



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ ПО ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ
КАТЕДРА „КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ“

Проф. д-р инж. Владимир Костадинов Пулков

**ПОДХОД ЗА ПРЕДОСТАВЯНЕ НА ПОВСЕМЕСТНА
СВЪРЗАНОСТ И ЕФЕКТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА РЕСУРСИ В
ПОТРЕБИТЕЛСКИ ОРИЕНТИРАНИ СВРЪХ ПЛЪТНИ
УНИФИЦИРАНИ БЕЗЖИЧНИ МРЕЖИ ЗА ДОСТЪП**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на научна степен

„ДОКТОР НА НАУКИТЕ“

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Комуникационни мрежи и системи

София, 2019

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Комуникационни Мрежи“ към Факултет по Телекомуникации при Технически Университет – София на редовно заседание, проведено на 03.06.2019 г. (протокол № 11).

Данни за дисертационния труд:

Брой страници:	193
Брой фигури:	82
Брой таблици:	12
Брой математически изрази:	80
Брой литературни източници:	218
Брой публикации по темата на дисертационния труд:	35

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 03.10.2019 от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-58/12.06.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Огнян Бумбаров – председател
2. доц. д-р инж. Камелия Николова – научен секретар
3. проф. д-р инж. Милена Лазарова – Мицева
4. проф. д-тн инж. Михаил Илиев
5. проф. д-тн инж. Райчо Иларионов
6. проф. д-тн инж. Борислав Беджев
7. доц. д-р инж. Огнян Фетфов

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Милена Лазарова – Мицева
2. доц. д-р инж. Камелия Николова
3. проф. д-тн инж. Михаил Илиев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по Телекомуникации, блок 1, стая 1439-Б и на Интернет страницата на Технически Университет – София. Изследванията по дисертационният труд са направени от автора, като резултатите от тях са публикувани.

Автор: Проф. д-р инж. Владимир Костадинов Пулков

Заглавие: Подход за предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични мрежи за достъп

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Бързият напредък и еволюцията на телекомуникационните технологии водят света към едно напълно свързано в мрежа общество, където достъпът до комуникационни ресурси и обменът на информация ще стане възможен навсякъде и по всяко време от всеки или от всяко нещо. „От най-малките лични вещи до големите континенти, всичко навсякъде ще бъде свързано дигитално и ще отговаря на това, което желаем и харесваме“ [1]. Днешната визия за бъдещата мрежа за достъп предполага, че технологиите за достъп ще поддържат свързаност между хора, машини, устройства, както и разнообразна гама от всичко останало, което може да бъде свързано по между си. Още днес, обаче огромното увеличение на мултимедийния трафик, породено от нарастващия брой на приложения, от развитието на социалните мрежи, от онлайн игрите и т.н., заедно с новите видове комуникации, наложени от технологиите „Интернет на нещата“ (Internet of Things: IoT) и „Машина към машина“ (Machine-to-Machine: M2M), води до възникване на проблеми и предизвикателства, засягащи достъпа до мрежата, свързаността и възможностите за предаване и обработване на големите обеми от данни, генерирани от крайни потребители и устройства. За да може да се отговори на тези предизвикателства, да е възможно управлението на всички тези свързани неща и за да може да се отговори на увеличаващите трафични изисквания, бъдещите поколения мрежи за достъп (Access Networks: ANs) ще трябва да въведат нови функционалности и да поддържат много по-широк спектър от услуги. Бъдещите AN, особено в умните градове (Smart Cities: SCs) ще наложат и нови изисквания към начина, по който се осъществява абонатния достъп, тъй като се очаква те да бъдат много динамични по характер и с много плътно разпределение на потребители и точки за достъп. Във връзка с всичко това проблемът за предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в потребителски ориентирани свръх плътни безжични мрежи за достъп е изключително актуален.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на настоящия труд е формулирана , както следва:

Да се предложат нови подходи към реализацията на мрежите за достъп, които ще отговарят на изискването за повсеместен достъп и свързаност на потребителите, и ще позволят имплементирането на такива методи за използване и управление на ограничените комуникационни ресурси в безжичния достъп, чрез които да може да се предостави един видимо „безкраен капацитет“ на потребителите, независимо от вида им, броят им на единица площ и тяхното движение.

Дисертационният труд си поставя няколко задачи за решаване, като основните са свързани с предлагането на нови схеми за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и точки за достъп (Access Points: APs), осигуряващи безпроблемно, повсеместно, моментално свързване и надеждни процедури за хендовър. Необходими условия за това са предлагането на иновативни подходи за събиране, обработка и анализ на сензорни и мониторингови данни, които да позволяват контекстуализиране на безжичния достъп, и такива за споделяне и управление на ресурси, които да позволяват ефективно

използване на безжичните въздушни интерфейсни ресурси, базирани на въвеждането на когнитивни характеристики и интелигентност.

Методологична основа

Методологията на изследванията в дисертацията включва използването на аналитични, статистически, симулационни подходи и анализ на големи данни. На такава методологична основа се базира анализът за развитие на AN и концепцията за моделиране на AN от гледна точка на кибер-физическа система и предложеният обобщен подход и свързаните с него методи за предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични мрежи за достъп.

Научна новост

В дисертационният труд са предложени нови подходи, имплементирането на които ще може осигури повсеместен достъп и свързаност на потребителите, както и ефективното използване и управление на ограничените комуникационни ресурси в ANs, чрез които да може да се осигури един видимо „безкраен капацитет“ на потребителите, независимо от вида им, броя на единица площ и тяхната динамика. Подходът за моделиране на AN от гледна точка на кибер-физическа безжична система за достъп (Cyber Physical Wireless Access System: CPWAS) и концепцията за нейната структура не се среща в литературата до сега. Предложените евристични подходи и алгоритми за групиране на APs и динамично асоцииране на потребители с цел осигуряване на един „видимо безкраен капацитет“ на потребителите е новост в методите за осигуряване на потребителски ориентиран достъп. Въвеждането на специфичната област на обработка на големи радиочестотни (Radio Frequency: RF) данни, т.н. „RF аналитика“, заедно с примерите за нейното практически имплементиране, е нов подход в областта на анализа на радиочестотния спектър с цел по-ефективната му утилизация. Научна новост в настоящата дисертация е и предлагането на нов подход за осигуряване на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурсите, в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични ANs, базиран на съвместното прилагане на ролеви игри и машинно обучение.

Практическа приложимост

Всички методи и модели разработени в дисертацията са валидирани чрез симулационни експерименти или чрез анализ на резултатите от практическото им имплементиране и тестване. Това предоставя възможността прилагането на резултатите от настоящия дисертационен в практиката да стане непосредствено и лесно. Предложените методи и модели са сравнени с други, в основата на които са заложили подобни функционалности и/или характеристики, и които имат сходни цели по отношение на постигане на по-добра работоспособност.

Публикуване на резултатите от дисертационното изследване

Направените анализи, предложените подходи и получените резултати за периода 2012÷2019 са представени в *35 авторски публикации*, като:

- *Шест от публикациите са самостоятелни, като едната [A28] представлява монографичен труд, две са глави от книги [A7], [A25], две са на международни конференции [A8], [A11], една в списание с импакт фактор [A6].*
- *Останалите 29 публикации са в съавторство, като 12 са представени на международни конференции, 4 са глави от книги, 13 са в международни списания, от които 11 са с импакт фактор и/или импакт ранг.*

Освен монографичният труд, всички останали публикувани авторски трудове са реферирани и индексирани в базите данни SCOPUS и/или WoS.

С оглед анализ и оценка на получената публичност на предложения дисертационен труд, може да се отбележи, че към Май 2019 в SCOPUS са забелязани 42 цитирания на авторски публикации. Съществуват цитирания и в други бази данни (например Google Scholar), както и в интернет пространството, но те не се отчитат тук.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **193 страници** формат А4 и съдържа увод, четири глави, заключение, списък на фигурите, списък на таблиците, списък на използваните съкращения, списък с авторските публикации по дисертацията, списък на използваната литература. Изложението на дисертационния труд съдържа **82 фигури, 12 таблици и 80 математически израза**. Използвани са **218 литературни източници**, **80%** от които са от последните десет години. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

В Първа Глава е направен анализ на развитието на ANs и е предложена концепцията за еволюцията на ANs към мрежи, базирани на унифициран безжичен достъп. Такъв достъп ще е характерен с гъвкави схеми за асоцииране на мобилни потребители и подходи за кооперативно групово свързване на потребителски устройства (User Equipment: UE) и APs; иновативни подходи за споделяне и управление на ресурси; интелигентност, базирана на събирането, сливането и обработката на сензорни, мониторингови и други данни, което заедно с прилагане на алгоритми за машинно обучение (Machine Learning: ML) и изкуствен интелект (Artificial Intelligence: AI), ще позволи имплементиране на 3S (Self-configuration, Self-organization and Self-optimization) функционалности, прогнозиране на състоянието, адаптация и еволюция на AN. На базата на сравнителна оценка на характеристиките и функционалността на такива унифицирани ANs, с тези на една мащабна кибер-физична система (Cyber Physical System: CPS), е предложено виждането за функционирането и моделирането им като CPWAS. Въз основа на изложеното в тази глава и предложеният модел на AN в SC като една CPWAS, са формулирани основните задачи на дисертационния труд, основно свързани с предлагането на: *нови схеми за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и APs; нови подходи за събиране, обработка и анализ на RF данни и контекстуализиране на безжичния достъп; методи за ефективно споделяне и управление на ресурси.*

Във Втора Глава са предложени модели за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и APs, с цел осигуряване на безпроблемна, повсеместна и непрекъсната свързаност на различните видове потребителски устройства в CPWAS.

Подходите се основават на методи за проактивно управление на свързаността и групиране на APs и са реализирани чрез евристични алгоритми с ниска изчислителна сложност и опростени аналитични изчисления. Въз основа на тези подходи, CPWAS чрез операционна система за достъп до мрежата (Access Network Operating System: ANOS) ще може да организира динамични групи от APs, така че в мрежата да се въведат потребителски ориентирани функционалности. За да могат да се реализират схемите за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация, се предлага имплементирането в CPWAS на две задължителни функционалности: *първата, отнасяща се до интелигентен мониторинг и анализ на RF данни, а втората - до ефективно организиране и управление на ресурсите.*

В Трета Глава са предложени подходи към практическа реализация на обработката и анализът на RF данни в облачни структури, контекстуализирането и предсказването на потребителското поведение. Въведено е понятието „RF аналитика“, отразяващо обработката, анализът и извличането на знания от големи RF данни и е предложена платформа, която позволява свързването на различни видове RF клиенти с оглед прилагането на адаптивни подходи за следене на спектъра. Предложен е подход за предсказване на разпределението, мобилността и активността на потребителите, основаващ се на изграждането на „*потребителски топлинни карти*“ (User Heat Maps: UHMs). Прилагането на RF аналитика и предсказването на потребителското поведение са основни предпоставки да се реализират основните функционалности, които трябва да се имплементират в CPWAS.

В Четвърта Глава са предложени подходи за ефективно управление на ресурси и реализация на 3S функционалности в ANOS, с ниска изчислителна сложност. За управление на ресурси е предложен един ролеви игрови подход, осигуряващ компромис между качество на обслужване на UEs и по-лесно администриране на CPWAS, и един подход, базиран на процедура за управление на риска, с цел предприемане на превантивни мерки за подсигуряване на ефективното използване на наличните ресурси в APs. За реализацията на 3S функционалности са предложени методи, базирани на алгоритми за ML и комбиниран алгоритъм, съчетаващ познанията за местоположение на UEs с Q-обучение и игрови подходи.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Мрежи за достъп с унифицирана безклетъчна архитектура

В тази глава е разгледано развитието на безжичните мрежи за достъп към т.н. хетерогенни мрежи и възникването на мрежи за достъп с свръх висока плътност и хетерогенност. Обосновано е възникването на нови мрежови архитектури базирани на нови подходи за обслужване на потребителите, т.е. конвергентните безклетъчни мрежи, както и предпоставките за възникване на една унифицирана безклетъчна архитектура за достъп. Предложен е модел на унифицирана безжична мрежа за достъп от гледна точка на широко-машабна кибер-физична система.

1.1. Развитие на безжичните ANs

На определен етап от развитието на мобилните комуникации няма да може повече да се увеличава пропускателната способност на каналите, поради достигането на теоретично възможните стойности и ограниченията в работните честотни ленти. В тези случаи единствената възможност е да се увеличи ширината на тези ленти и/или да се премине към по-високи работни честоти и по-висока плътност на разположение на мобилните базови станции (Base Stations: BSs) и точките за достъп (Access Points: APs). Поради това в бъдеще се очаква основните иновации в тази област да бъдат насочени към намаляване на разходите за един бит предавана информация и разходите за енергия на един бит. Това може да стане основно чрез промяна на клетъчната инфраструктура, въвеждане на иновативни подходи за споделяне на радиочестотния спектър и на въздушния интерфейс, ефективно управление и използване на ресурсите.

1.1.1. Конвергенция на фиксирани и мобилни ANs

Тази конвергенция на практика представлява интеграция на безжични и фиксирани мрежи с цел предоставяне на всички видове широколентови услуги, в т.ч. разговорни, видео и мултимедийни. Такива сценарии вече се имплементират на практика, тъй като те не само предоставят разнообразни услуги за крайните потребители, но и дават най-различни предимства на доставчиците на услуги и на операторите. Тези хибридни архитектури се считат за крайъгълен камък на бъдещите широколентови мрежи за достъп (Access Networks: ANs) и ще се основават на интегрирането на пасивните оптични мрежи от следващо поколение (Next-Generation Passive Optical Network: NG-PON) с LTE-A (Long Term Evolution Advanced), хетерогенни мрежи (Heterogeneous Networks: HetNets), пето поколение (5th Generation: 5G) мрежи или централизирани, колаборативни, облачни и чисти мрежи за радио достъп (Centralized, Collaborative, Cloud and Clean Radio Access Network: C-RAN) [7, 8].

1.1.2. Разпределени и йерархични конвергентни HetNets

Освен конвергенция на фиксираните и мобилни мрежи, днес тенденция в мрежите за безжичен достъп е реализацията на разпределени и йерархични хетерогенни мрежи (HetNets). Въвеждането на концепцията за HetNets, включваща координирано макро и пико- или нано- клетъчно покритие, се счита за средство за подобряване на капацитета и пропускателната способност на ANs. Въпреки това, тези мрежи се характеризират с недостатъци по отношение на качеството на услугата (Quality of Service: QoS) и усещането за качество (Quality of Experience: QoE) на крайния потребител (особено при бързо движещи се потребители) поради факта че, в сложни електромагнитни среди, като тези в един „Умен град“ (Smart City: SC), високата плътност на инсталираните BSs/APs може да предизвика силно корелиран шум или смущения, които да влошат QoS на съседните BSs/APs [24]. В тази точка се посочват някои от недостатъците на конвергентните HetNets, като се отбелязва, че те могат да бъдат преодоляни чрез въвеждане на интелигентни подходи за управление на ресурси и внедряване на нови архитектури на мрежата за достъп, въз основа на принципите за виртуализация и споделяне използване на ресурси.

1.2. ANs със свръхвисока плътност и хетерогенност

Специфична особеност на бъдещите ANs е наличието на различни по вид потребители (хора и машини) с висока динамика и разнообразие по отношение на мобилност и услуги. Типичен

сценарий на такива свръх плътни хетерогенни (Ultra Dense Heterogeneous: UDH) мрежи, както от потребителски, така и от мрежови аспект, са ANs в бъдещите SCs.

1.2.1. Предизвикателства при имплементиране на UDH мрежи за достъп в SCs

Непосредственото имплементиране и взаимно свързване на различни типове HetNets в обща комуникационна инфраструктура няма да може да поддържа повсеместните информационни услуги в бъдещите SCs [27]. За SCs, на мястото на такава директна схема на свързване на HetNets, трябва да се предложи нова конвергентна мрежова архитектура, базирана на разнородни безжични мрежи и различни технологии за предаване [28, 29]. Основните причини за една такава трансформация на мрежата ще са:

- ✓ намаляване размера на клетките и възникване на масивни UDH мрежи, с цел използване на честотите над 6GHz, така че да се отговори на бъдещите потребности от трафик и да се постигне максимална енергийна ефективност;
- ✓ интегриране на множество безжични технологии за достъп и внедряване на усъвършенствани методи за предаване, такива като масивно MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output), формиране на лъча, координирано предаване и т.н., което ще позволи ефективно разпределение на безжичните въздушни интерфейсни ресурси (мощност, време, честотна лента, честота, пространство);
- ✓ интелигентно управление на безжични ресурси в реално време, базирано на спиране на излъчването от антената (заспиване), енергийно оптимизирани смесени връзки, динамично маршрутизиране, оптимизация на топологията на свързаност и т.н.;
- ✓ нови начини за управление на смущенията и енергийно ефективни подходи, като например координиране на смущенията, интелигентно управление на мощността, независимо захранване от мрежата, събиране на енергия от околната среда и др.;
- ✓ използване на свръх-теснолентови и спорадични методи за осигуряване на свързаност между устройства с минимално потребление на енергия и живот на батерията над 10 години.

