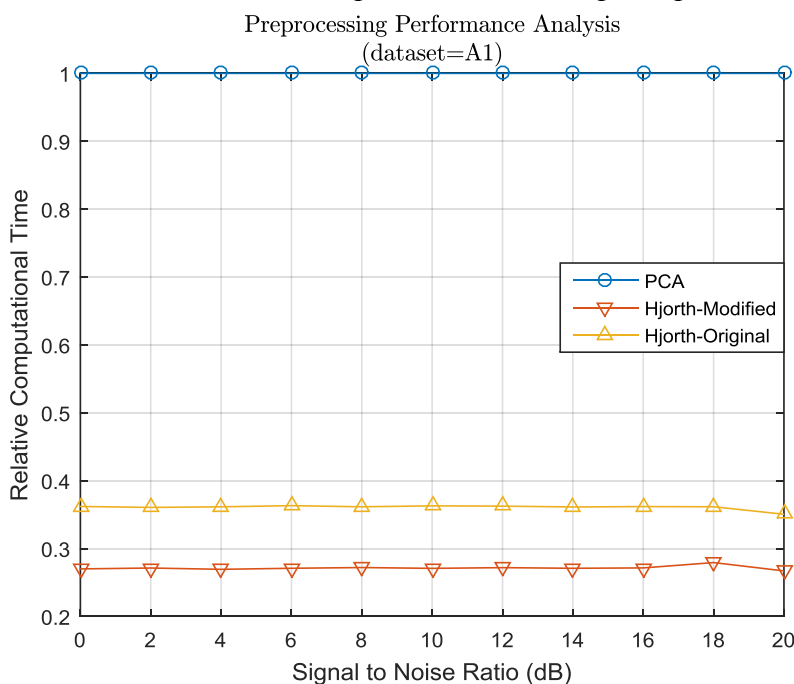
От графиката се вижда, че почти всички методи показват сходна точност при различно отношение сигнал/шум с изключение на метода с К-медоиди без предварителна обработка. Вижда се, че грешката става под 1% при отношения сигнал/шум над 4-5dB.



Фигура III.35 Средноквадратична грешка при различно отношение сигнал/шум с предварителна обработка с модифицирани и немодифицирани параметри на Йорт

От Фигура III.35 се вижда, че модифицираните параметри на Йорт имат по-малка средноквадратична грешка в сравнение немодифицираните параметри на Йорт.

III.1.1.4. Изчислителна сложност при методите за предварителна обработка



Фигура III.53 Относителна изчислителна сложност при различно отношение сигнал/шум и различни методи за предварителна обработка

Освен точността на метода от голямо значение е и неговата изчислителна сложност. Тя определя мястото на първичната обработка на спектъра, особено за радиомрежите от

следващо поколение и изкуствен интелект. Или къде в тяхната мрежова архитектура, в кой възел ще се извършва обработка на спектъра.

Изследванията са извършени като се сравнява времето за намиране на решение на съответния метод спрямо времето необходимо на PCA анализа. Сравнява се бързодействието, което е в пряка зависимост от изчислителната сложност спрямо реперен метод. Резултатите са статистически осреднени за 100 опита.

На Фигура III.53 е показана относителната изчислителна сложност при различно отношение сигнал/шум и различни методи за предварителна обработка. Най-малка средна изчислителна сложност има при предварителна обработка с параметрите на Йорт, а най-голяма при предварителния анализ на главните компоненти.

III.1.2. Сценарий A5 - 95% заетост на спектъра от честотния обхват

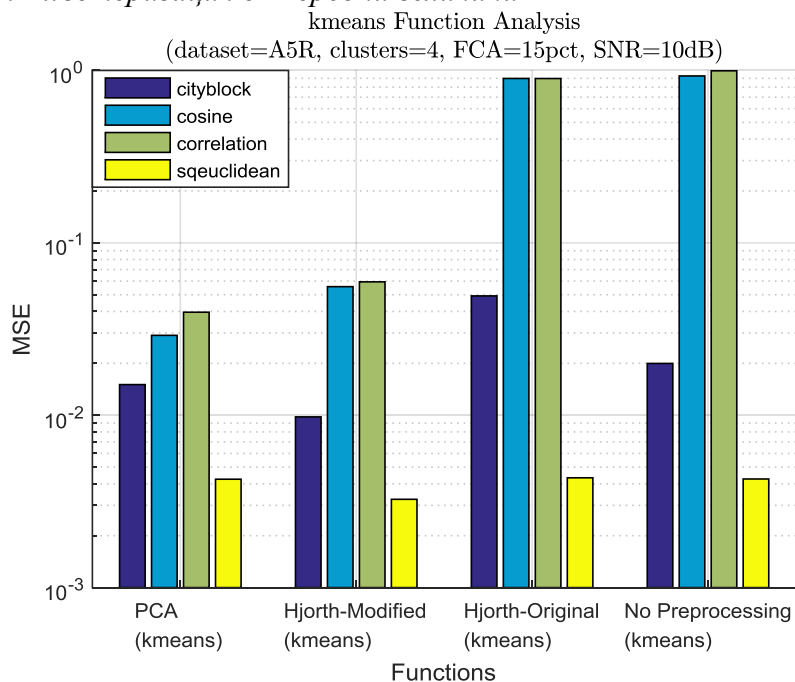
Общата заетост в изследвания времеви интервал и честотен обхват е 95.25%. Поради високата заетост на честотните канали априорно е ясно, че точността на изследваните методи и алгоритми ще бъде малка поради малкото тегло на клъстера, който е свързан с оценката на шума. Затова в работата се предлага добавяне на изкуствен клъстер, формиран от нивото на мощността на шума в приемника [82]:

$$N_{RX} = N_0 + 10lg(B) + NF \quad (III.8)$$

където N_{RX} е реперният шум, N_0 е спектралната плътност на мощността на топлинния шум, B е широчината на честотната лента и NF е коефициентът на шума на приемника на софтуерно дефинираното радио използвано за измерване и получаване на базата данни. Тази оценка е подходяща за използване, защото най-лесно и точно определя изкуствено създадения клъстер на шума и напълно съответства на реалните условия, при които ще се използват изследваните алгоритми и методи.

III.1.2.1. Обобщени резултати за данни A5

III.1.2.1.1. Клъстеризация с K -средни величини

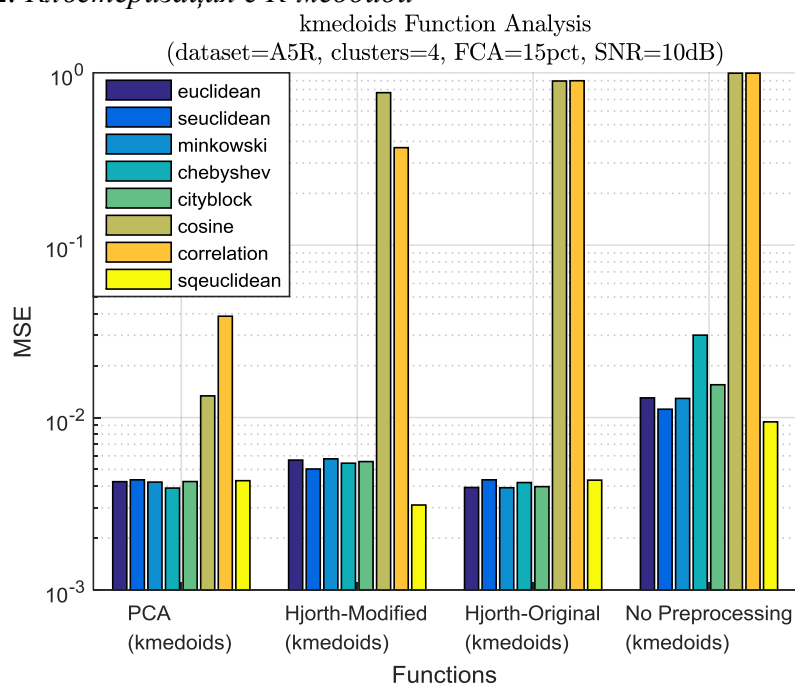


Фигура III.65 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при клъстеризация с K -средни величини при набор от данни A5 и добавен реперен шум

При всички използвани методи най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при квадратно Евклидово разстояние. Предварителният анализ на главните

компоненти подобрява резултатите при клъстеризация за всяко едно разстояние. Използването на модифицираните параметри на Йорт води до намаляване на средноквадратичната грешка при мярки за разстояние Манхатън и квадратно Евклидово в сравнение с предварителния анализ на главните компоненти.

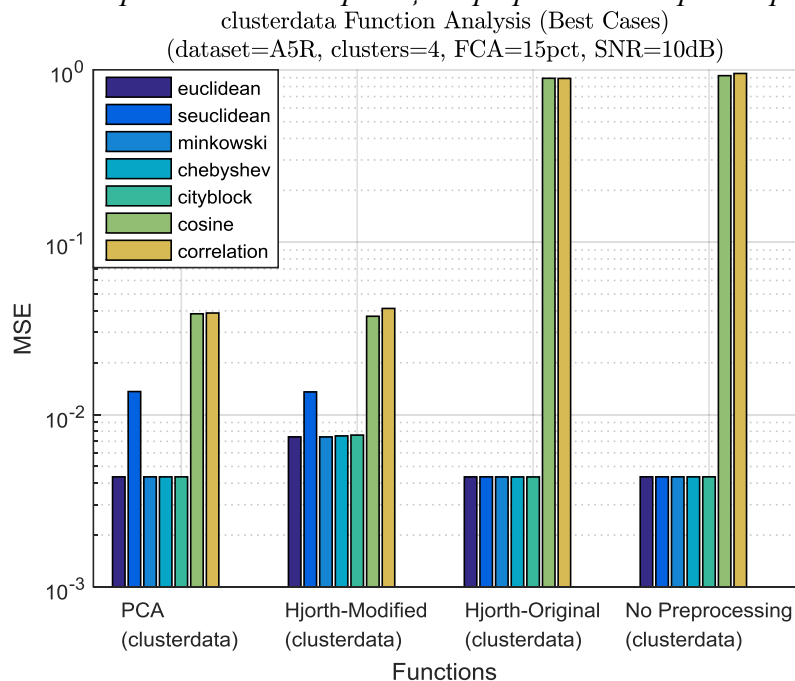
III.1.2.1.2. Клъстеризация с K -медоиди



Фигура III.67 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при клъстеризация с K -медоиди при набор от данни A5 и добавен реперен шум

Най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при квадратно Евклидово разстояние. Използването на PCA и Йорт анализ подобряват резултатите при клъстеризация с K -медоиди за всяко едно разстояние.

III.1.2.1.3. Агломеративна клъстеризация при различни мярки за разстояние



Фигура III.69 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при агломеративна клъстеризация при набор от данни A5 и добавен реперен шум

Фигура III.69 показва средноквадратичната грешка при различни мярки за разстояние при агломеративна клъстеризация при набор от данни A5 и добавен реперен шум. Най-ниски стойности на средноквадратичната грешка при всички методи са постигнати при мярките за разстояние: Евклидово, Минковски, Чебишев и Манхатън. Сходни резултати се получават при методите с предварителен анализ на главните компоненти и без предварителна обработка и разстояния: Евклидово, Минковски, Чебишев и Манхатън в сравнение с. Средноквадратичната грешка има по-ниска стойност при мярките за разстояние косинусово и корелационно. Използването на модифицираните параметри на Йорт също води до намаляване на средноквадратичната грешка при мярки за разстояние: косинусово и корелационно в сравнение с метода без предварителна обработка.

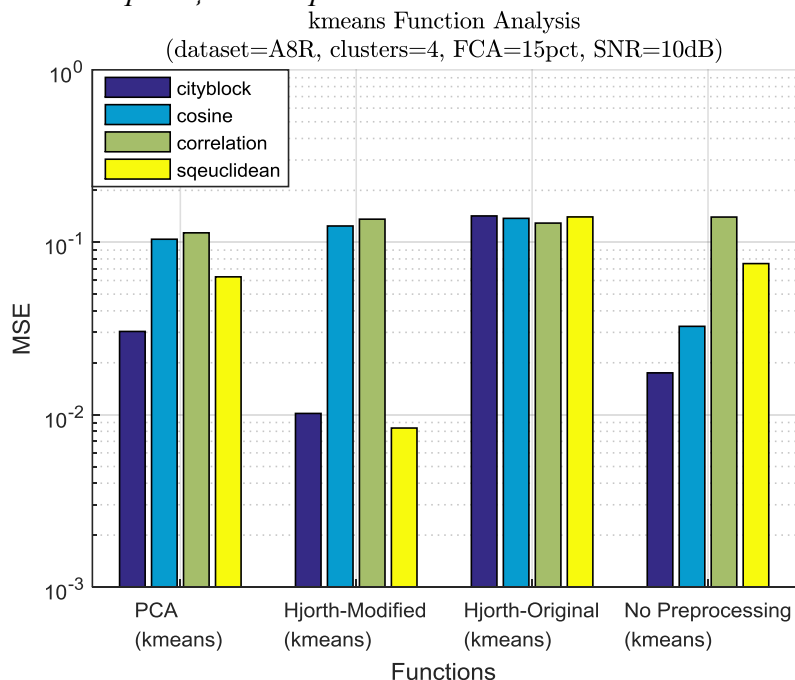
Всички зависимости и резултати от това изследване след добавянето на реперен шум имат сходен характер с тези от данните за A1, A2 и A3.