Имплементирането на тези технологични характеристики биха могли да действат като разрушителни фактори и/или движещи сили в развитието на ANs [A1] поради това, че те ще доведат до възникването на нови проблеми и предизвикателства, които могат да се обобщят както следва.

- ✓ Огромната необходимост от все по-високи скорости на предаване е причина за свръх-високата плътност на BSs/APs. Свръх-високата плътност на разполагане на различни технологии и видове APs, с цел осигуряване на по-високи скорости на предаване на данни и повсеместно предоставяне на информационни услуги, ще доведе до проблеми с управлението на ресурсите и осигуряването на необходимото QoS, особено когато в двете посоки се предава стрийминг мултимедияен трафик [A2], [A3].
- ✓ Движението на мобилните потребители в SCs ще е сложно и променливо. По-сложните и променливи мобилни сценарии ще предизвикат сложни проблеми при хендовър и балансиране на натоварването и трафика в мрежата [29, 30].

- ✓ Разнообразието и повишената сложност на безжичните канали при предаване на милиметрови вълни, в следствие на множество препятствия, причиняващи дифракция, и като допълнение, сложната електромагнитна обстановка в SCs, ще предизвикат сериозни проблеми с интерференцията и управлението на мощността [24].
- ✓ Разнообразието от потребители и приложения в „Интернет на нещата“ (Internet of Things: IoT) и комуникациите тип „Машина към машина“ (Machine-to-Machine: M2M) ще предизвикат проблеми със закъснението и латентността поради наситеността на спектъра и неговото използване.
- ✓ Натовареността на трафика в SCs ще се колебае в пространството и във времето. Флуктуацията на трафичното натоварване в пространствения домейн ще се дължи на стохастичното пространствено разпределение на APs в SC. Флуктуациите на натоварването на трафика във времето ще са следствие от мобилността на потребителите, зависеща от работата и начина на живот в SCs [31].

1.3. Конвергентни безклетъчни мрежи

За да може тези предизвикателства да бъдат преодоляни и за да се реализира един ефективно функциониращ UDN достъп, трябва да се предложат и реализират нови мрежови архитектури, базирани на нови подходи за обслужване на потребителите. Като цяло трябва да се търси възможност за въвеждане на прости схеми за асоцииране на потребителите с цел реализация на услуга от тип „1:1“, т.е. една AP да обслужва един потребител или групиране на активни мобилни потребители и APs с цел коопериране, прогнозиране на мобилността и гъвкави и енергийно ефективни решения за осигуряване на клетъчното покритие. За разрешаването на част от тези предизвикателствата вече се обсъждат нови и иновативни подходи, като например въвеждането на конвергирани безклетъчни мрежи в SC. Идеята, която стои зад тях, е практически да се внедрят нови схеми за асоцииране на потребители чрез прилагане на конвергирани безклетъчни сценарии, като например предложените в [A4] и [32].

1.3.1. Предизвикателства пред конвергентните безклетъчни ANs

Безклетъчните комуникации могат да осигурят гъвкави решения за осигуряване на покритие и енергийна ефективност в бъдещите SCs, т.е. те могат да решат хетерогенните проблеми на физическо ниво. Но, за да се реализират предимствата на безклетъчните комуникации, се очаква облачните изчисления и обработката на данни да се колаборират с безклетъчната инфраструктура и да станат част от нея. Безклетъчният телекомуникационен достъп може да реши част от предизвикателствата, свързани с физическото ниво, но за целите на оптимизиране на работоспособността, коопериране с потребителите, прогнозиране на мобилността и имплементиране на гъвкави решения по отношение на осигуряване на покритието и енергийната ефективност, в цялата облачна инфраструктура на мрежата за достъп трябва да се имплементира интелигентност [27]. Въвеждането на интелигентност в мрежите не е нова тема и вече са предложени много техники, базирани на изкуствен интелект (Artificial Intelligence: AI) за имплементирането на автономно управление, самоконфигуриране, самоорганизиране и самооптимизиране [35], [A5]. Тенденциите към самоорганизиращите се мрежи (Self Organizing Networks: SON) са една крачка напред към

нов подход за въвеждане на интелигентност в мрежата, което ще окаже влияние и върху начина на достъп до комуникационните мрежи.



Фигура 1.5 Елементи на инфраструктурата за достъп в SC [A6]

Такава интелигентност може да се имплементира само, ако е възможно да се извърши подходящ анализ на различни типове данни, наблюдавани и съхранени в облака на AN. Данните ще бъдат събирани, както от следене на състоянието на околната (физическата) среда и поведението на потребителите, така и от системата за експлоатация, администрация и поддръжка (Operation, Administration & Maintenance: OAM) на AN. Това ще изисква изграждането на инфраструктура за абонатен достъп с широка гама от сензорни възможности и условия за съхранение на големи обеми от данни. На Фигура 1.5 е илюстрирано разнообразието от безжични възли, различни видове потребители и сензори в инфраструктурата на една мрежа за достъп в един бъдещ SC [A6].

1.4. Безклетъчна унифицирана архитектура за достъп

Като се имат предвид предизвикателствата пред безклетъчните мрежи, по отношение на групирането, кооперирането, конвергирането на информационната и комуникационна инфраструктура, интелигентността и т.н., може да се твърди, че в бъдещите SCs ANs ще се развият в посоката към реализация на една безклетъчна и унифицирана безжична архитектура (Unified Wireless Architecture: UWA). Аргументацията за това предположение е изложена по-долу, основавайки се на описаното до момента в труда по отношение на конвергенцията на HetNets и конвергентните безклетъчни мрежи, и вземайки предвид перспективите за развитие на ANs, очертани в [A6], [A7], [36, 37].

1.4.1. Основни предпоставки за възникване на UWA

Развитието на информационните и комуникационните технологии и мрежи променя начина, по който взаимодействат помежду си и със заобикалящата ни среда и ни въвежда в една епоха на комуникация с всеки и/или всяко нещо, достъпна за всеки и/или всяко нещо. Налице е ново цифрово съществуване, „в което винаги сме свързани и можем да общуваме с всяка система, устройство или човек, което позволява постоянно и непрекъснато развитие

на нашия живот и общество“ [36]. Това означава, че хипер-свързаността ще бъде един от основните симптоми на мрежите за достъп в SCs. Хипер-свързаните телекомуникационни инфраструктури и мрежи ще бъдат „единният, най-необходим елемент на свързване на хората и отделните общества, индустрии, икономики и хора, въз основа на който ще бъде изградена инфраструктура от широкомащабни, сложни и силно обвързани системи, чиято ефективност, устойчивост и защита ще изискват интелигентни, оперативно съвместими и сигурни информационни и комуникационни решения и нови бизнес модели“ [36]. Това означава, че потребителят (човек или машина) ще може да се свързва към мрежата от всяко място и по всяко време (независимо от съществуващата AN) и да използва очевидния „безкраен капацитет“, осигурен чрез ефективното използване на телекомуникационната инфраструктура за достъп, благодарение на прилагането на споделени, гъвкави и надеждни решения.

1.4.2. Основни характеристики на мрежите за достъп на бъдещите SCs

В тази точка са разгледани и обобщени характеристиките на мрежите за достъп от следните няколко основни аспекти: *разпространение на достъпа, достъп до ресурси, интелигентност на мрежата и поведение на потребителите*. Предложена е концепция на унифицирана безжична мрежа за достъп (Unified Wireless Access Network: UWAN), показана на Фигура 1.6 [A6], [A8].



Фигура 1.6 Обобщена структура на UWAN архитектура [A6], [A8]

Действията на потребителите (хора или машини), свързани с тяхното поведение (мобилност, свързаност, изисквания, генериран трафик и т.н.), се наблюдават чрез блок за наблюдение на потребителските действия, който събира информация от потребителските устройства (User Equipment: UE) и UWAN. Получените потребителски данни се изпращат до виртуалното ядро на мрежата (Virtual Network Core: VNC). Във VNC се изпълняват функции, свързани с операционната система за достъп до мрежата (Access Network Operating System: ANOS) и се реализира интелигентността на мрежата. За пълноценното използване на интелигентността

на мрежата, VNC получава данни от слеждане и мониторинг на цялостното работно състояние на UWAN и други физически параметри (условия на околната среда, условия на канала, използване на радиочестотния спектър, смущения и др.). Въз основа на анализ на тези данни и използване на AI се генерират действия. Чрез съответните обратни връзки се управлява и контролира състоянието на мрежата, реализира се функционалността на асоцииране на потребителите към APs и се предоставят необходимите услуги на потребителите. Функциите за самоконфигурация, самоорганизация и самооптимизация (Self-configuration, Self-organization and Self-optimization: 3S) и тези, свързани с еволюцията на мрежата, се изпълняват във VNC. Благодарение на виртуализацията и унифицирането на достъпа, адаптирането към непрекъснато променящата се физическа среда и стохастичното поведение на потребителите ще е възможно и системата ще може да приложи концепцията за „хипер-свързаност“.

1.5. UWAN като кибер-физична система

1.5.1. Основни характеристики на кибер-физичните системи

В тази точка е дадено определението и са разгледани характеристиките на една типична кибер-физична система (Cyber Physical System: CPS), включваща физически компоненти, сензори, изчислителни устройства и комуникационна мрежа, които дават възможност физическият свят да бъде наблюдаван, контролиран и повлиян въз основа на вграждането на интелигентност, с цел адаптиране, самоорганизиране и еволюиране на системата. Актуална дефиниция, която свързва IoT с CPS и съответните характеристики, е дадена в [39]: *„CPS са системи, характеризиращи се с тясна комбинация от, и координация между, мрежови системи и физически системи. Чрез органичната интеграция и задълбочената колаборация на изчислителни, комуникационни и управляващи (Computation, Communications and Control: 3C) технологии те реализират информационните, сензорните и динамичните управляващи функционалности на големи инженерни системи в реално време.“*.

1.5.2. UWAN като кибер-физична безжична система за достъп

Като се имат предвид дефинициите за CPS, дадени в [38, 39, 40], както и изложеното в предишната точка, заслужава да се отбележи, че основните характеристики на CPS могат да бъдат отнесени към елементите и взаимодействията на UWAN от Фигура 1.6, като например: вход и възможна обратна връзка от и към физическата среда; разпределено управление и контрол; изисквания за работа в реално време; географско разпределение на инфраструктурата; многостепенни структури и характеристики за управление като тези на система, образувана от множество системи; способност за динамично преконфигуриране на цялостната система във времето; непрекъснато развитие на системата по време на работа; възможност за възникващо поведение. По същия начин като CPS, една UWAN трябва също така да може да толерира откази и повреди, шум, несигурност, неточност, атаки в сигурността, липса на перфектна синхронизация, мащабируемост, отвореност, нарастващата сложност, хетерогенност и несвързаност. Някои от тези въпроси са свързани с хората като потребители в такава CPS. Както беше отбелязано, в една CPS човекът, независимо дали е част от веригата или в центъра, ще внесе несигурност и непредсказуемост в системата и тези проблеми биха могли да се решат с въвеждането на интелигентност в CPS, което ще позволи работа в динамично променящи се условия и ще даде възможност на системата да се адаптира и еволюира. Обобщавайки всичко споменато по-горе, UWAN може да се възприема като CPS с управляема обратна връзка и потребители, които въвеждат стохастичност във

веригата на системата. Чрез измервания на действията на потребителите, наблюдение на параметрите на околната среда и физическите (свързани с комуникационния канал) параметри, прилагане на методи за анализ на данни за откриване на потребителски модели на поведение и навици, и на основата на прилагане на решения, базирани на AI, такъв тип *кибер-физическа безжична система за достъп (Cyber Physical Wireless Access System: CPWAS)* може да преодолее стохастичността в своята верига и да предостави всички искани услуги на своите потребители. Способността на тази CPWAS да анализира и изведе знание за потребителското поведение, действията и предпочитанията, ще бъде от решаващо значение, за да даде възможност за автоматизиран и интелигентен контрол на свързаността и предоставянето на услуги, контекстуализиране на безжичния достъп и накрая за постигане на целите и реализация на концепцията за хипер-свързаност в SCs.

Фигура 1.6 може да бъде основа за дефиниране на модели на такава CPWAS, които да отразяват основните ѝ параметри и функционалните взаимоотношения в нея, с цел анализиране и оптимизиране на нейната работа. Моделите трябва да включват параметрите на потребителската активност и физическата среда, VNC и изчислителните компоненти, обратната връзка за управление и съответните интерфейси между тях. Източниците на стохастичност и недетерминизъм в тези модели ще бъдат свързани с мобилността и поведението на потребителите, физическата среда, вариацията на параметрите на безжичния канал (смушания, латентност, джитер на закъснението, загуба на пакети и т.н.). В този случай могат да се използват някои от основните подходи за моделиране на CPS.

Един подходящ модел за свързване или принцип за асоцииране на даден потребител към една AP на CPWAS трябва да се базира на алгоритми с ниска изчислителна сложност, осигуряващи безпроблемно, повсеместно, моментално свързване и надеждни процедури за хендвър. Дори при имплементиране на UWAN в един бъдещ SC, APs ще имат ограничена обслужваща способност и възможност за обработка в реално време на потребителските заявки за услуги. Закъснение при отговор на такива искания за асоцииране към AP е неприемливо за сложна среда, такава като тази в SCs с различни типове потребители - хора и машини. Както е отбелязано в предишните раздели, задължителното свързване на потребител с AP или връзка в реално време и безпроблемно предаване от една AP към друга е задължително, което означава, че CPWAS трябва да функционира като система без опашки и блокиране. Освен това, CPWAS се очаква да има необходимото управление и да функционира по такъв начин, че да може да предостави алтернативи при асоциирането на потребители към две или повече APs. Всичко това предполага, че подобна система трябва да прилага ефективни и динамични механизми за асоцииране на потребители и управление на ресурсите. Имплементирането на схеми за динамично асоцииране на един или група от потребители към една или повече APs, както и ефективни схеми за управление и предоставяне на ресурси за CPWAS може да се основава на определяне на различни функции на полезност за различни параметри на системата. Те могат да се считат за статични - в зависимост от реализираната инфраструктура за безжичен достъп или за динамични - свързани с комуникационния профил на потребителите (хора и машини), които са поискали услуга. Такива функции на полезност могат да се използват за постигане на оптимално ниво на осигуряване на свързаност (Optimum Level of Performance: OPL) на CPWAS, което може да се опише като целева функция по следния начин:

$$OPL = func \left\{ UET_i, \sum_{j=1}^k UEA_j, UELoc_i, MAX[uf_i(ST_i, p_i, P_n)] \right\} \quad (1.1)$$

където UET_i се отнася до типа на потребител i , $\sum UEA_j$ към потребителската активност, $UELoc_i$ е потребителското местоположение по отношение на наличните APs, uf_i е функция на полезност, изисквана от потребител i , ST_i е вида на услуга (глас, данни, текст, изображение, видео), p_i са динамичните параметри, такива като текущото състояние на канала, мобилността на потребителя и т.н., а P_n са статичните параметри в зависимост от конкретната инфраструктура на AN.

Този подход описва работата на CPWAS като непрекъснат процес с дискретни управляващи въздействия, базирани на видовете потребители и стойностите на функциите на полезност. Този принцип ще позволи прилагането на прогнозни анализи на данни с цел облекчаване на процеса на вземане на решения. Входната информация за определяне на ново състояние на системата е свързана с обратната връзка от следене на състоянието на физическата среда и поведението на потребителя. Като следствие, управляващото въздействие ще е резултат от оптимизационната процедура на целевата функция (1.1), т.е. „обслужване на потребителските заявки за асоцииране с равно или по-добро от желаното QoS, като същевременно се минимизира използването на ресурсите на AP“.