III.1.3. Сценарий A8 - 6% заетост на спектъра от честотния обхват

Общата заетост в изследвания времеви интервал и честотен обхват е 5.98%. Поради ниската заетост на честотните канали, при всички изследвания допълнително е фиксирано нивото на шума – реперен шум. Същото спомага процеса на клъстеризация и както се вижда значително подобрява характеристиките на методите за сметка на пропорционално увеличаване на изчислителната сложност. Нивото на шума априорно може да се определи на базата на нивото на топлинния шум на входа на приемника и неговия коефициент на шума.

III.1.3.1. Обобщени резултати за данни A8

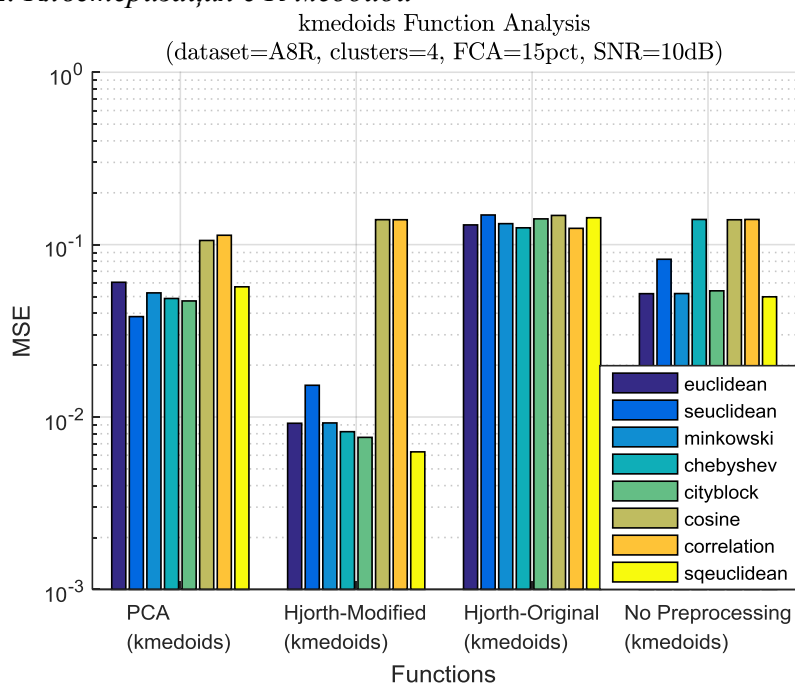
III.1.3.1.1. Клъстеризация с K-средни величини



Фигура III.78 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при клъстеризация с K-средни величини при набор от данни A8 и добавен реперен шум

Предварителният анализ на главните компоненти подобрява резултатите от клъстеризация при мярки за разстояние корелационно и квадратно Евклидово докато при Манхатън и косинусово стойностите на средноквадратичната грешка са влошени. Използването на модифицираните параметри на Йорт води до намаляване на средноквадратичната грешка при мярки за разстояние Манхатън и квадратно Евклидово в сравнение с метода без предварителна обработка.

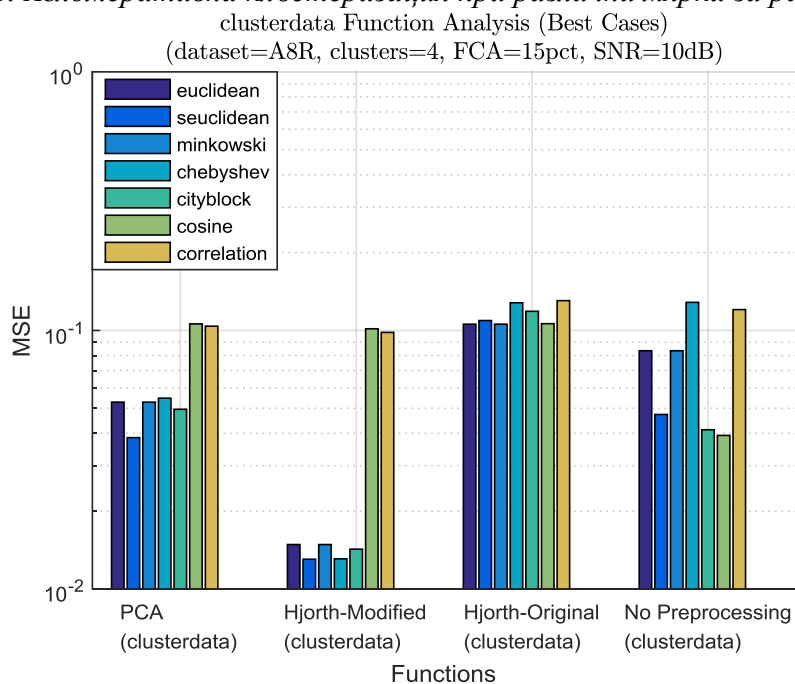
III.1.3.1.2. Клъстеризация с K-медоиди



Фигура III.80 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при клъстеризация с K-медоиди при набор от данни A8 и добавен реперен шум

При предварителният анализ на главните компоненти се получават сходни стойности на средноквадратична грешка в сравнение с метода без предварителна обработка. Най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при почти всички мярки за разстояние на модифицираните Йорт параметри с изключение на мярките за разстояние косинусово и корелационно, където стойностите се запазват същите.

III.1.3.1.3. Агломеративна клъстеризация при различни мярки за разстояние



Фигура III.82 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при агломеративна клъстеризация при набор от данни A8 и добавен реперен шум

Фигура III.82 показва средноквадратичната грешка при различни мярки за разстояние при агломеративна клъстеризация при набор от данни A8 и добавен реперен шум. При

предварителният анализ на главните компоненти се получават по-добри резултати при почти всички мярки за разстояние в сравнение с метода без предварителна обработка с изключение на мярките за разстояние Манхатън и косинусово, където резултатите леко се влошават. Най-малки стойности на средноквадратичната грешка има при предварителна обработка с модифицираните параметри на Йорт и всички мярки за разстояние.