1.6. Заключение

Въз основа на направения анализ на развитието на мрежите за достъп от следващо поколение (Next Generation Access: NGA) и отчитайки динамичните комуникационни сценарии в един SC се предлага виждането, че характерно за достъпа до телекомуникационните ресурси в бъдещите SCs, ще е наличието на много висока плътност на комуникационни APs, хетерогенност и мобилност на потребители, и че практически той ще се осъществява чрез еволюирани конвергирани безклетъчни ANs. В този дисертационен труд е представена концепцията за структурата и функционалността на една AN, наречена Unified Wireless Access (UWA). За разлика от конвенционалната архитектура на клетъчните мрежи, благодарение на промяната на клетъчната инфраструктура, в една UWAN архитектура ще може да се разработят и имплементират характеристики и функционалности, такива като:

- ✓ гъвкави схеми за асоцииране на мобилни потребители и подходи за кооперативно групово свързване на потребители и APs;
- ✓ иновативни подходи за споделяне и управление на ресурси, усъвършенствани методи за предаване (такива като: масивно MIMO, формиране на лъча, координирано предаване и др.) и интелигентно управление в реално време;
- ✓ интелигентност на AN, базирана на събирането и сливането на сензорни, мониторингови и OAM данни, обработка и анализ на големи бази от данни (Big Data: BD), и прилагане на алгоритми за машинно обучение, AI и др.;
- ✓ разработване и интегриране на надеждни и точни техники за моделиране и предсказване на потребителското поведение, чрез измервания на действията на потребителите,

наблюдение на параметрите на околната среда и физическите (свързани с комуникационния канал) параметри, анализ на BD за откриване на модели.

1.7. Задачи на дисертацията

Въз основа на изложеното в тази глава и предложения модел на AN като една CPWAS, дисертационният труд си поставя следните основни задачи:

1. Да се предложат нови схеми за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и APs в CPWAS. Схемите да могат да отчитат пространственото разпределение на потребителите и APs и състоянието на безжичните канали и да са базирани на алгоритми с ниска изчислителна сложност, осигуряващи безпроблемно, повсеместно, моментално свързване и надеждни процедури за хендовър.
2. Да се предложат подходи за събиране, обработка и анализ на сензорни и мониторингови данни, които, заедно с техники за моделиране и предсказване на потребителското поведение и прилагане AI алгоритми, ще позволяват контекстуализиране на безжичния достъп, прогнозиране на състоянието, адаптация и еволюция на CPWAS.
3. Да се предложат методи за споделяне и управление на ресурси, които да позволяват ефективно използване на безжичните въздушни интерфейсни ресурси, базирани на въвеждането на когнитивни характеристики и интелигентност в CPWAS, с оглед осигуряване на повсеместна свързаност и нужния капацитет, т.е. реализация на концепцията за хипер-свързаност.

1.8. Приноси към първа глава

1. Извършен е анализ на развитието на ANs и са направени аргументирани изводи за невъзможността NGA мрежите, развиващи се на базата на конвергирани HetNets и 5G безжични мрежи, да отговорят на изискванията, наложени от един хипер-свързан, разнообразен и динамичен сценарий за достъп такъв, какъвто е този в един SC на бъдещето.
2. Дефинирани са основните характеристики на AN в бъдещите SCs, на базата на които е развита концепцията за структурата и функционалността на една AN в SC и нейната еволюцията към т.н. безклетъчен унифициран безжичен достъп (UWA).
3. На базата на сравнителна оценка на характеристиките и функционалността на UWA с тези на една мащабна CPS е предложен нов подход за моделиране и анализ на работоспособността на такава UWA архитектура, наречена CPWAS, основаваща се на концепциите за изграждане и функциониране на CPS.

ГЛАВА 2. Схеми за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация в CPWAS с ниска изчислителна сложност

CPWAS, като система за обслужване, трябва да предоставя възможност за следене на текущото множество заявки и преразпределяне (динамично асоцииране) на натоварването по

отношение множеството на активните обслужващи елементи, т.е. точки за достъп (APs). В CPWAS това ще е една от основните функции, заложи в ANOS, с цел да се осигури обслужване на всяка потребителска заявка без чакане (без блокировки). В тази глава се предлага решение на проблема за динамично управление на свързаността, от една страна на базата на нови подходи и схеми за асоцииране на потребители и групиране на APs, а от друга на основата на подходи за реализация на групов кооперативна работа на APs с цел осигуряване на необходимото покритие за предоставяне непрекъсната свързаност на потребители. Схемите се основават на методи за проактивно управление и динамично свързване на APs към набор от потребителски заявки за асоцииране и методи за групиране на APs и са реализирани чрез евристични алгоритми с ниска изчислителна сложност и аналитични подходи, които да могат да осигурят безпроблемна, повсеместна, моментална и непрекъсната свързаност в CPWAS.

2.1. Евристични подходи и алгоритми за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs

Основната идея на методите с динамично асоцииране на потребителите се основава на допускането, че е възможно архитектурата на системата да се адаптира чрез динамично управляващо въздействие (Dynamic Control Impact: DCI). Целта на DCI е да се осигури обслужване без буфериране на всички потребителски заявки в рамките на един краен интервал от време [A10]. Отправната точка за разработване на модела за динамично асоцииране се базира на теория на графите и CPWAS се разглежда като тегловен ненасочен граф. За прилагане на модела за динамично асоцииране в реално време е необходимо да се разработи нов и/или да се модифицира съществуващ алгоритъм, който да комбинира предимствата на *Евристичното концентриране*, *Линейното програмиране* и *Теорията на графите* [75].

2.1.1. Характеристичен модел на обслужващите свойства на APs

При динамично асоцииране на APs към множеството на потребителските заявки за обслужване, „идеалното“ DCI е това, което в рамките на всеки слот ще осигури такъв архитектурен профил на CPWAS, при който всяка заявка ще се асоциира за обслужване към AP с равен или по-голям свободен капацитет от интензивността на постъпване на заявките за асоцииране. Най-близък до този „идеален“ архитектурен профил е моделът за обслужване от тип „1:1“, т.е. броят на APs е равен или по-голям от максималния брой на активните потребителски заявки за асоцииране. При дефинирането на такъв модел се приема, че за всяка AP могат да се изведат най-малко две основни свойства, които да я представят в процеса на динамично асоцииране чрез проактивно управление с DCI [A4]:

- ✓ *норма на привличане* – най-голямото разстояние, от което една AP може да осигури обслужване за даден потребител. *Нормата на привличане е свойство, което се свързва с възможността за асоцииране на даден потребител;*
- ✓ *норма на насищане* – максималното количество потребителски заявки с определени свойства (QoS), които може да обслужи една AP без чакане за обслужване в опашка. Това свойство има отношение към *капацитета за обслужване на потребителските заявки*, който притежава AP.

Чрез използване на такъв модел на представяне на свойствата на APs е възможно да се реши следната задача: *При предварително известни потребителско множество и топология, както и характер и параметри на заявките за асоцииране, да се дефинира една ефективна структура на системата за обслужване.* В тази връзка, архитектурата на CPWAS със съответните APs трябва да може да се управлява динамично като в рамките на всеки времеви слот системата се конфигурира по начин, осигуряващ възможност за удовлетворяване на условието за ефективно управление на CPWAS, т.е. *безпроблемно и повсеместно обслужване на всички потребителски заявки за асоцииране и предоставяне на услуги със заявеното QoS чрез оптимално използване на ресурсите на всяка една AP.*

2.1.2. Модел за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs

Моделът, който се предлага, се основава на вече дефинираните две базови свойства на APs – *норма на привличане* и *норма на насищане*. В модела свойството *норма на привличане* се представя чрез „тегловна матрица на свързаността“, използвайки теорията на графите. Теглото на всяка дъга се пресмята в същата метрика, в която се измерва и свойството *норма на привличане*. По този начин, на базата на една „тегловна матрица на свързаността“, се прави оценка за границите на зоната на обслужване на всяка AP. В модела свойството *норма на насищане* се представя чрез „тегловна матрица на възлите в графа“, описваща CPWAS. Теглото на всеки възел е положително число, съответстващо на *нормата на насищане* на AP (в съответната метрика за капацитет, пропускателна способност или друг приложим измерител за количествената граница на предоставяните ресурси), или е нула, ако възелът представя потребител, генериращ заявка за асоцииране и обслужване. По този начин в модела се дефинират два типа възли – обслужвани (потребители) и обслужващи (APs), представени съответно с нулева и ненулева стойност на свойството *норма на насищане*. За формиране на *тегловната матрица на свързаността* е необходимо да се дефинира целева функция, която да отразява спецификата в механизма на функциониране на CPWAS като система за предоставяне на свързаност.

Променливата величина в модела и съответно във формалното му представяне като задача за линейно програмиране е „*Таблицата на асоциирането*“ или „*Матрицата на асоциирането*“. *Матрицата на асоциирането* A е двумерна матрица с размерност $N \times M$, където N е броя на обслужваните възли (потребителите) в графа, а M е броя на обслужващите възли (APs) в графа. *Матрицата на асоциирането* е необходимо да се състави по такъв начин, че да предоставя еднозначна и актуална информация за това от коя AP ще бъдат обслужени заявките на всеки един потребител в рамките на следващия времеви слот. От практическа гледна точка, *Матрицата на асоциирането* е физическия израз на DCI като във всеки времеви слот тази матрица се актуализира.

Ключовият елемент на модела за динамично асоцииране и групиране е дефинирането на *целева функция* и съответната *оптимизационна задача*.

Целева функция за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs

Целевата функция се формира на основата на три „*ценови*“ компонента, от които един е статичен и два са динамични. Целевата функция отразява „*общата цена*“ за асоцииране и предоставяне на заявените услуги и QoS на даден потребител i към дадена AP j , отдалечена на разстояние d_{ij} от потребител i :

$$\text{Objective Function} = P_S(i, j) + P_{OAM}(i, j) + P_{AP}(j), \quad (2.1)$$

където $P_S(i, j)$ е „цената за обслужване“, $P_{OAM}(i, j)$ е „ОАМ цената“, $P_{AP}(j)$ е „цената на APs“. Първият член на целевата функция отразява динамиката на CPWAS от гледна точка на ресурсите, които ще са необходими за обезпечаване на заявените от потребителите услуги при определена от *Матрицата на асоциирането* схема за обслужване, т.е. кой потребител от коя AP ще се обслужва. Вторият и третият член на целевата функция представят „ОАМ цената“ на AP и прилежаща му инфраструктура в зависимост от обслужваните потребителски заявки, които са следствие от асоциирането. Както е отбелязано в предишната глава, CPWAS е „безклетъчна“ структура и един потребител в даден времеви слот може да бъде асоцииран към повече от една AP, например за различните посоки на предаване или в случай на кооперативно обслужване от няколко APs с цел осигуряване на необходимия капацитет.

Оптимизационна задача за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs

Целта на оптимизационната задача е да се намери видът на *Матрицата на асоциирането* (матрична променлива в задачата), при която стойността на целевата функция достига своя минимум, удовлетворявайки определени условия, които са следствие от ограниченията при функциониране на CPWAS като система за обслужване без блокировка. Оптимизационната задача се състои в намирането на такова подмножество от p активни APs, $X_p \in X_M$ и $X_p = \{1, \dots, p\}$, за което обобщената целева функция (2.3) получава минималното възможно значение при определени правила и ограничения, наложени от *Линейното програмиране*, *нормата на привличане* на APs и *нормата на насищане* (капацитета) на APs, отчитайки факта, че APs трябва да обслужват потребителските заявки без буфериране.

Отчитайки спецификите на CPWAS като слот базиран механизъм за обслужване без буфериране и проактивно управление с DCI, в обобщената целева функция, отразяваща динамичното асоцииране на APs към множеството на потребителските заявки за обслужване, е необходимо да се отрази динамиката в рамките на един времеви слот за обслужване (Δt_s):

$$\begin{aligned} Z_{APG}(\Delta t_s) &= \sum_{i=1}^{N(\Delta t_s)} \sum_{j \in X_p}^{p(\Delta t_s)} a_{ij}(\Delta t_s) w_{ij}(\Delta t_s) + \sum_{j \in X_p}^{p(\Delta t_s)} y_j [Vstat_j + Vd_j(\Delta t_s)] \\ &= \sum_{i=1}^{N(\Delta t_s)} \sum_{j \in X_p}^{p(\Delta t_s)} a_{ij}(\Delta t_s) w_{ij}(\Delta t_s) + \sum_{j \in X_p}^{p(\Delta t_s)} y_j \left[Vstat_j + f \left(\sum_{i=1}^{N(\Delta t_s)} a_{ij}(\Delta t_s) w_{ij}(\Delta t_s) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Чрез прилагане на разработения модел и минимизиране на обобщената целева функция от израз (2.12) се решават два ключови въпроса, свързани с динамиката на конфигурацията на CPWAS като система за обслужване с проактивно управление и DCI. Първият е свързан с определяне броя на активните APs (медианите) в рамките на следващия слот, а вторият – създаване и съхранение в ANOS на таблица (карта) на асоциирането на потребителските заявки за следващия слот, т.е. кой потребител към коя активна AP или група от точки за достъп (Access Point Group: APG) е асоцииран за обслужване. Следователно, оптимизацията се трансформира в двупараметрична и формулирането ѝ е свързано с намиране на минимума на целевата функция [A11]:

$$Z_{APG}(p, A) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} w_{ij} + \sum_{j=1}^M y_j (Vs_j + Vd_j) \quad (2.13)$$

Особеността на целевата функция (2.13) е втория член, който отразява „цената“ на активните APs. Специфичната оценка на „цената“ с въвеждане на динамична съставляща Vd_j е характерна за CPWAS и отразява нейното функциониране. Приема се, че „цената“ на AP в рамките на текущия слот е функция на обслужените заявки за асоцииране на потребителите без блокировки.

2.1.3. Евристичен алгоритъм за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs

За целите на многопараметричната оптимизация на целевата функция от израз (2.13), отчитайки и факта, че задачата за намиране на p -медиани в тегловен граф е NP трудна, е необходимо да се разработи алгоритъм за асоцииране и групиране, който да осигури възможност за едновременно изчисляване на стойността на p (броя на активните APs) и определяне на вида на *Матрицата на асоциирането* A , при която $Z_{APG}(p, A)$ достига минимална стойност. Като се има предвид динамиката на CPWAS и необходимостта от ефективен и с относително ниска изчислителна сложност алгоритъм, се предлага прилагането на евристичен алгоритъм за двупараметрична оптимизация на целевата функция (2.13), наречен по смисъла на прилаганата евристична процедура – ADD/DROP евристика. Целта на ADD/DROP евристика е да се определи такова абсолютно медианно подмножество от APs в графа $G = (X_N \cup X_M, A)$ с размер p и членове $X_P \in X_M$, при което целевата функция от израз (2.13) достига своята абсолютна минимална стойност [77].