III.2. Алгоритъм за детектиране на свободните канали

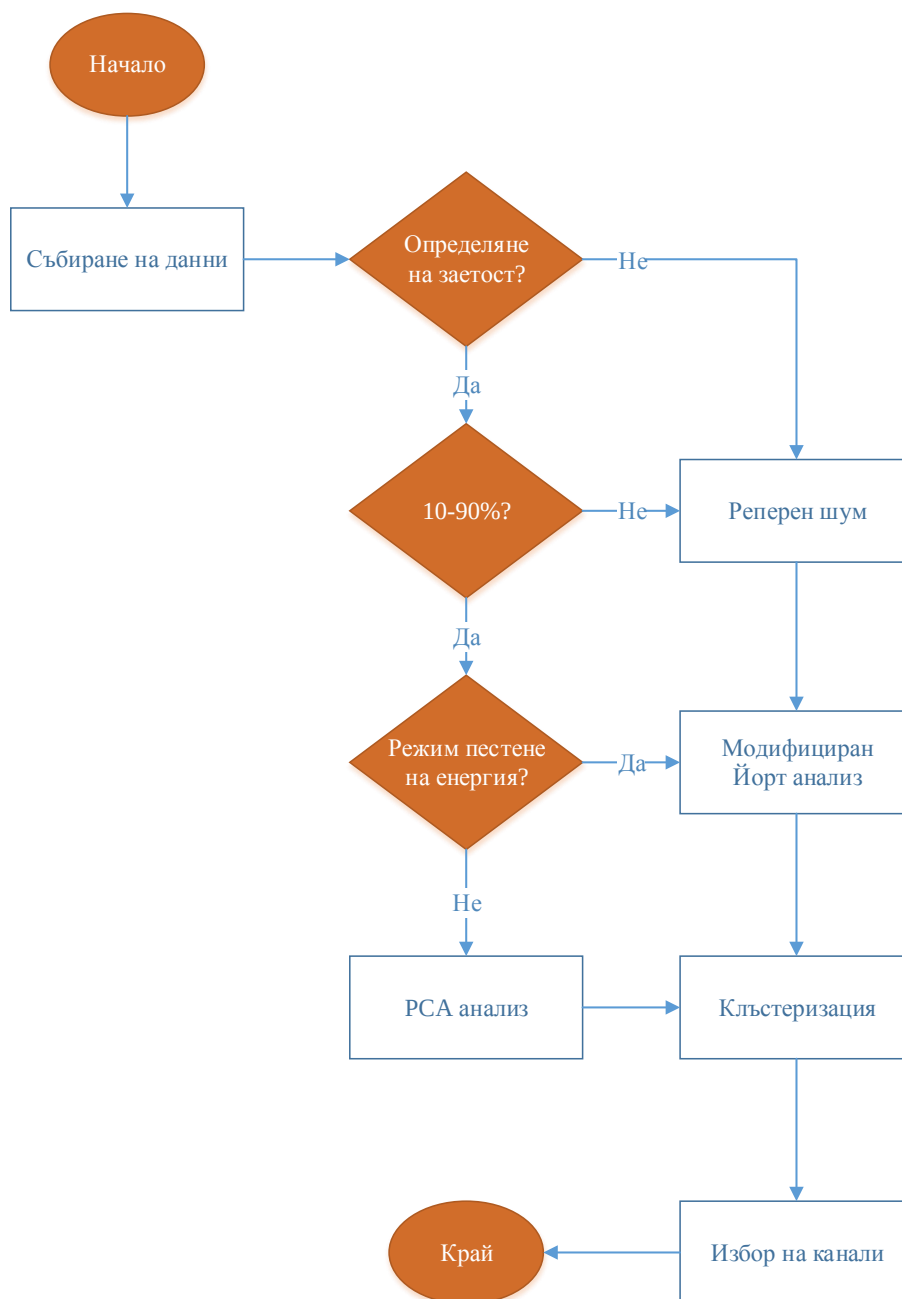
Таблица III.2 съдържа обобщени резултати от направените изследвания. При заетост на канала под 10% и над 90% задължително се добавя реперен шум. По този начин се запазва по-високата точност спрямо класическия метод - метода за енергийно детектиране. Методът използващ предварителна обработка с модифицираните параметри на Йорт постига много добри резултати при всяка една заетост на канала. Алгоритмите използващи РСА анализ може да бъдат използвани при заетост над 10%. При тях се получават най-добри резултати в диапазона 10-90% заетост.

Таблица III.2 Обобщени резултати получени след обработка на симулирани данни

Заетост на канала:	Метод за обработка:	Реперен шум:
<10%	<u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди)	Задължителен
10-90%	<u>Анализ на главните компоненти</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди) <u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди)	-----
90%<	<u>Анализ на главните компоненти</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди) <u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди)	Задължителен

В резултат от направените изследвания и изводи в работата се предлага комбиниран алгоритъм за детектиране на свободните канали - Фигура III.83. Той включва в себе си комбинация от методи за редуциране на пространството и методи за клъстеризация. В резултат се постига повишаване на точността и оптимизиране на използваните ресурси, което води до намаляване на интерференцията и увеличаване на ефективността на когнитивните устройства.

След първоначално инициализиране на системата се осъществява сканиране на спектъра. Когато се съберат достатъчно на брой данни се изчислява общата заетост по време и по честота. Когато общата заетост е извън интервала 10-90% или не може бъде определена се добавя реперен шум последван от модифициран Йорт анализ, при който се получават най-малки стойности на средно квадратичната грешка. Модифицираният Йорт анализ се използва отново в режим на пестене на енергия, който използва най-малко относително изчислително време от всички изследвани алгоритми. Най-висока точност се получава при РСА анализ, който се прилага при обща заетост в интервала 10-90% и изключен режим на пестене на енергия. Накрая се извършва клъстеризация и резултатите от нея се използват за избор на подходящи свободни канали за извършване на комуникация с други когнитивни устройства, като по този начин се повишават качествените показатели в когнитивните радио системи спрямо класическия метод - метода за енергийно детектиране.



Фигура III.83 Алгоритъм за детектиране на свободните канали

III.3. Изводи

Направените изводи по-долу позволяват избора на метод и комбинация от алгоритми за клъстеризация подходящи за детектиране на свободните канали в радиомрежите от следващо поколение. Изборът се определя спрямо най-малката средно квадратична грешка и най-малката относителна изчислителна сложност при всички сценарии на заетост на спектъра и канала за връзка, като по този начин се повишават качествените показатели в когнитивните радио системи спрямо класическия метод - метода за енергийно детектиране. Изводите са следните:

1. За всички сценарии на заетост на спектъра всички изследвани методи за клъстеризация с предварителна обработка имат по-малка средноквадратична грешка спрямо класическия метод - метода за енергийно детектиране.

2. Минималният брой на клъстерите, при който грешката е най-малка варира между три и шест. Оптималният брой клъстери за всички методи е четири. При заетост на спектъра под 5% оптималния брой на клъстерите е два.
3. Предварителният анализ на главните компоненти или чрез параметрите на Йорт помага за понижаване на необходимото процесорно време за извършване на изчисленията при клъстеризацията в сравнение с метода без предварителна обработка.
4. При всички изследвани сценарии на спектъра клъстеризацията с предварителен анализ чрез модифицираните параметри на Йорт дава най-малка изчислителна сложност и има по-добра точност при детектиране на свободните канали за отношение сигнал/шум над 6-7dB.
5. Немодифицираните параметри на Йорт постигат най-добри резултати при 5% заетост в канала и отношение сигнал/шум 8dB и повече. Този резултат показва по-висока чувствителност на метода спрямо модифицираните параметри на Йорт. При него най-добри резултати се получават при 15-20% заетост в канала.
6. Използването на предварителен анализ на главните компоненти значително подобрява средноквадратичната грешка и измества заетостта в канала към по-малки процентни стойности. Най-добри резултати се получават с предварителен анализ на главните компоненти при 15% заетост в канала и отношение сигнал/шум над 6dB.
7. Почти всички методи показват сходна зависимост на точността при различно отношение сигнал/шум с изключение на метода с клъстеризация с К-медоиди без предварителна обработка.
8. При методите с клъстеризация с К-средни величини и К-медоиди най-добри резултати с най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при Квадратно Евклидово разстояние. Като предварителният анализ на главните компоненти подобрява резултатите при клъстеризация в сравнение с метода без предварителна обработка. При модифицираните параметри на Йорт се получава по-ниска средноквадратичната грешка.
9. За 5% заетост в канала за изследваните методи с клъстеризация с К-средни величини и К-медоиди най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при Квадратно Евклидово разстояние. Като най-добре се представя предварителната обработка с немодифицираните Йорт параметри.
10. Най-ниски стойности на средноквадратичната грешка при метода с агломеративна клъстеризация са постигнати при разстоянията: Евклидово, Минковски и Манхатън. При предварителният анализ на главните компоненти се получават сходни резултати при разстоянията: Евклидово, Минковски и Манхатън в сравнение с метода без предварителна обработка. Подобряване на средноквадратичната грешка се получава при мярките за разстояние: Чебишев, косинусово и корелационно. Използването на модифицираните параметри на Йорт също води до намаляване на средноквадратичната грешка същите мярки за разстояние.
11. При 5% заетост в канала за методите с агломеративна клъстеризация най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при предварителна обработка с немодифицираните параметри на Йорт за всички мярки за разстояние. РСА анализа дава сходни резултати в сравнение с метода без предварителна обработка.

ГЛАВА IV

АПРОБАЦИЯ НА РАЗРАБОТЕНИТЕ МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ДЕТЕКТИРАНЕ НА СВОБОДНИТЕ КАНАЛИ

В предишните части на настоящата разработка бяха предложени методи и алгоритми за подобряване на качествените показатели в когнитивни радио мрежи. Всички резултати от получените изследвания бяха направени в добре контролирана изкуствена среда за да могат да се пресъздадат различни условия, в които да се наблюдават предложените комбинации от различни методи и алгоритми за детектиране на спектъра. На базата на натрупаните резултати бяха изготвени алгоритми за високо ефективно детектиране, които да намалят нивата на смущенията и да оптимизират използването на радиочестотните и енергийните ресурси.

Използването на реални ненормирани данни и съпоставянето на резултатите от тях с вече получените в предишната част ще даде по-ясна представа за ефективността на предложените методи и алгоритми за детектиране на спектъра. Ще бъде възможно да се наблюдават сценарии с много по-голямо разнообразие на мощностите на приетия сигнал. Целта на предложения анализ е подобряване на качествените показатели на когнитивното радио в реални условия чрез прилагане на предварителна обработка за редуциране на пространството от независими променливи на приетите сигнали и клъстеризация за определяне на свободните канали.

IV.1. Методика на изследването и резултати

В работата е изследван подход за намаляване на изчислителната сложност чрез редуциране на пространството на база данни съставена от множество измервания на мощността на приетия сигнал. По този начин се улеснява процеса за намиране на свободните канали чрез клъстеризация и прави възможно използването му в съвременните радиокомуникационни системи от следващо поколение.

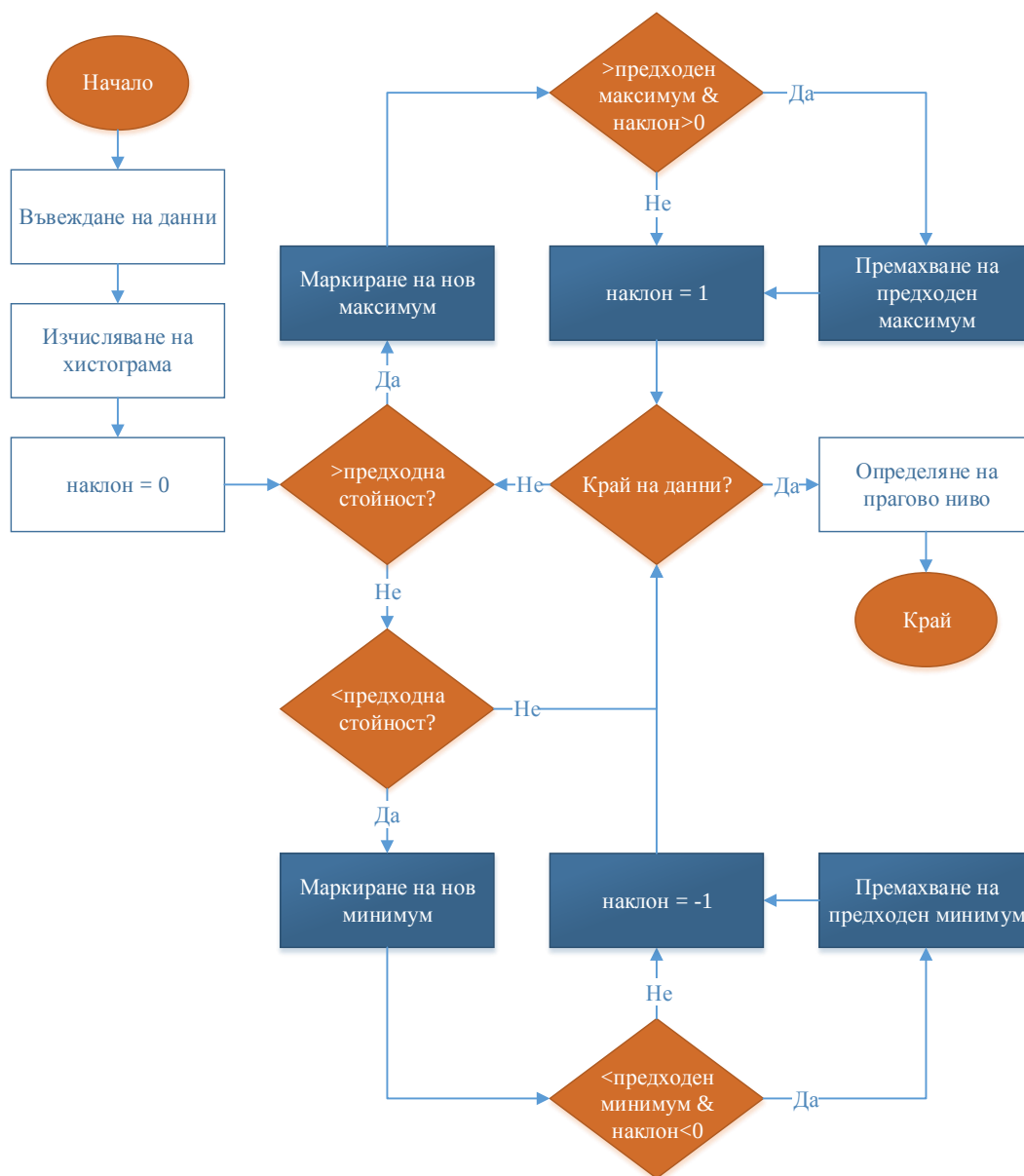
Изследването се извършва като се спазва методологията от предишната част. Различното е използването на реални ненормирани данни от измерени спектрограми. Изследвани са същите комбинации от методи и алгоритми за предварителна обработка и клъстеризации.