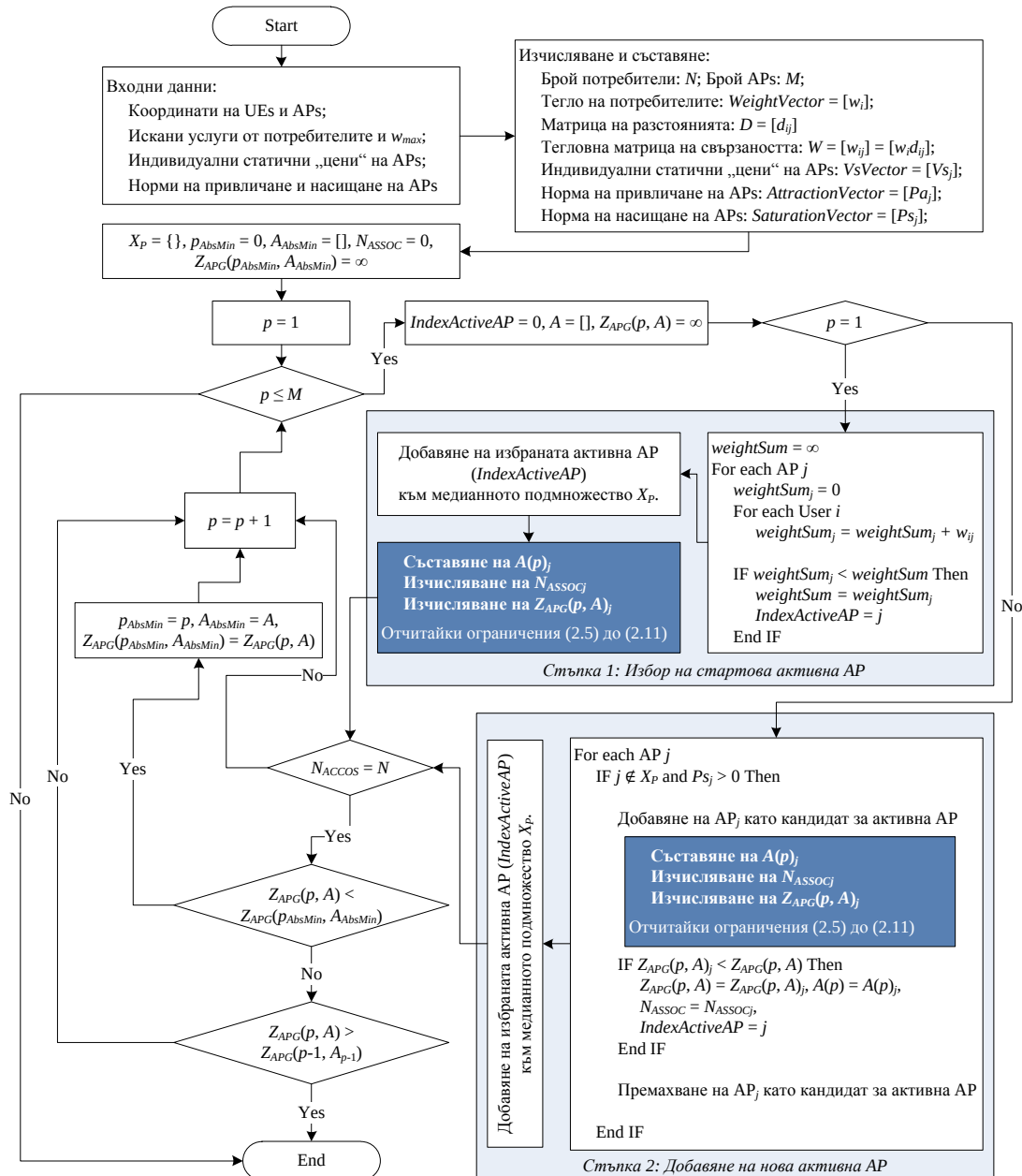
2.1.4. Прилагане на ADD/DROP евристичен алгоритъм за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs

На Фигура 2.2 е илюстрирана блок диаграмата на ADD/DROP евристичен алгоритъм за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs, прилагайки ADD процедура. Прилагането на ADD/DROP евристичен алгоритъм за асоцииране на потребители и групиране на APs с оглед динамично управление на свързаността в CPWAS е илюстриран чрез симулационен експеримент. В него са разгледани следните сценарии:

- *Сценарий 1.* Няма ограничения на параметрите *норма на привличане* Ra_j и *норма на насищане* Ps_j . Всяка AP j може да обслужи всички потребители. Позволено е даден потребител i да бъде асоцииран за обслужване към повече от една активна AP.
- *Сценарий 2.* Няма ограничение на параметъра *норма на насищане* Ps_j . Има ограничение на параметъра *норма на привличане* Ra_j . Всяка AP j може да обслужи част от потребителите. Позволено е даден потребител i да бъде асоцииран за обслужване към повече от една активна AP.
- *Сценарий 3.* Параметрите *норма на привличане* Ra_j и *норма на насищане* Ps_j са ограничени. Всяка AP j може да обслужи част от потребителите. Даден потребител i може да бъде асоцииран за обслужване само към една активна AP.
- *Сценарий 4.* Параметрите *норма на привличане* Ra_j и *норма на насищане* Ps_j са ограничени. Всяка AP j може да обслужи част от потребителите. Позволено е даден потребител i да бъде асоцииран за обслужване към повече от една активна AP.

- *Сценарий 5.* Същият като *сценарий 4*, отчитащ мобилността на потребителите. Демонстрира динамичното преструктуриране на формираните APGs в *сценарий 4*, отчитайки мобилността на потребителите в няколко последователни времеви слота, поддържайки свързаност и реализирайки принципа “мрежата следва потребителя”.

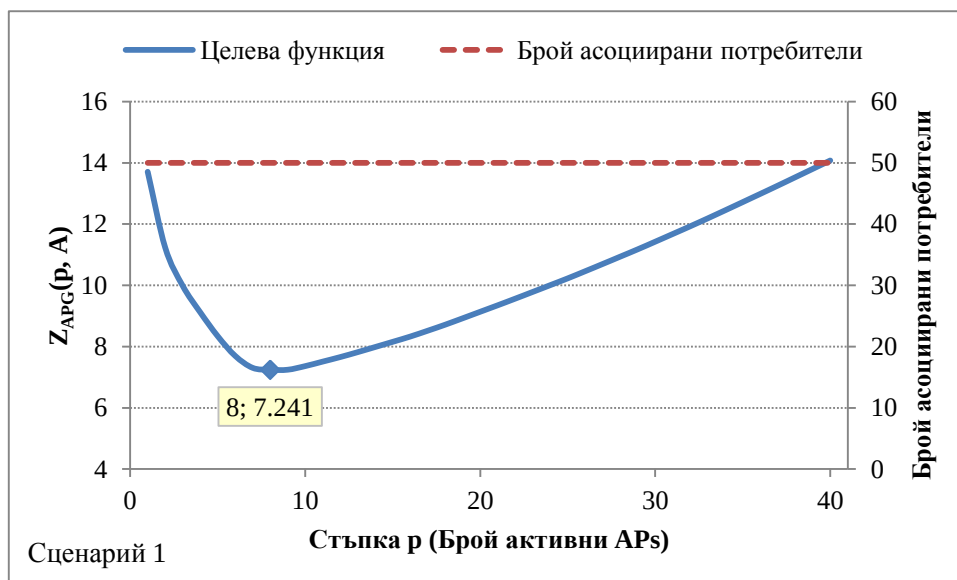
На всяка стъпка от ADD/DROP евристичния алгоритъм за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs, прилагайки ADD процедурата, се добавя активна AP към медианното подмножество и се съставя *Матрицата на асоцииране A*. Съгласно логиката на алгоритъма, асоциирането продължава, докато се получи такова медианно подмножество от активни APs, при което целевата функция $Z_{APG}(p, A)$ достигне своя абсолютен минимум.



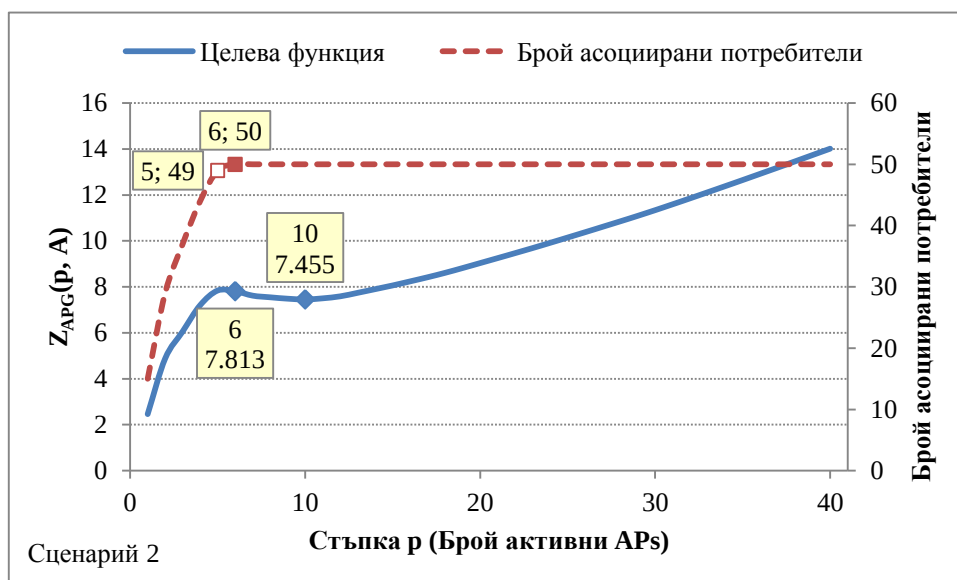
Фигура 2.2 Блок диаграма на ADD/DROP евристичен алгоритъм за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs, прилагайки ADD процедура

За *сценарий 1* резултатите от изчислението на целевата функция са показани на Фигура 2.3. Вижда се, че още при активиране само на една AP ($p = 1$), всички потребители са асоциирани за обслужване, тъй като в този сценарий няма ограничение на параметъра *норма на*

привличане P_{aj} . В следващите стъпки на алгоритъма броят на активните APs нараства, а стойността на целевата функция намалява, достигайки абсолютния си минимум при $p = 8$, което означава, че в тази стъпка производителността на системата е оптимална, т.е. използването на ресурсите е най-ефективно. Фигура 2.4 илюстрира работата на алгоритъма при *сценарий 2*. Както се вижда от получените резултати, след като всичките 50 потребители са асоциирани за обслужване при $p = 6$, стойността на целевата функция започва да намалява до достигане на абсолютния си минимум при $p = 10$.



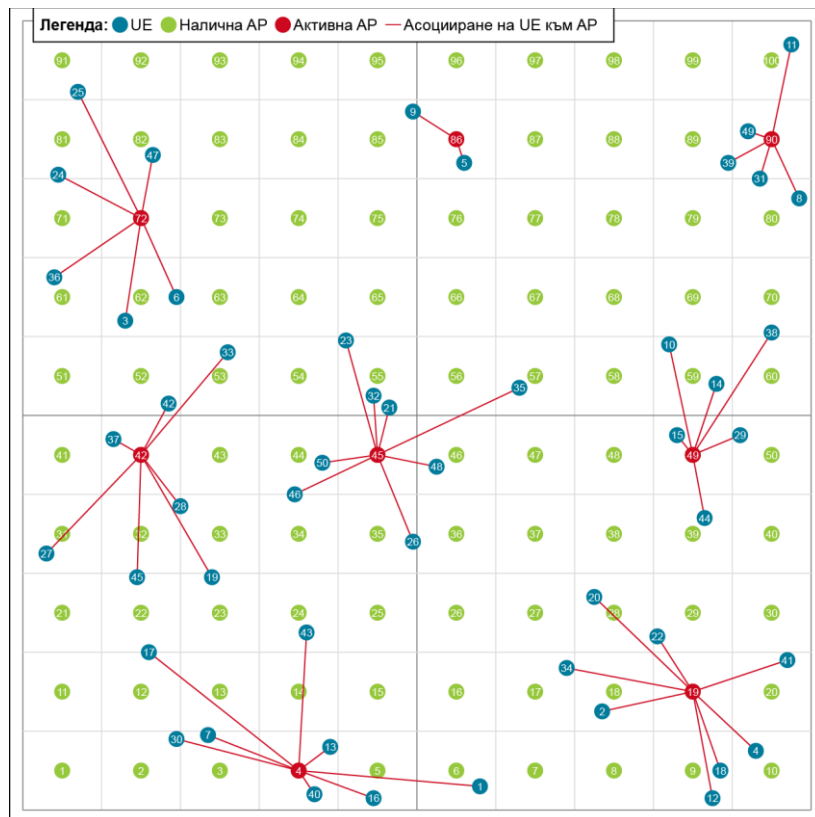
Фигура 2.3 Сценарий 1: Резултати от изчислението на целевата функция



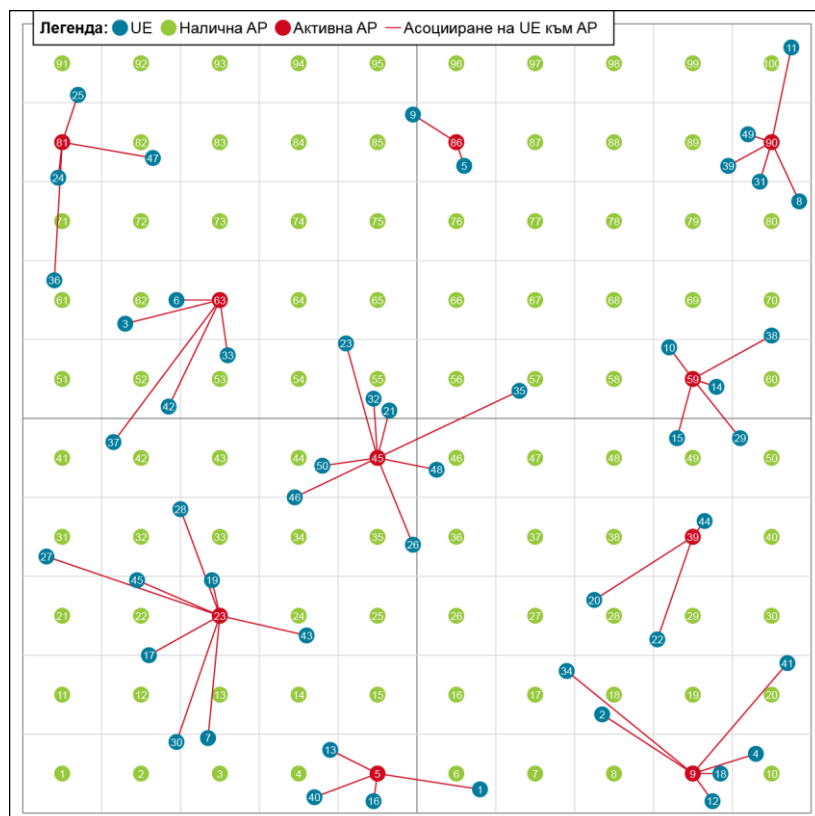
Фигура 2.4 Сценарий 2: Резултати от изчислението на целевата функция

Фигура 2.5 и Фигура 2.6 са графични изображения на *Матрицата на асоциирането* A , описваща връзките между потребителите и APs, съответно за *сценарий 1* и *сценарий 2*, представляващи и резултатите от прилагането на ADD/DROP евристичен алгоритъм за асоцииране на потребители и групиране на APs. От тях е видно, че в тези два сценария потребителите са асоциирани за обслужване към избрани APs, но няма създадени APGs, тъй като не са налице условията, при които даден потребител не може да бъде напълно обслужен

от една активна AP. Причината е, че няма ограничения за ресурсите на APs и следователно винаги има възможност една активна AP да предостави целия искан капацитет на дадения потребител.

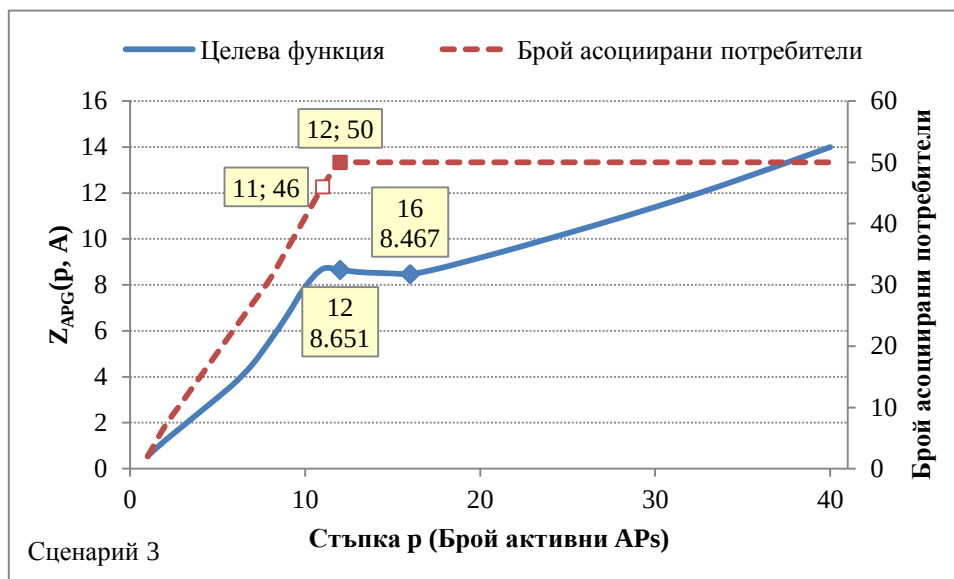


Фигура 2.5 Сценарий 1: Асоцииране на потребители и групиране на APs при $p = 8$

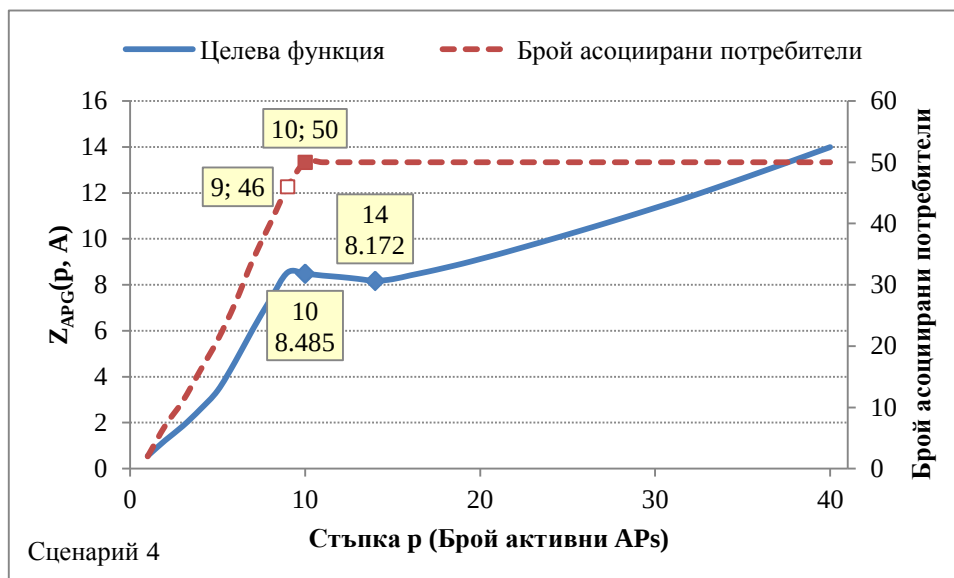


Фигура 2.6 Сценарий 2: Асоцииране на потребители и групиране на APs при $p = 10$

При *сценарий 3* и *сценарий 4* целевата функция, достига абсолютния си минимум респективно при $p = 16$ и $p = 14$, както е показано на Фигура 2.7 и Фигура 2.8.

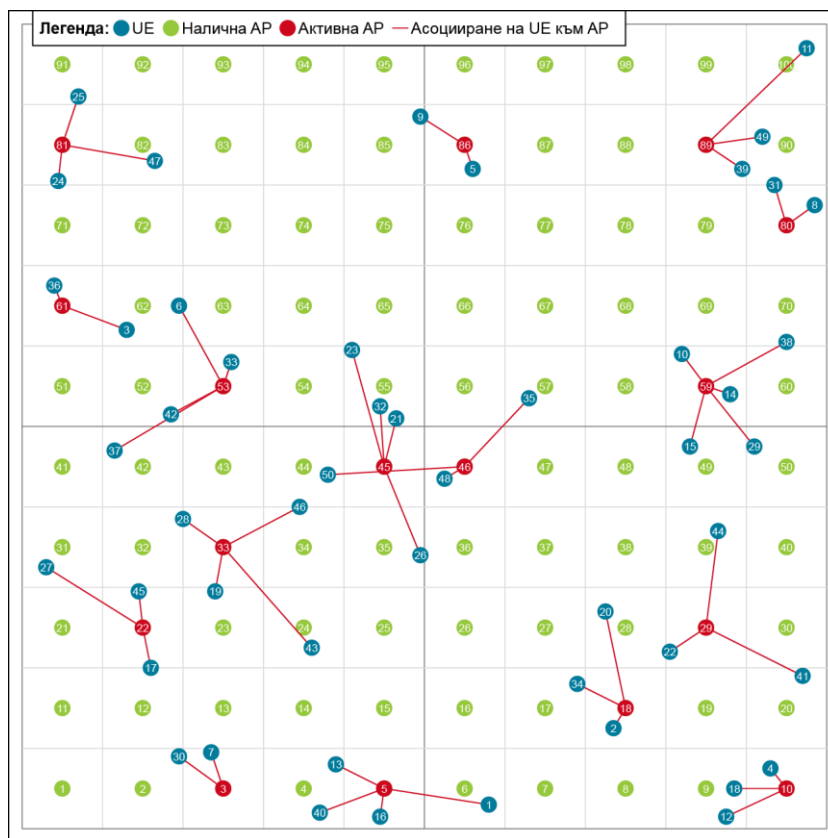


Фигура 2.7 Сценарий 3: Резултати от изчислението на целевата функция

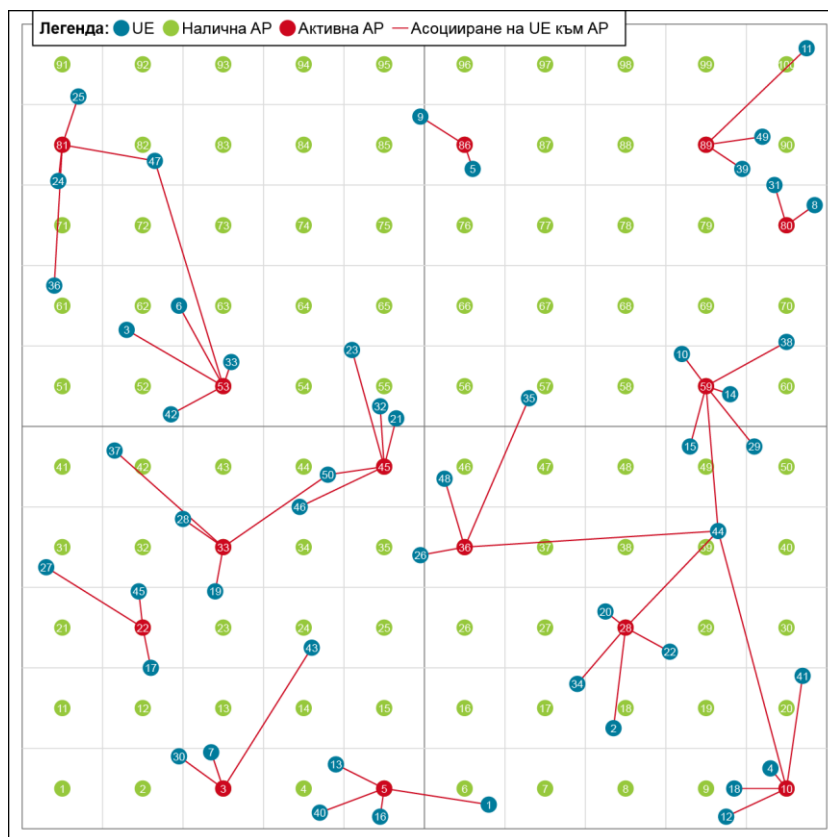


Фигура 2.8 Сценарий 4: Резултати от изчислението на целевата функция

На Фигура 2.9 и Фигура 2.10 са илюстрирани резултатите от прилагането на ADD/DROP евристичен алгоритъм за асоцииране на потребители и групиране на APs респективно за *сценарий 3* и *сценарий 4*.



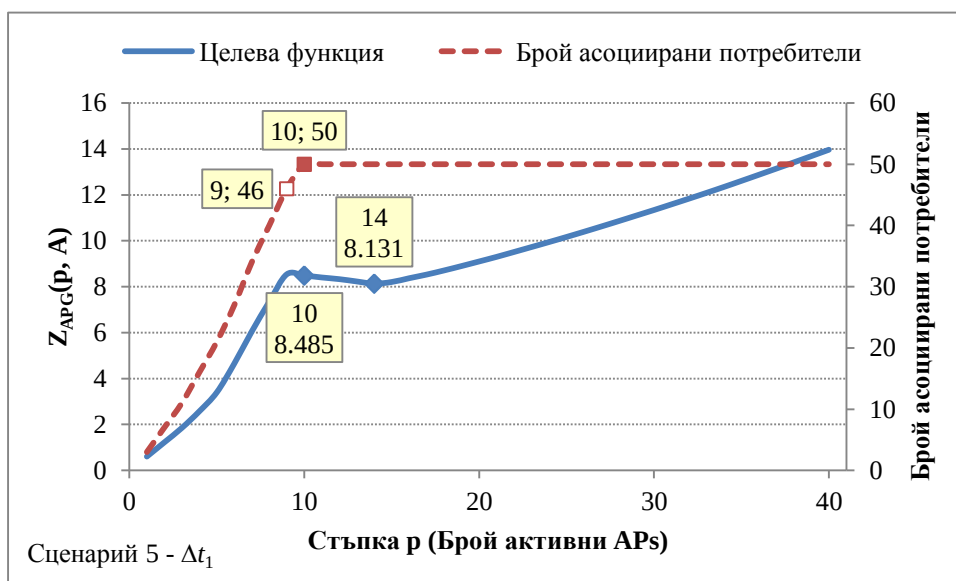
Фигура 2.9 Сценарий 3: Асоцииране на потребители и групиране на APs при $p = 16$



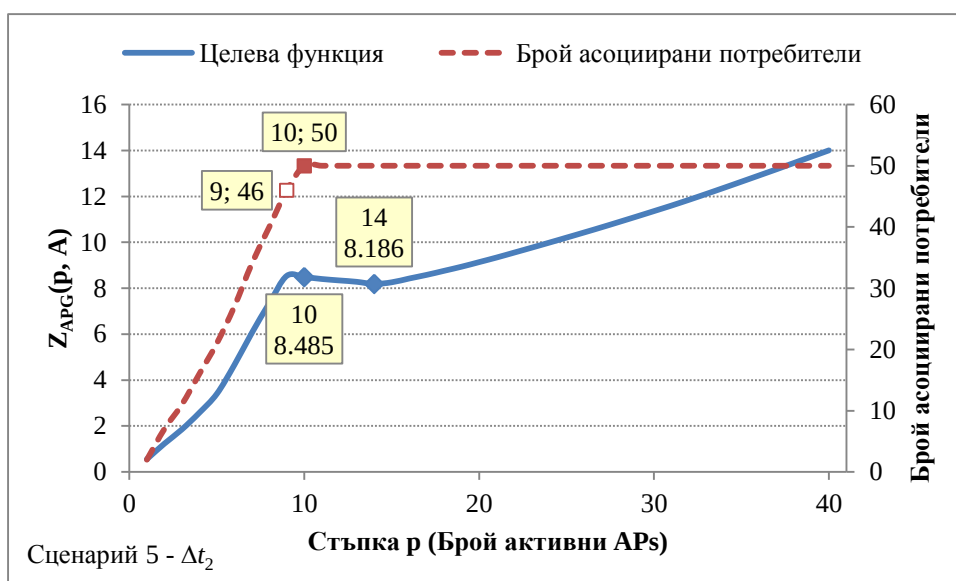
Фигура 2.10 Сценарий 4: Асоцииране на потребители и групиране на APs при $p = 14$

Целта на *сценарий 5* е да се демонстрира как формираните APGs в *сценарий 4* (времеви слот Δt_0) се преструктурират динамично, отчитайки мобилността на потребителите в три последователни времеви слота Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 , поддържайки свързаност и реализирайки принципа “мрежата следва потребителя”. Целевата функция и в трите последователни времеви слота достига абсолютния си минимум при $p = 14$, както е показано на Фигура 2.11, Фигура 2.12 и Фигура 2.13.

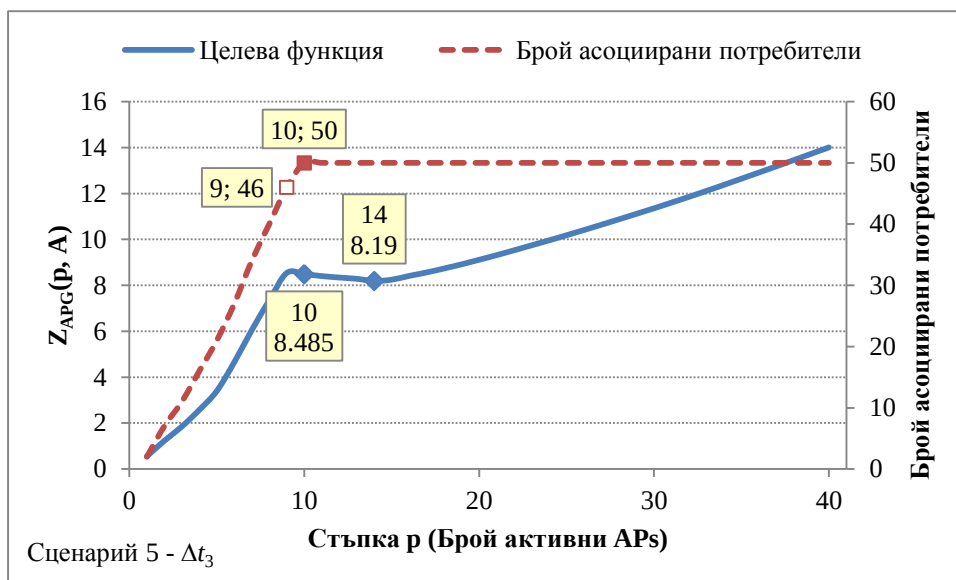
На Фигура 2.14, Фигура 2.15 и Фигура 2.16 са илюстрирани резултатите от прилагането на ADD/DROP евристичен алгоритъм за асоцииране на потребители и групиране на APs за *сценарий 5*, респективно за Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 .