Използва се следния общ подход при детектирането на спектъра за всяка комбинация от методи и алгоритми:

1. Взима се извадка от базата данни с реални резултати за да се формира различна заетост на спектъра.
2. Прави се оценка на заетостта на канала като се съпоставят резултатите от изследвания метод за детектиране на спектъра с праговото ниво намерено от статистическата оценка на входните данни.
3. Всеки експеримент е пробирани по 100 пъти и получените резултати са осреднени за да се осигури статистическата достоверност.

Таблица IV.1 Изследвани сценарии с различна заетост на спектъра

Сценарий:	Заетост на канала:	Тип данни:
VA1	55%	измерени
VA5	96%	измерени
VA9	5%	измерени



Фигура IV.2 Алгоритъм за статистическа оценка на база данни

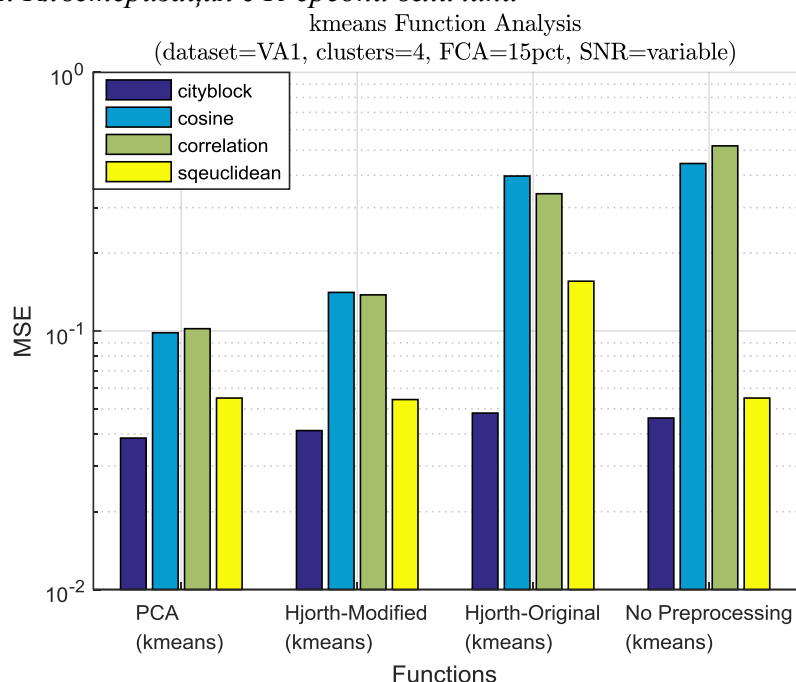
След въвеждането на базата данни се изчислява нейната хистограма. След това се въвежда параметър за оценка на наклона, на който първоначално се присвоява стойност нула. На следващата стъпка започва обхождане на хистограмата като се прави оценка за посоката на наклона и се маркира нов максимум, ако нараства или нов минимум, ако намалява. Предходният максимум се премахва, когато маркирания нов максимум е по-голям от предходния и параметъра за оценка на наклона показва нарастване т.е. в тази поредица предходния максимум вече не е най-голям. По аналогичен начин се постъпва и за предходния минимум. След това се присвоява стойност единица или минус единица на параметъра за оценка на наклона като по този начин се указва съответно нарастване или намаляване. Когато се достигне до края на хистограмата се определя праговото ниво.

IV.1.1. Сценарий VA1 - 55% заетост на спектъра от честотния обхват с реални данни

За да се извърши изследването е направена статистическа оценка на входните данни, от където се определя праговото ниво за съставяне на двоичната карта на заетостта. Общата заетост в изследвания времеви интервал и честотен обхват е 54.72% с прагово ниво -109.52dBm.

IV.1.1.1. Обобщени резултати за данни VA1

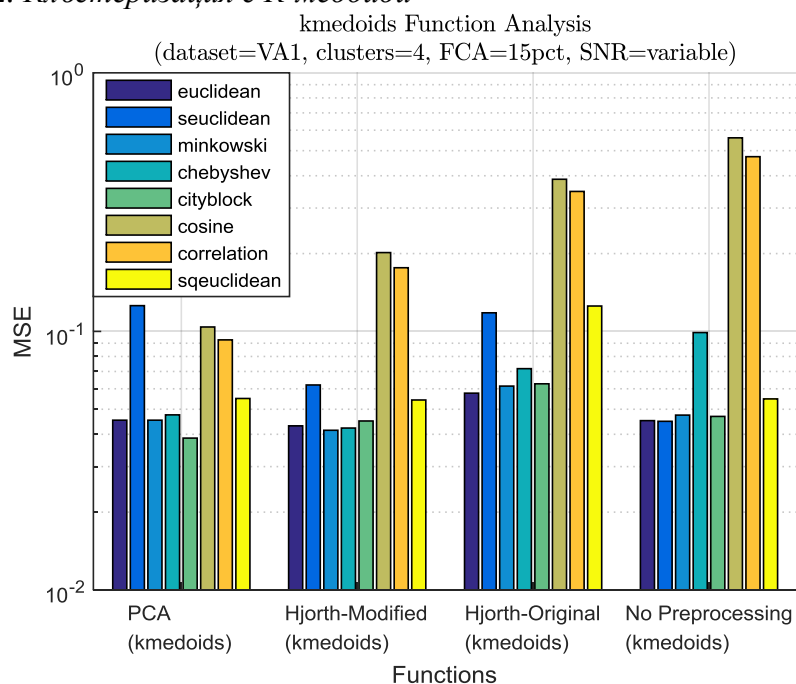
IV.1.1.1.1. Клъстеризация с K-средни величини