Фигура 2.11 Сценарий 5: Резултати от изчислението на целевата функция за Δt_1

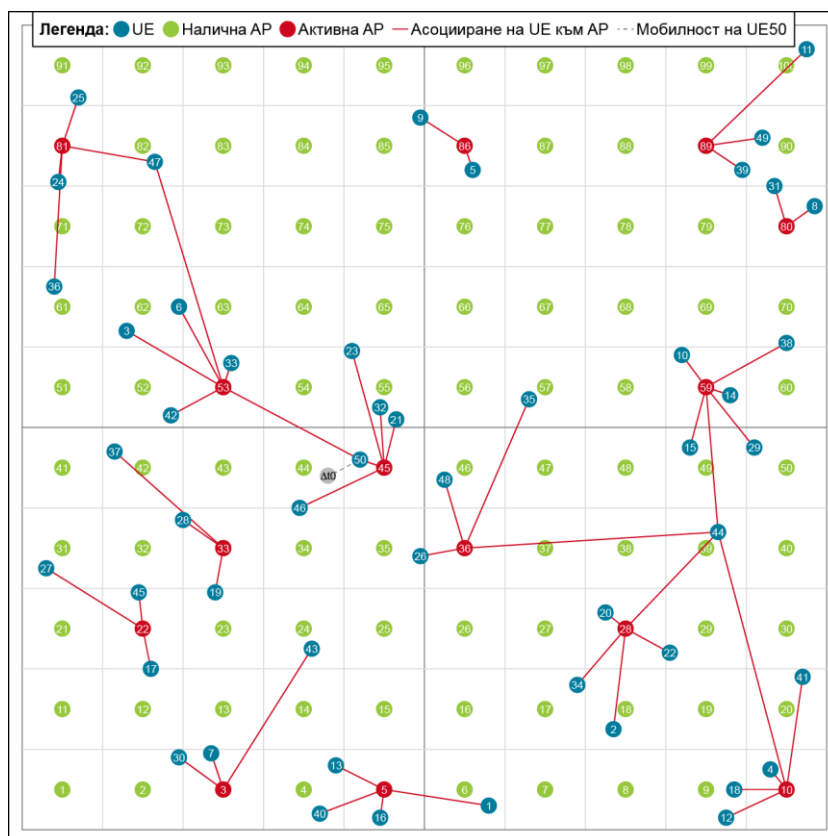


Фигура 2.12 Сценарий 5: Резултати от изчислението на целевата функция за Δt_2

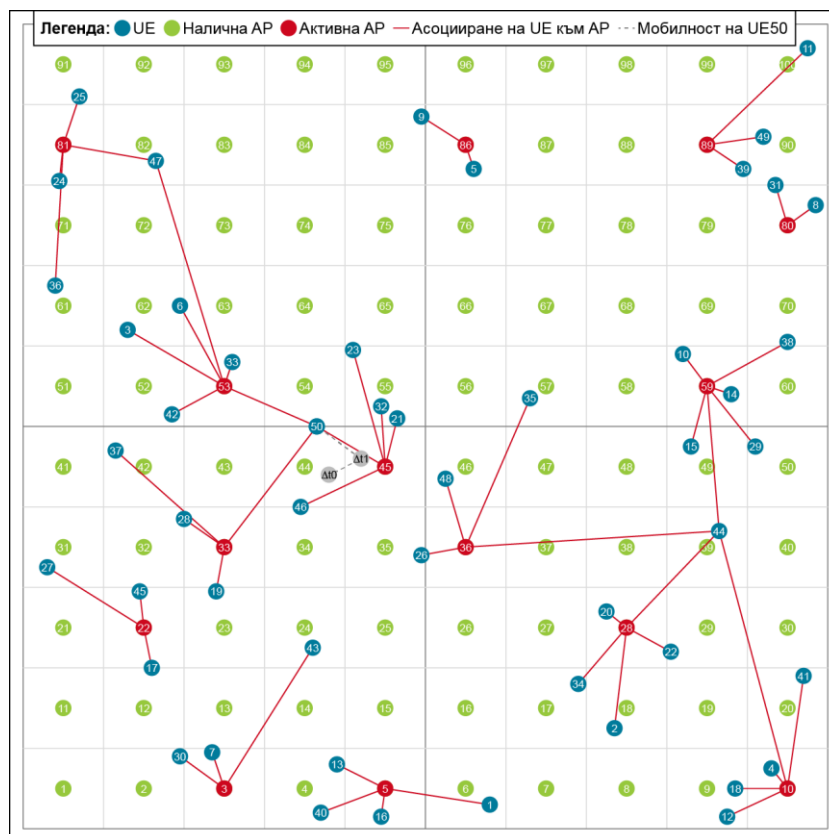


Фигура 2.13 Сценарий 5: Резултати от изчислението на целевата функция за Δt_3

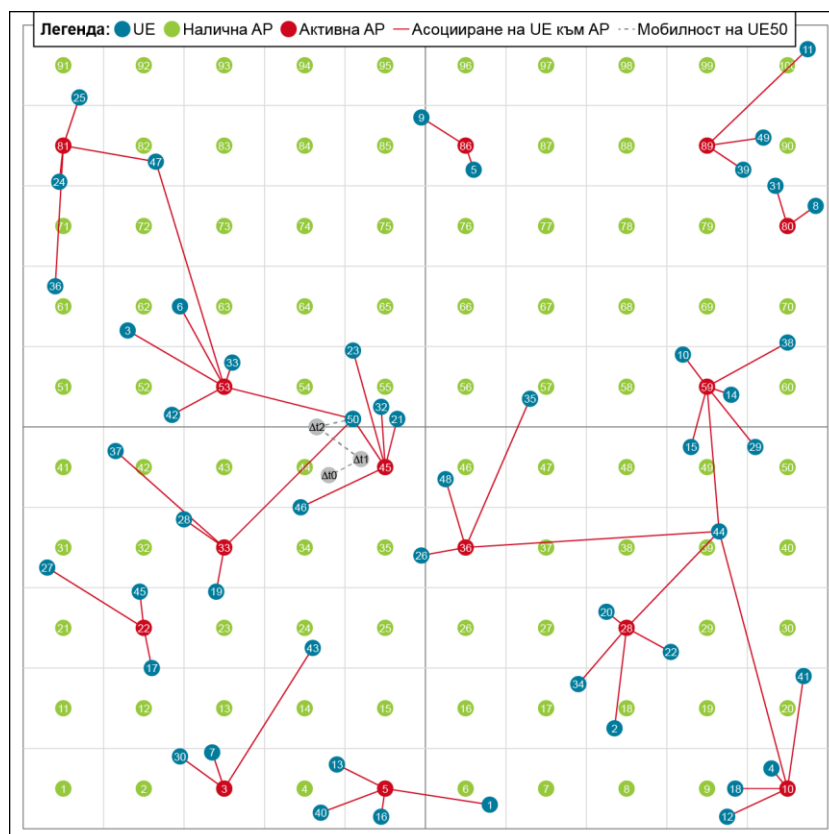
Вижда се, че във времеви слот Δt_1 за обслужване на UE50 е формирана APG, обслужваща го напълно (на 100%), състояща се от две APs (AP45 и AP53). Потребителят използва респективно 87% и 13% от ресурсите на съответната активна AP, участваща в APG (Фигура 2.14). Във времеви слот Δt_2 при обслужването на UE50 се наблюдава промяна в APG от Δt_1 . Потребителят продължава да се обслужва от AP45 и AP53, но към групата е добавена и AP33 (Фигура 2.15). Във времеви слот Δt_3 няма промяна в APG (Фигура 2.16), но се наблюдава промяна в ресурсите, предоставени на потребителя от APs, формиращи групата.



Фигура 2.14 Сценарий 5: Динамично групиране на APs за времеви слот Δt_1



Фигура 2.15 Сценарий 5: Динамично групиране на APs за времеви слот Δt_2



Фигура 2.16 Сценарий 5: Динамично групиране на APs за времеви слот Δt_3

Определянето на времевите периоди за регрупиране на APs (или актуализиране на APG) зависи от структурата и динамиката на мрежата, от моделите на каналите, от типовете APs и тяхната плътност, от мобилността и плътността на потребителите и т.н., които могат да бъдат отразени в алгоритъма чрез подходящо определяне на *нормата на привличане* и *нормата на насищане*. Като се има предвид динамиката на CPWAS, при която ще се изисква често регрупиране, евристиката и сравнително ниската изчислителна сложност на предложения подход ще бъдат предимство за неговото приложение.

2.2. Асоцииране на основата на модел за партньорство

Друг подход за решение на задачата за асоцииране е базиран на „Избиране на подходящ партньор“ чрез оценка на *Поведението* и *Влиянието* на възлите. Идеята за асоцииране чрез този подход е да се предложи евристичен модел за оценка на бъдещата „връзка“ между потребител и AP в една изключително разнообразна и динамично променяща се среда, като тази на CPWAS. В [A12] и [A13] е предложен модел за свързване на комуникационни възли и оценка на тяхната работоспособност в зависимост от конкретните изисквания за QoS и необходимите ресурси. Моделът се основава на една аналогия на установяване на дългосрочни партньорски взаимоотношения между двама души, описани в [93]. Такъв модел може да се използва за откриване, свързване и интерпретиране на комуникационни възли в широкомащабни неструктурирани и ресурсно ограничени среди с оглед колективно използване на ресурси и предоставяне на услуги. Идеята е да се открие комуникационен възел, който има необходимия набор от желани ресурсни атрибути в съответствие с исканията на заявената услуга или приложение от страна на друг възел. Този модел може успешно да се приложи за асоцииране на потребители към AP в CPWAS, тъй като потребителят и AP могат да се идентифицират чрез няколко ключови променливи. За илюстрация на метода за асоцииране, базиран на един такъв модел за партньорство, в [A12] е разгледан сценарий от два възела, всеки от които има определена роля. В [A13] е показано, че в процеса на създаване на комуникационна връзка чрез избор на подходящо устройство/партньор има много аналогии с човешката комуникация по време на процеса на подбор на дългосрочен партньор [93]. Както в човешките взаимодействия, моделът, предложен в [A13], разглежда като отправна точка сценарий на два възела, всеки от които има определена роля, т.е. потребител и AP. Възелът, който инициира комуникацията (N_1) и възелът, който извършва асоциацията и поддържа комуникацията (N_2), са в ролеви взаимоотношения, отразени в изрази (2.15) и (2.16), и са дефинирани чрез оценки, базирани на един параметър, наречен *Повлияно Поведение* (*Influenced Behavior*).

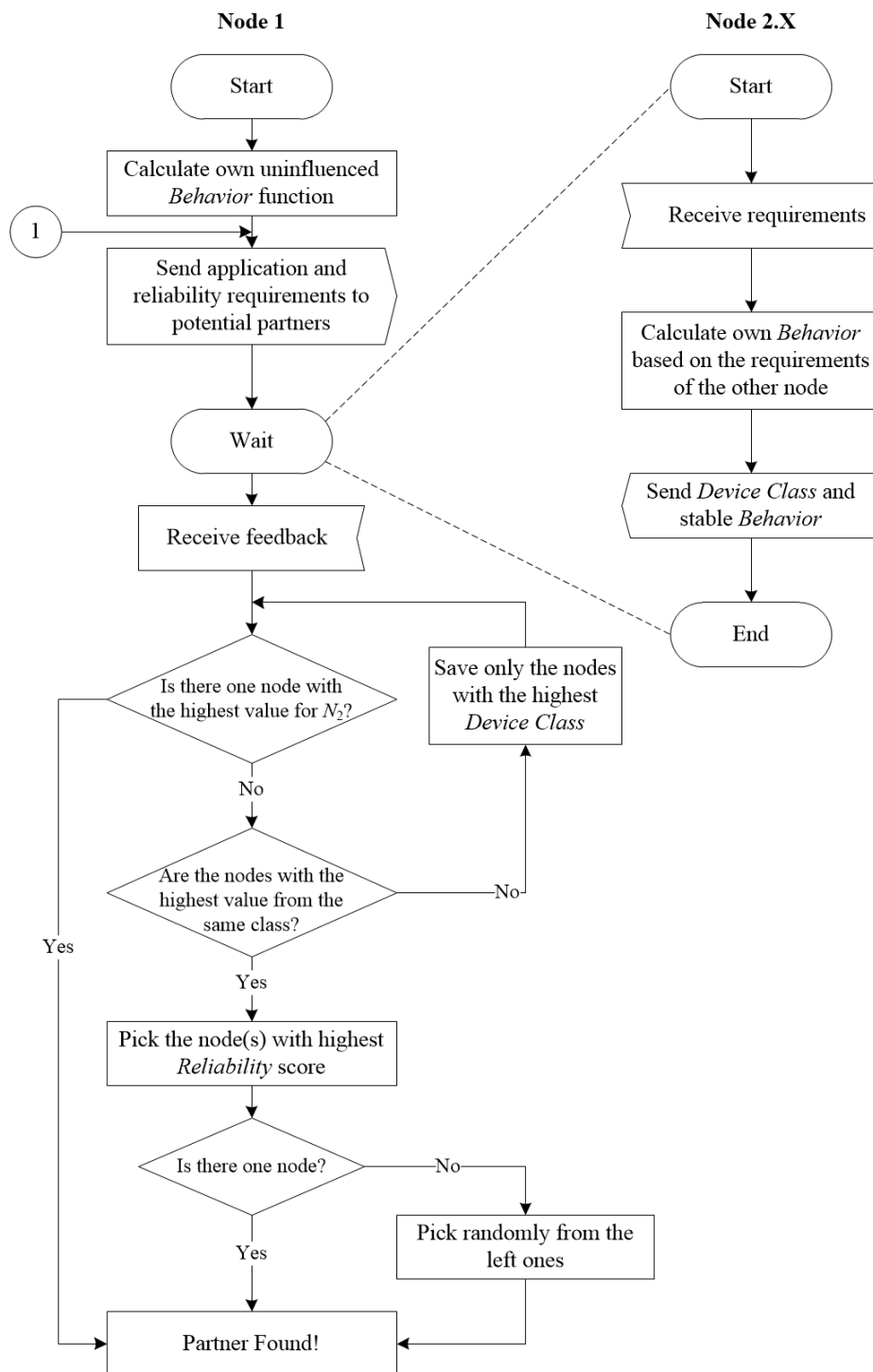
$$B_1(t + 1) = I_{N_2 \rightarrow N_1} B_2(t) + r_1 B_1(t) + a \quad (2.15)$$

$$B_2(t + 1) = I_{N_1 \rightarrow N_2} B_1(t) + r_2 B_2(t) + b \quad (2.16)$$

Където $B_1(t + 1)$ представлява *Поведението* (*Behavior*) на N_1 в момент $t + 1$, а $B_2(t + 1)$ представлява *Поведението* (*Behavior*) на N_2 в момент $t + 1$, които се оценяват чрез следните параметри:

- $I_{N_2 \rightarrow N_1}$ е стойността на *Влиянието* (*Influence*) на възел N_2 върху възел N_1 , а $I_{N_1 \rightarrow N_2}$ е стойността на *Влиянието* (*Influence*) на възел N_1 върху възел N_2 ;

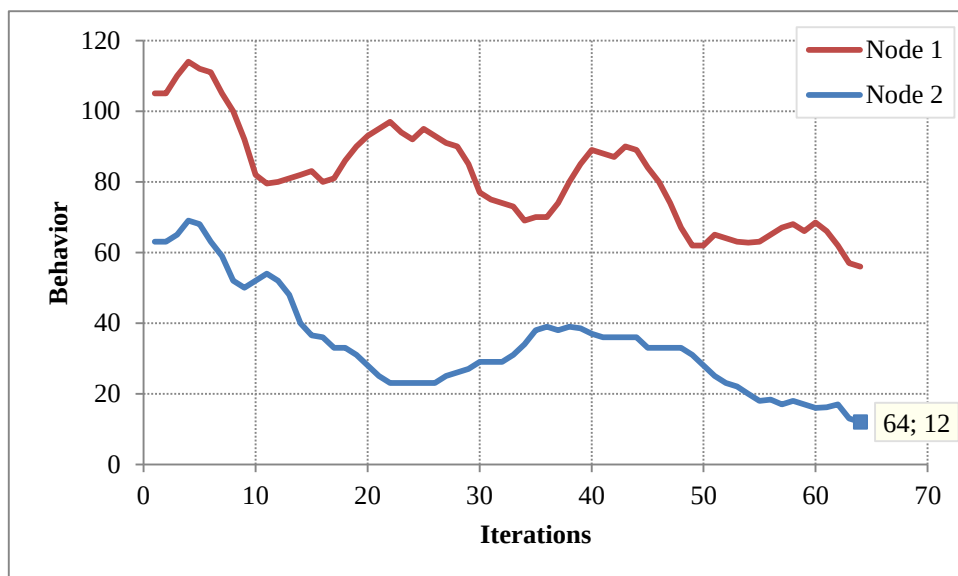
- r_1 и r_2 са параметри, отчитащи исканите или предоставените ресурси респективно от възел N_1 и от възел N_2 ;
- $B_1(t)$ и $B_2(t)$ са резултатите от *Поведението* на възел N_1 и на възел N_2 в предишния момент от време t ;
- a и b са целочислени константи, дефиниращи класа на устройството (възел N_1) и класа на устройството (възел N_2);
- t представлява момента от време (брой итерации).



Фигура 2.18 Алгоритъм за избор на партньор [A13]

Поведението е оценка, показваща възможностите на даден възел (потребител/АР) в зависимост от изискванията, на които трябва да отговаря (искани/налични ресурси). Тази оценка може да има само положителни стойности поради спецификата на моделираните феномени. В резултат на това, стойностите, които параметърът *Поведение* може да приеме, са цели стойности в определен диапазон, които се определят въз основа на формула, оценяваща този параметър при липса на влияние от други възли, или т.н. *Неповлияно Поведение* (*Uninfluenced Behavior*), както е посочено в [A13].

Партньорският възел се избира въз основа на алгоритъм, показан на Фигура 2.18, илюстриращ избор на възел за комуникация в един хетерогенен сценарий, описан и анализиран в [A13]. На Фигура 2.19 е показан един от резултатите от симулирането на такъв сценарий, описан в [A12], който показва текущите стойности на *Повлияно Поведение* на N_1 и N_2 . Основна причина за колебанията на кривите е отрицателното *Влияние* на N_1 върху N_2 и промените на r_1 и r_2 . Може да се види, че след определен брой итерации (60), *Повлияното Поведение* на N_2 намалява значително, тъй като ресурсните възможности на възела намаляват и само 30% от тях остават свободни. Освен това, поради загубата на ресурс, N_2 вече не може да отговори на изискванията на N_1 , в следствие на което *Повлияното Поведение* на N_2 достига резултат от 12, който в конкретния симулационен сценарий [A12] е равен на стойността на *Клас на устройство* на възел, представляващ АР. Това означава, че N_2 вече не е ефективен партньор за N_1 и трябва да се започне процедура за намиране на нов партньор, т.е. асоцииране.



Фигура 2.19 Оценка на взаимното влияние на два свързани комуникационни възела [A12]

В [A14] е предложен модел за оценка на взаимодействието между възли, отрязващ добре динамиката на сложна сензорна мрежа в сценарий на „Интернет на нещата“ (IoT), при който целта е да се увеличи вероятността за съществуване на комуникационни пътища в една сензорна мрежа като същевременно се запазят ресурсите на мрежата и енергийната ефективност над даден праг. Изходната точка за реализация на модела е резултатът от Фигура 2.19, показващ че два комуникационни възела могат взаимно да си повлияят негативно, което може да доведе до преждевременно прекъсване на връзката. В моделът се прилага метода на Лотка-Волтера (Lotka-Volterra: LV), вдъхновен от биологията и отразяващ зависимостта между хищник и плячка, за да се реализира един по-ефективен модел за

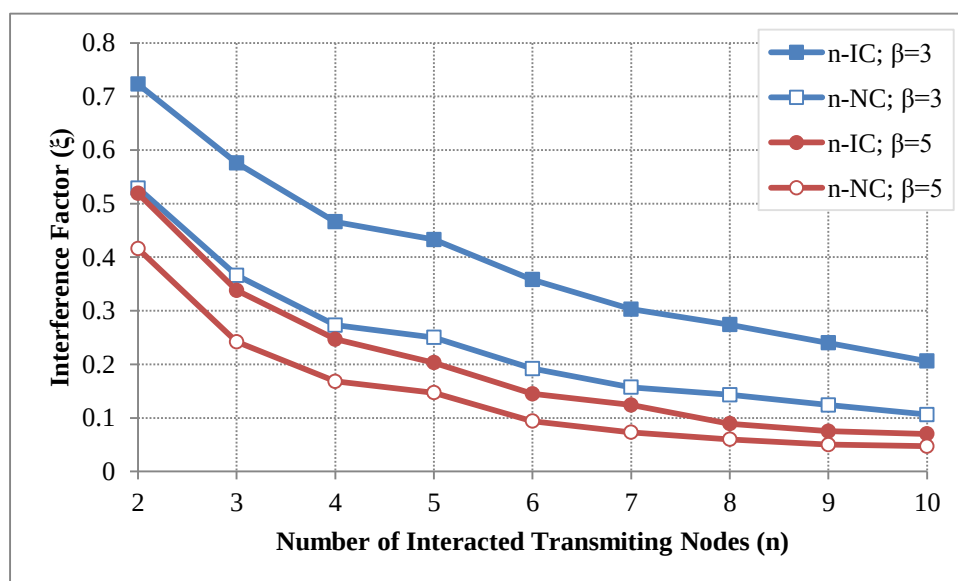
комуникация между възли. При този подход всеки един компонент или възел се свързва към клъстер, т.н. „хипер-граф“, по такъв начин, че да има достъп до други възли при определени ограничения на мрежата, при които се дефинира една оптимизационна задача. Едно от предимствата при използване на такъв евристичен модел е, че решавайки оптимизационната задача може да се дефинира характеристичен показател или метрика, което да улесни моделирането на *Повлияно Поведение*, а оттук и процеса за асоцииране и предоставяне на свързаност на потребители в една динамична система, каквато е CPWAS. Друго важно предимство на предлагания модел е възможността компонентите да се изчисляват паралелно и на практика в реално време, тъй като метриката може да бъде изчислявана и преизчислявана постоянно и независимо за различни подмрежи или области на обслужване на APs (хипер-графи), след което да се комбинира с цел ефективно управление на цялата AN.