Фигура IV.9 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при клъстеризация с K-средни величини при набор от данни VA1

За всички методи най-добри резултати с най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при мярки за разстояние Манхатън и квадратно Евклидово. PCA анализа подобрява резултатите при клъстеризация за всяко едно разстояние. Използването на модифицираните Йорт параметри води до намаляване на грешката при квадратно Евклидово разстояние в сравнение с PCA анализа.

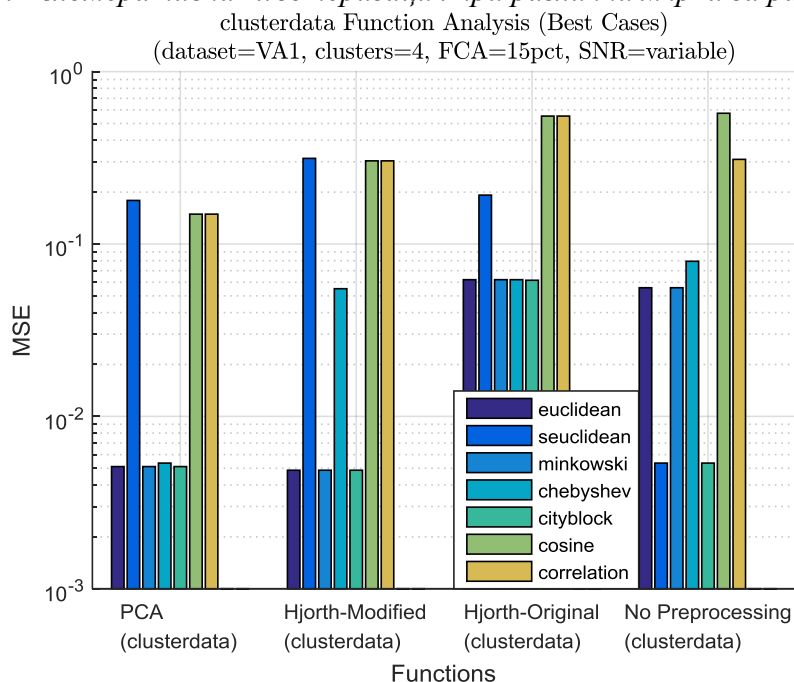
IV.1.1.1.2. Клъстеризация с K-медоиди



Фигура IV.10 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при клъстеризация с K-медоиди при набор от данни VA1

Най-добри резултати с най-малки стойности на средноквадратичната грешка се получават при Евклидово разстояние. Използването на предварителният анализ на главните компоненти и модифицираните параметри на Йорт подобряват резултатите при клъстеризация с К-медоиди за почти всяко едно разстояние в сравнение с метода без предварителна обработка.

IV.1.1.1.3. Агломеративна клъстеризация при различни мярки за разстояние



Фигура IV.11 Средноквадратична грешка при различни мярки за разстояние при агломеративна клъстеризация при набор от данни VA1

На фигурата са показани четири метода с различни мярки за разстояние и еднаква метрика за присъединяване по метода на Вард. Най-ниски стойности на средноквадратичната грешка при всички методи са постигнати при разстоянието на Манхатън. При предварителният анализ на главните компоненти и модифицираните параметри на Йорт се получават по-добри резултати при почти всяко едно разстояние в сравнение с метода без предварителна обработка.

За всички изследвания с данните от VA1 получените резултатите са сходни с тези от изследванията при набор от предварително обработени данни A1.

IV.2. Изводи

Направените изследвания с реални данни дават възможност да се направи един точен анализ на предложените методи и алгоритми за детектиране на свободни канали в радио мрежите от следващо поколение. Изборът се определя спрямо най-малката средноквадратична грешка и най-малката относителна изчислителна сложност при различни сценарии на заетост на канала, като по този начин се повишават качествените показатели в когнитивните радио системи.

Таблица IV.2 съдържа синтезирани резултати от изследванията с реални данни. Реперен шум се добавя задължително при заетост на канала под 10% и над 90%. Методът използващ предварителна обработка с модифицираните параметри на Йорт постига много добри резултати при всяка една заетост на канала. Алгоритмите използващи PCA анализ може да бъдат използвани при заетост над 10%. При тях се получават най-добри резултати в диапазона 10-90% заетост.

Таблица IV.2 Обобщени резултати получени след обработка на реално измерени данни

Заетост на канала:	Метод за обработка:	Реперен шум:
<10%	<u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди)	Задължителен
10-50%	<u>Анализ на главните компоненти</u> (Агломеративни) <u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни)	-----
50-90%	<u>Анализ на главните компоненти</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди) <u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди)	-----
90%<	<u>Анализ на главните компоненти</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди) <u>Йорт-Модифициран</u> (Агломеративни, К-средни величини, К-медоиди)	Задължителен

Изводите са следните:

- Предварителната обработка с РСА анализ или Йорт анализ помага за намаляване на изчислителната сложност при процеса на клъстеризация.
- При всички сценарии най-малка изчислителна сложност се постига при клъстеризацията с предварителна обработка с модифициран Йорт анализ.
- Най-малки стойности на средноквадратичната грешка при методите с агломеративна клъстеризация и клъстеризация с К-медоиди се постига при мярки за разстояние Манхатън и Евклидово. Като РСА анализа и модифицираните параметри на Йорт подобряват резултатите при клъстеризация за почти всяко едно разстояние в сравнение с метода без предварителна обработка. При заетост на честотни спектър под 10% методът с модифицираните параметри на Йорт е изключително ефективен.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Предложен е подход за намаляване на изчислителната сложност чрез комбинация между методи за редуциране на пространството (анализ на главните компоненти, метод на Йорт и модифициран метод на Йорт) и методи за клъстеризация (агломеративна клъстеризация, К-средни величини и К-медоиди). Изследванията показват запазване на точността и намаляване на относителната изчислителна сложност.
2. Предложен е подход използващ априорно определено ниво на шума въз основа на параметрите на софтуерно дефинираните радио устройства в процеса на клъстеризация. По този начин се увеличава точността при класификацията на каналите с малка и голяма заетост.
3. Предложен е комбиниран алгоритъм за определяне на ъгъла на постъпване (Фигура II.18). По този начин се използват методите за определяне на ъгъла на постъпване с най-добри показатели (Капон (MVDR), ROOT MUSIC и ESPRIT).
4. Предложен е комбиниран алгоритъм за детектиране на свободните канали (Фигура III.83). По този начин се прилага най-оптималната комбинация от методи за редуциране на пространството (анализ на главните компоненти и модифициран метод на Йорт) и методи за клъстеризация (агломеративна клъстеризация, К-средни величини и К-медоиди).
5. Предложен е метод за редуциране на пространството от независими променливи на базата на метода на Йорт приложим за детектиране на спектъра в когнитивни радио системи. Получените резултати показват, че методът има съизмерима точност и по-ниска относителна изчислителна сложност спрямо анализа на главните

компоненти. Прямо метода на Йорт е постигната по-добра относителна изчислителна сложност и намаляване на средноквадратична грешка.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработени са алгоритми и софтуер за намиране на свободните канали в база данни със спектрограми на мощността и възможност за допълнително добавяне на реперен клъстер на шума. Използваната комбинация от методи включва методи за редуциране на пространството от независими променливи (анализ на главните компоненти, метод на Йорт и модифициран метод на Йорт) и алгоритми за класификация (агломеративна клъстеризация, K-средни величини и K-медоиди).
2. Разработени са алгоритми и софтуер за изследване на относителната изчислителна сложност на методи с висока разделителна способност за определяне на ъгъла на постъпване (MUSIC, Капон (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS и ESPRIT-TLS).
3. Предложен е подход за нормиране на база данни със спектрограми на мощността, който се използва за обективна оценка и сравнение на резултатите от различните методи и алгоритми за класификация. На негова основа са съставени алгоритми и софтуер, с които са изследвани различни комбинации между методи за редуциране на пространството и методи за клъстеризация при различни сценарии с нормирани данни и изкуствено контролирано ниво на шума.
4. Разработено е софтуерно приложение на базата на статистически метод за предварителна оценка на заетостта на каналите на база данни със спектрограми на мощността, чрез който се извършва оценка на ефикасността на предложените методи и алгоритми при намирането на свободни канали. На негова основа са съставени алгоритми и софтуер, с които са изследвани различни комбинации между методи за редуциране на пространството и методи за клъстеризация при различни сценарии с реални данни.

СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИТЕ

1. Т. Цветков, И. Илиев, "Основни методи за контрол на мощността и намаляване на интерференцията при когнитивно радио", *Proceedings of the Technical University - Sofia*, vol. 64, no. 2, pp. 99-108, 2014, ISSN: 1311-0829.
2. Т. Цветков, И. Илиев, "Изследване точността на DOA алгоритми, приложими в когнитивни радиокомуникационни системи", *22th National Conference with International Participation (TELECOM)*, pp. 46-55, 2014, Sofia, Bulgaria, ISSN: 1314-2690 (CD-ROM), 2603-3496 (Online).
3. Т. Цветков, И. Илиев, "Изследване шумоустойчивостта на DOA алгоритми, приложими в когнитивни радиокомуникационни системи", *Journal - Electrotechnica & Electronica (E+E)*, vol. 49, no. 11-12, pp. 28-33, 2014, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603-5421 (Online).
4. Т. Цветков, И. Илиев, "Влияние големината на извадката върху приложимостта на DOA алгоритми в когнитивни радиокомуникационни системи", *Journal - Computer and Communications Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 55-60, 2015, ISSN: 1314-2291.
5. Т. Цветков, И. Илиев, "Spectrum Sensing Error Performance in Cognitive Radio using PCA and Different Clustering Methods", *28th National Conference with International Participation (TELECOM)*, pp. 141-144, 2020, Sofia, Bulgaria, DOI: 10.1109/TELECOM50385.2020.9299547.
6. Т. Цветков, И. Илиев, "Computational Complexity Analysis of Cognitive Radio using PCA with Various Clustering Methods", *28th National Conference with International Participation (TELECOM)*, pp. 145-148, 2020, Sofia, Bulgaria, DOI: 10.1109/TELECOM50385.2020.9299558.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS

Department of Radio communications and Video technologies

Todor Dimitrov Tsvetkov, M.Sc.

**METHODS AND ALGORITHMS FOR QUALITY
IMPROVEMENT IN COGNITIVE RADIO**

Abstract of Ph.D. Thesis

In this thesis deep parametric analyze for quality improvement in cognitive radio is made. This will help to create models and algorithms for computational complexity reduction and speed enhancement in analysis of the complex radio spectrum. The research describes the core parameters needed by cognitive radio devices to achieve one step deeper in precision when spectrum is analyzed. Methods for efficient frequency scanning and analysis with high performance and low power consumption are researched and implemented.

The precision of variety direction of arrival (DOA) algorithms is studied, which will help to improve the map of the radio environment. The examined algorithms are MUSIC, Capon (MVDR), ROOT MUSIC, ESPRIT-LS and ESPRIT-TLS. The mean squared error (MSE) and the normalized time of each algorithm depending on the signal to noise ratio (SNR) with a given number of antenna array elements and a number of snapshots are compared and analyzed. A combination of wide and narrow angular separation is used to evaluate different detection and environment conditions. The research aims to improve quality performance in Cognitive Radio Networks (CRNs) by applying an adaptive antenna array and dynamic spectrum access (DSA) schemes to secondary users, which can use the licensed bandwidth without causing interference to primary users.

The idea of dimension reduction is employed to achieve computational complexity reduction and speed enhancement in cognitive radio spectrum analysis. The studied methods are principal component analysis (PCA) and Hjorth parameters. Then various clustering methods (agglomerative, K-means and K-medoids) are used for channel classification. The mean squared error (MSE) and the relative computational time of each algorithm depending on the channel activity, the number of clusters and the signal to noise ratio (SNR) for different distances and linkages are compared and analyzed. The combination between different dimension reduction and clustering methods improves hardware and software requirements while maintaining and increasing detection accuracy. The research aims to discover the optimal parameters in data processing for spectrum hole allocation in cognitive radio systems (CRNs) by utilizing preprocessing and cluster analysis.