2.3. Кооперативно асоцииране за реализация на потребителски ориентирани функционалности

В една унифицирана безклетъчна архитектура един потребител може да бъде асоцииран към група от няколко коопериращи се APs с цел предоставяне на исканата пропускателна способност или качество на услугата. Такова кооперативно асоцииране ще позволи CPWAS да функционира като една ефективна мрежа, ориентирана към потребителите (User-Centric Network: UCN).

2.3.1. Подходи, базирани на осигуряването на оптимално покритие

Една стратегия за оптимална вероятност за покритие, базирана на коопериране, като тази в HetNets, може успешно да се приложи за асоцииране на даден възел към няколко APs като се има предвид, че в една CPWAS функцията на координиране и управление за реализацията на такава стратегия се поема централизирано от ANOS. В [A15] е направен анализ на вероятността за покритие в HetNet с n взаимодействащи помежду си предавателни възли за двата класа стратегии за подобряване на отношението сигнал към интерференция плюс шум (Signal to Interference plus Noise Ratio: SINR).

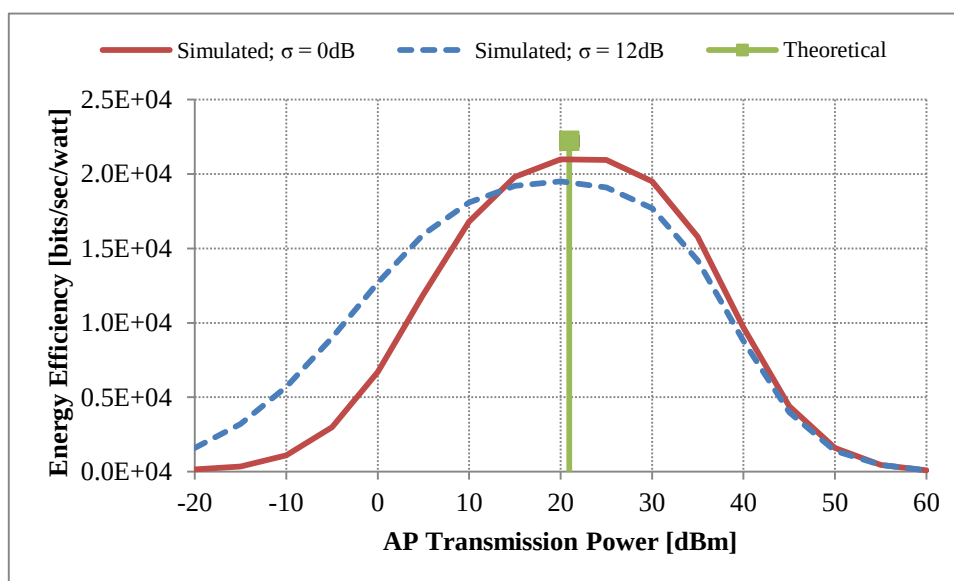


Фигура 2.22 Коефициент на интерференция в зависимост от броя на взаимодействащите си възли [A15]

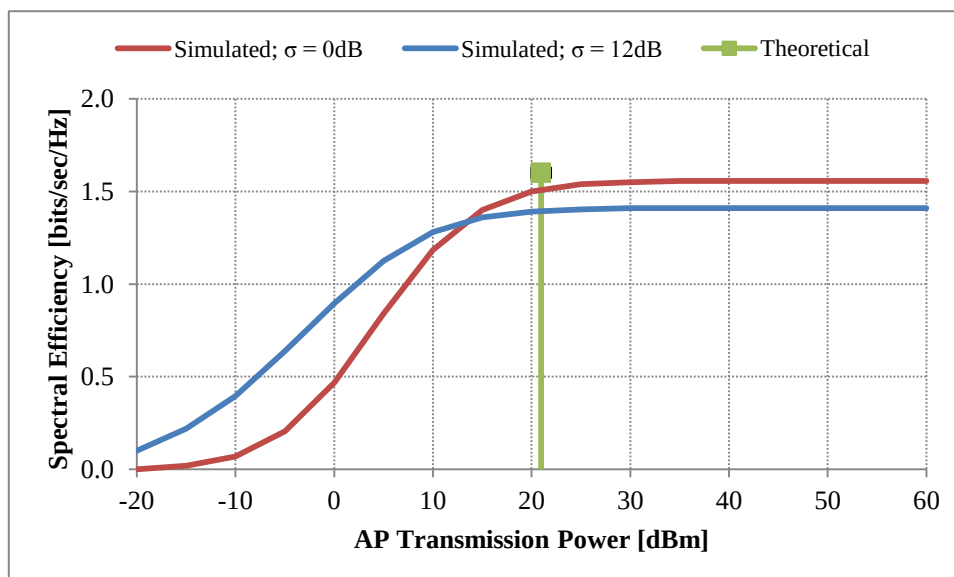
Важен резултат от направения анализ в [A15] е показаната на Фигура 2.22 зависимост на коефициента на интерференция (ζ) в зависимост от броя на взаимодействащите си възли (n) за двете стратегии при $\beta = 3$ и при $\beta = 5$. За всички случаи при прилагане на n -NC се постига по-ниска стойност на този коефициент, отколкото при n -IC. От гледна точка на една CPWAS, е важен характерът на изменение на ζ с увеличаване на броя на възлите n , които ще си кооперират с цел асоцииране и предоставяне на свързаност на даден потребител. Вижда се, че стойността на ζ намалява с увеличаване на n , но при $n > 6$ не се постига съществено подобрене на този коефициент.

2.3.2. Подходи, базирани на спектрална и енергийна ефективност

Други критерии, които могат да се използват при кооперативно асоцииране на потребители са спектралната и енергийната ефективност. В [A16] се предлага едно ново решение за оптимизиране на енергийната ефективност (Energy Efficiency: EE) по отношение на спектралната ефективност (Spectral Efficiency: SE) в клетъчни мрежи, което може да се използва като критерий за кооперативно асоцииране на един потребител към няколко APs. Основа за това е фактът, че монотонното увеличение на предавателната мощност на APs не води задължително до подобряване на общата спектрална ефективност на мрежата. За анализ на енергийната ефективност се прилага информационно-теоретичен подход, представяйки енергийната ефективност като функция на предавателната мощност на една AP, отчитайки смущаващите сигнали, след което се намира едно градиентно базирано решение за оптимизиране на нивото на предавателната мощност на AP, така че да се получи максимум на енергийната ефективност. При кооперативно асоцииране на един потребител към няколко APs от съществено значение е ANOS да управлява предавателната мощност на отделните APs, така че да се получи оптимален компромис между спектралната и енергийната ефективност. Формулиране и решение на такава оптимизационна задача, свързана с максимална енергийна ефективност, при компромис между спектралната и енергийната ефективност е предложено в [A16] като се използват изходните условия и сценарии като тези в [A15].



Фигура 2.23 Зависимост на енергийната ефективност от мощността на предаване [A16]



Фигура 2.24 Зависимост на спектралната ефективност от мощността на предаване [A16]

На Фигура 2.23 и Фигура 2.24 са показани зависимостите на енергийната и спектралната ефективност от предадената мощност на AP. От Фигура 2.23 се вижда, че резултатите от симулациите за различните сценарии за стойността на мощността, предавана от AP, съответстваща на максималната постижима енергийна ефективност, почти съвпадат с теоретичната стойност. Важен резултат е, че спектралната ефективност почти се насища след определена оптимална стойност на предаваната мощност, въпреки че тя е монотонно увеличаваща се функция, както се вижда на Фигура 2.24.

2.4. Заключение

В тази глава са предложени подходи за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и APs, с цел осигуряване на безпроблемна, повсеместна и непрекъсната свързаност на различните видове потребителски устройства в CPWAS. Подходите се основават на методи за проактивно управление на свързаността и групиране на APs и са реализирани чрез евристични алгоритми с ниска изчислителна сложност и опростени аналитични изчисления. За да могат да се реализират схемите за асоцииране, групиране и кооперативна комуникация, предложени в тази глава, две от задължителните функционалности, които трябва да се имплементират в CPWAS, което се вижда и от Фигура 1.6, са: а) следене параметрите на безжичната среда, и по-специално, интелигентно да може да се следи и анализира радиочестотния спектър; и б) гъвкаво организиране и управление на ресурсите и работата на съответните APs и APGs. Възможните подходи за реализация на тези функционалности са предложени в следващите глави.

2.5. Приноси към втора глава

1. Разработен е модел за проактивно динамично асоцииране на потребители и групиране на APs с ниска изчислителна сложност, базиран на теория на графите, чрез дефиницията на две базови свойства на APs: *норма на привличане* и *норма на насищане*. Дефинирана е целева функция за динамично асоцииране и групиране, формирана на основата на статични и динамични компоненти, и е формулирана оптимизационна задача за динамично асоцииране на потребители и групиране на APs. За решаване на

оптимизационната задача е предложен и разработен евристичен алгоритъм за асоцииране и групиране, комбиниращ предимствата на *Евристичното концентриране*, *Линейното програмиране* и *Теорията на графите*. Работата на разработения алгоритъм е илюстрирана чрез симулационен експеримент за динамично асоцииране на потребители за обслужване към определени APs и/или APGs.

2. Предложен е метод, използващ евристичен подход, базиран на модел за партньорство, който може да се приложи за откриване и свързване на комуникационни възли в широкомащабни неструктурирани и ресурсно ограничени среди с оглед колективно използване на ресурси. Методът се използва във връзка с необходимостта от решаването на сложна задача за оптимизация в експоненциално растящо пространство за търсене, каквото е пространството на CPWAS. В такава сложна AN, броят и параметрите на потребителите се променят много динамично спрямо плътно разположени APs, поради което пространството за търсене на възел за асоцииране се изменя изключително бързо и може да нараства. Моделът за партньорство се базира на намиране на комуникационен възел, който има необходимия набор от желани ресурсни атрибути, в съответствие с исканията на заявената услуга или приложение от страна на друг възел, и е илюстриран чрез разработен и симулиран алгоритъм за конкретен сценарий. Основното предимство при използване на такъв евристичен подход е, че позволява дефинирането на различни характеристични показатели или метрики, които да улеснят процеса на асоцииране и предоставяне на свързаност на потребители в една динамична система, каквато е CPWAS.
3. Предложен е подход за асоцииране на един потребител към повече от една AP или към група от коопериращи се APs, който може да осигури оптимално и ефективно функциониране на CPWAS като потребителски ориентирана унифицирана безклетъчна мрежа за достъп, в която плътността на APs е сравнима с плътността на потребителите. Прилагането на такъв подход ще позволи един потребител да може да бъде асоцииран и свързан към група от няколко коопериращи се APs с цел предоставяне на исканата пропускателна способност или QoS. Подходът е аналитичен и се базира на възможностите за прилагане на кооперативна стратегия за осигуряване на по-висока вероятност за покритие на APs и реализиране на оптимална и повсеместна свързаност на потребителите, чрез динамично организиране на APG. Предимство на предложения подход е, че използва критерии, базирани, както на свързаността и покритието, която всяка AP може да предостави и осигури, така и на нейното влияние върху общата спектрална и енергийна ефективност на системата.

ГЛАВА 3. Аналитична обработка на радио-честотни данни и контекстуализиране на потребителско поведение за интелигентно управление на безжичния достъп в CPWAS

В тази глава са предложени подходи за събиране, обработка и анализ на мониторингови и сензорни радиочестотни (Radio Frequency: RF) данни, които, заедно с техники за моделиране и предсказване на потребителското поведение и прилагане на подходящи алгоритми, базирани на AI, ще позволят адаптация на CPWAS към състоянието на околната среда и

характеристиките на потребителите с цел реализация на концепцията за повсеместна „хипер-свързаност“.

3.1. Аналитична обработка на радиочестотни данни

Аналитичната обработка на данни или аналитика, прилагана върху данни, се отнася до извличане на информация от наблюдения, измервания или експерименти за явление или обект, представляващ интерес за различни цели като интерпретиране на данни, вземане на решения, диагностика, прогнозиране и т.н. [129].

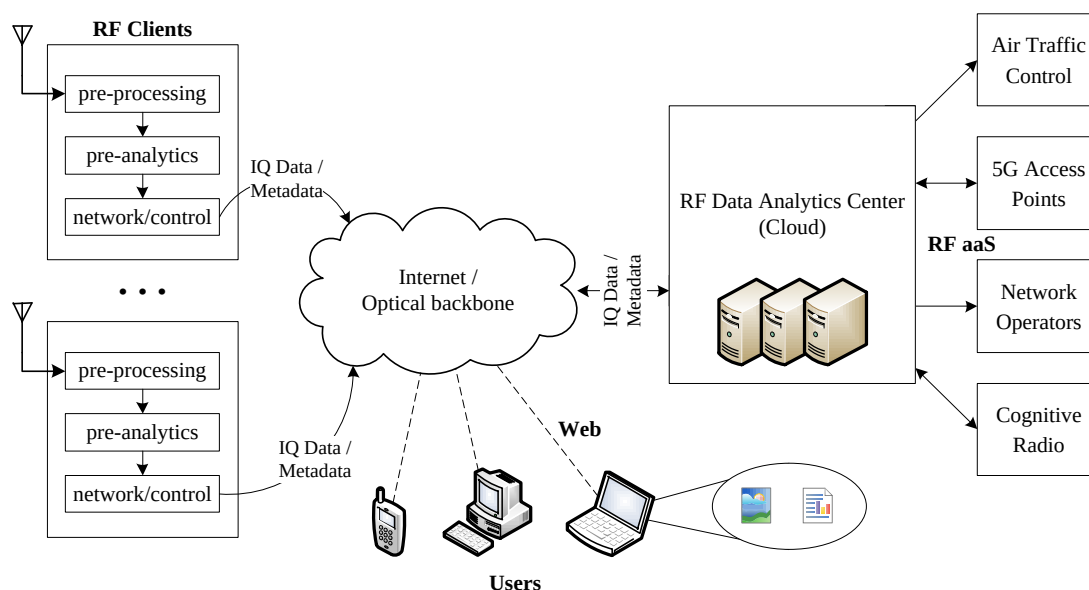
3.1.1. Запис и съхранение на RF данни в облаци

Понастоящем RF данните се разглеждат във времевата област като IQ (In-phase Quadrature) (във фаза и квадратура) данни в основна лента, или в честотната област като спектрални данни. Разглеждането на RF данните като „цифрови IQ“ или данни за спектъра може да изглежда адекватно, но тъй като то не включва никакви познания за RF сигнала като местоположение, централна честота и т.н., това определение е недостатъчно, особено от гледна точка на анализирането им. Поради това RF данните трябва да се дефинират като IQ данни във времевата област, свързани с всички метаданни (данни за данните), като централна честота, ширина на честотната лента, местоположение и др.

3.1.2. Облачни услуги и RF аналитики

В [A17] е описана RF облачна архитектура, позволяваща предлагането на редица нови услуги. В разработената платформа, описана в [A17] и показана на Фигура 3.1, са използвани различни RF клиенти с различни възможности. Реализацията на RF клиентите се базира на софтуерно дефинирано радио (Software Defined Radio: SDR), които са свързани чрез високоскоростна връзка към облака. Чрез използване на отворени интерфейси се предоставя достъп на различни потребители и приложения.

Тази платформа позволява предлагането и на по-сложни услуги и приложения, като RF аналитика. RF аналитиката представлява анализ, който цели разкриването на това, какво се крие в данните, чрез извличане на знания от RF данни на различни нива на резолюция.



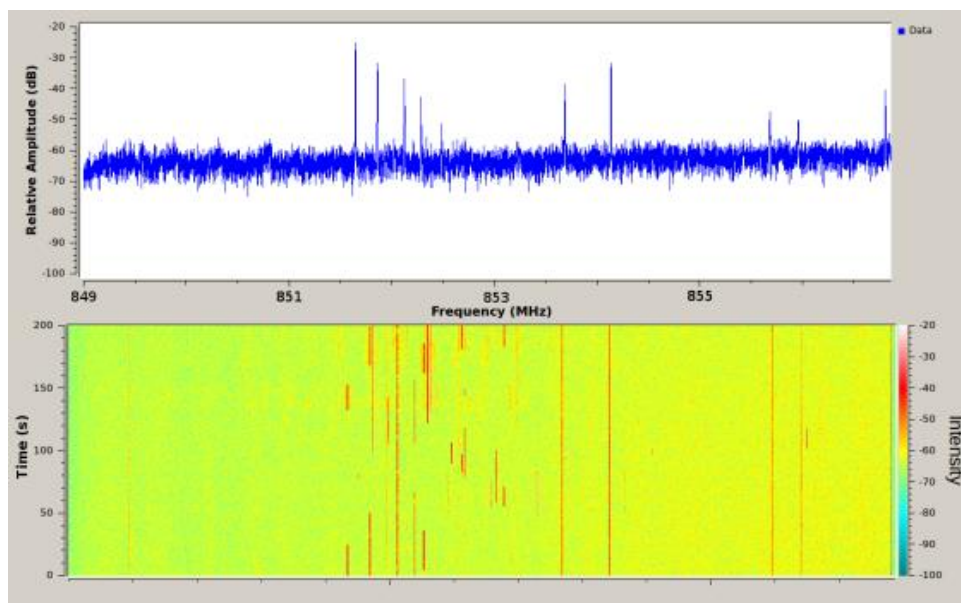
Фигура 3.1 Облачно базирана платформа за аналитики на RF данни [A17]

3.2. Мониторинг на спектъра като услуга, базирана на RF аналитики

Реализираната платформа, показана на Фигура 3.1, може да се използва за предлагане на описателни, предсказващи и предписателни RF аналитики.

3.2.1. Примери за описателна аналитика

Пример за описателна услуга и приложение на RF аналитика е наблюдението на радиочестотния спектър за експлоатационна оценка. В този случай целта на мониторинга е информацията за системите, за които е известно, че функционират, да се използва за оценка и контрол на правилната утилизация на радиочестотния спектър.



Фигура 3.2 Данни за RF спектъра на радиостанция P25 на обществената безопасност на Форд Уейн, Индиана, САЩ [A17]

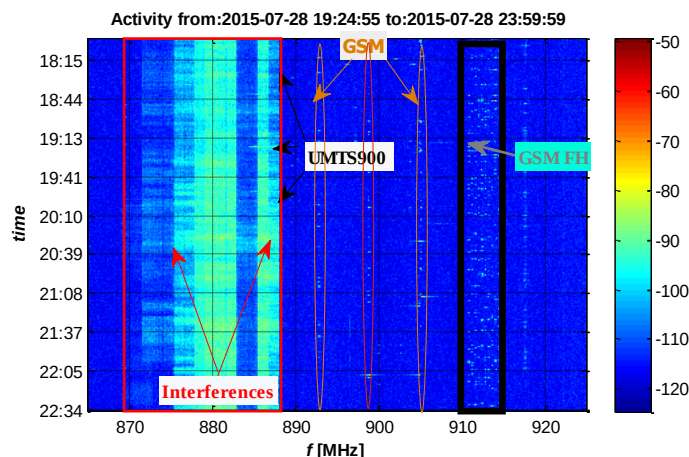
Пример за извличане на резултати от наблюдението на радиочестотния спектър е показан на Фигура 3.2, улавящ работата на радиостанция P25 на обществената безопасност на Форд Уейн, Индиана, САЩ. Това приложение за RF аналитика се основава на сдвояване на данните за радиочестотния спектър с метаданни, предоставени от RF клиента, такива като местоположение, продължителност на използвания канал и момент от време.

3.2.2. Примери за предсказателна и предписателна аналитика

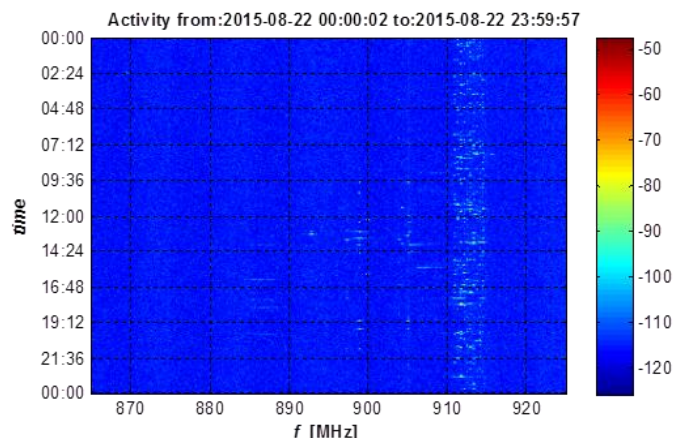
Пример за прогнозиране на заетостта на радиочестотния спектър въз основа на прилагането на алгоритми за машинно обучение върху RF данни, са представени в [A18] и [A19]. В [A18] е предложен подход за разпознаване на смущения въз основа на анализ на голямо количество данни, получени от дългосрочния мониторинг на радиочестотния спектър. Показано е, че чрез прилагането на подходящ подход за анализ на RF данни, може да се открие и идентифицира един специфичен тип интерференция в обратния канал на eNB (evolved Node Base), причинен от ефекта „атмосферен вълновод“ ("atmospheric ducting").

На Фигура 3.7 и Фигура 3.8 са показани измененията на честотно-времените вариации на приетата мощност за канала в обратна посока при GSM и UMTS900 със и без смущения [A17], докато на Фигура 3.9 и Фигура 3.10 са визуализирани средната, максимална и минимална измерени стойности със и без смущения [A18]. Анализът на резултатите от

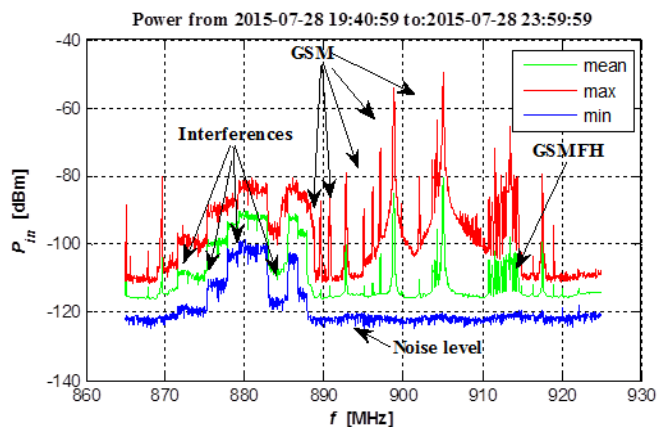
дългосрочния мониторинг показва, че в обхвата от 869MHz до 888MHz SINR на канала в обратна посока е сериозно влошен. Оказва се, че идентифицираните смущения, предизвикани от системи CDMA2000, имат еднаква ширина на честотната лента от 1.25MHz и варират във времето по подобен начин в зависимост от условията на околната среда и климата. Въз основа на получените резултати от статистическия анализ на RF данните, корелирани с данни от анализа на условията на околната среда, може да се заключи, че приемането на CDMA2000 радиосигнали от сравнително дълги разстояния е резултат от ефекта „атмосферен вълновод“.



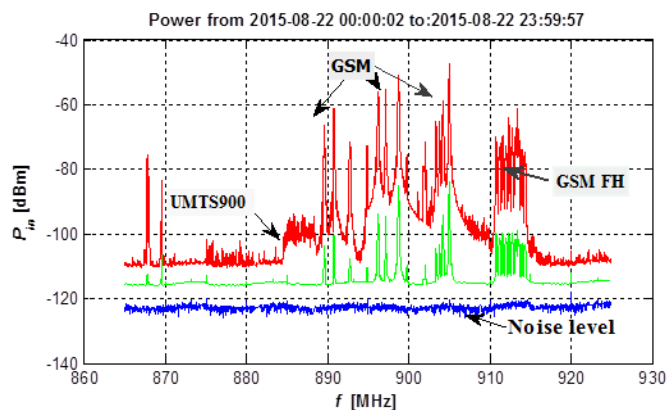
Фигура 3.7 Вариации на приетата мощност (със смущения) [A17]



Фигура 3.8 Вариации на приетата мощност (без смущения) [A17]



Фигура 3.9 Осреднени стойности (със смущения) [A18]



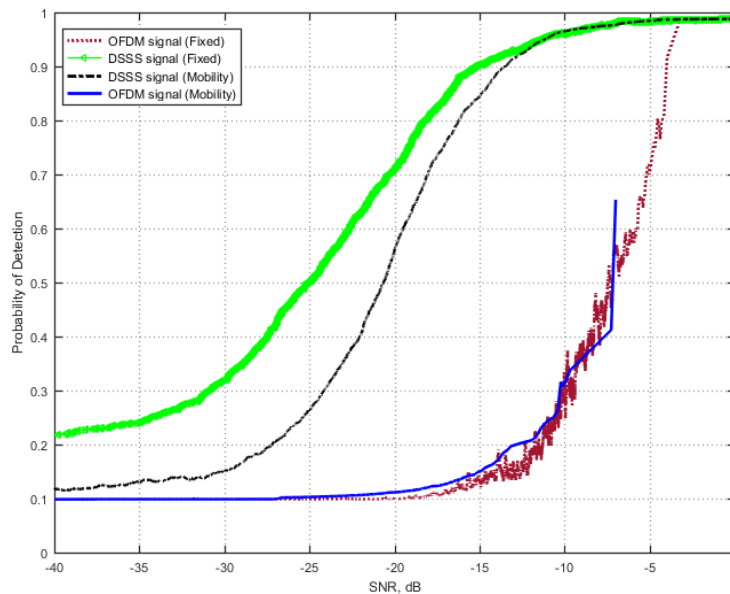
Фигура 3.10 Осреднени стойности (без смущения) [A18]

Прилагането на предсказателна RF аналитика, основаваща се на свързването на резултатите от постоянен мониторинг на радиочестотния спектър с анализа на други екологични, структурни или мобилни данни, показва че появата на такива ефекти може да се прогнозира с голяма вероятност, което ще е предпоставка за ефективната и надеждната работа на CPWAS.

3.3. Следене на спектъра

В [A20] е предложен хибриден алгоритъм за откриване на спектрални дупки на базата на енергийно детектиране и размита логика за приложение в когнитивното радио (Cognitive Radio: CR). В алгоритъма, предложен в [A20], за входове се използват нивата на отношението сигнал към шум (Signal to Noise Ratio: SNR) и приетата мощност на сигнала (P_r), като те се класифицират в три категории: „ниско ниво“, „средно ниво“ и „високо ниво“. Опитната постановка и детайлите на практическата имплементация на предложния алгоритъм за следене на спектъра са подробно изложени в [A20]. Експерименталните резултати показват, че въвеждането на метода размита логика (Fuzzy Logic: FL), който допълва процеса на вземане на решение за заетостта на канала, води до повишаване на ефективността на използване на спектъра.

В [A21] е предложен оптимизационен алгоритъм за подобряване на ефективността на съществуващи циклостационарни и енергийни детектори, базиран на балансиране между времето за измерване и точността на детекция. Представени са резултати от оценката на ефективността на алгоритъма на базата на циклостационарен детектор, от гледна точка на точността на детекция и на намиране на вероятността за заетост на канала от предавателя. Производителността на циклостационарния детектор се оценява чрез вероятността за детекция (Фигура 3.18) като се поддържа постоянна вероятност за фалшива аларма. Направено е сравнение на ефективността на детектора за два случая – стационарен (Fixed) и мобилен (Mobility) приемник, както и за два типа сигнали: а) такива, които са мултиплексирани с ортогонално честотно деление (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM); и б) такива, които са директно спектрално разширени с псевдослучайни цифрови последователности (Direct Spread Spectrum Signals: DSSS).



Фигура 3.18 Вероятност за детекция в зависимост от SNR за циклостационарен детектор при стационарен и при мобилен приемник [A21]

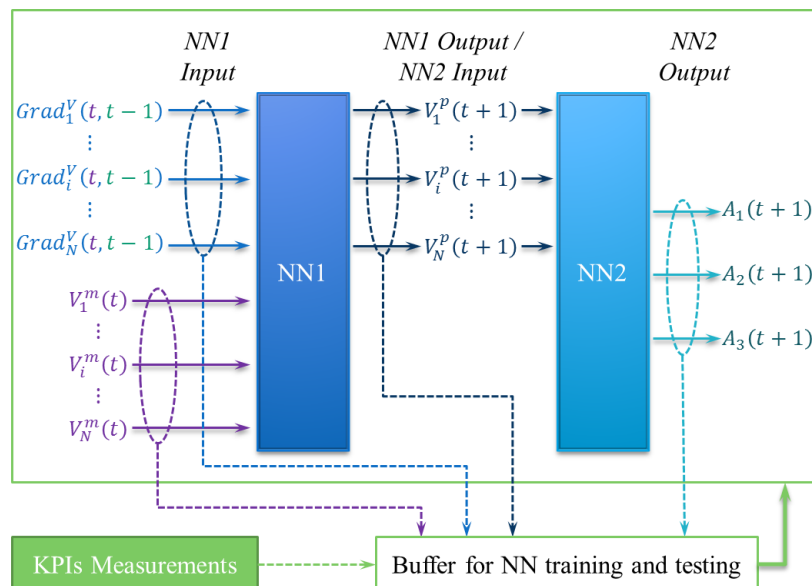
3.4. Моделиране на потребителското поведение на основата на топлинни карти

Разработването на технологии за динамично създаване и поддържане на модели, свързани с разпределението на потребителите и тяхната активност, може да се комбинира с добавянето на метаданни към трафичните модели, генерирани от потребителите. Повечето от предложените решения за прогнозиране на потребителското поведение и на потребителския трафик са с относително висока изчислителна сложност. Поради тази причина те не могат да се използват, когато динамиката на промените в поведението на потребителите и вариациите в мрежовия трафик са високи, каквито се очаква да бъдат в CPWAS. В такива случаи трябва да се прилагат алгоритми с ниска изчислителна сложност директно в APs, както е предложението в [A22] алгоритъм, използващ евристичен подход за групиране на потребители в зависимост от местоположението им и приложените методи за управление на мощността на предаване в обратна посока. Чрез наблюдение на разпределението, мобилността, активността и използваните услуги от потребителите, могат да се изградят т.н. „*потребителски топлинни карти*“ (User Heat Maps: UHMs), от които могат да се извлекат знания и да се прогнозира бъдещи събития в CPWAS.

3.4.1. Проактивно управление на AP на основата на UHM и NN

В [A23] се демонстрира възможността за използване на модели за оптимизиране на разпределението на ресурсите и ефективна работа на APs, прилагайки подходяща предсказваща аналитика. Предлага се нов подход за динамично и проактивно използване на ресурсите на една AP въз основа на архитектура на невронна мрежа (Neural Network: NN), използвайки данните от UHM, изградени върху модели на активност и мобилност на потребителите. Основното предимство на този подход е неговата ниска изчислителна сложност и високо бързодействие, което позволява неговото прилагане в динамична среда, каквато е CPWAS.

Архитектурата на NN, използвана за прогнозиране и оптимизиране на електрически тилт на антена на обслужваща AP, е показана на Фигура 3.22 и се състои от две NNs, които са обучени независимо една от друга. NN1 се използва за предсказване на следващото състояние като за вход се взимат, както градиентите на елементите от UHM за последните два времеви интервала, така и стойностите на елементите от UHM за последният времеви интервал. На изхода на NN1 са прогнозираните стойности за всеки елемент от UHM, които са вход за NN2, чийто изход дава оценка на съответните действия за промяна на електрическия тилт на антената.



Фигура 3.22 Архитектура на NN [A23]

На Фигура 3.22 $Grad_i^V(t, t-1)$ е градиентът между настоящият период от време t и предходният интервал от време $t-1$ за елемент i от UHM; $V_i^m(t)$ е измерената стойност за времеви интервал t и елемент i от UHM; V е скаларна величина за един ключов индикатор за качеството на работа (Key Performance Indicator: KPI) или вектор от стойности за няколко KPIs (брой активни потребители, средна приета мощност, общ трафик и др.); $V_i^p(t+1)$ е прогнозираната стойност за времеви интервал $t+1$ за елемент i от UHM. Градиентът $Grad_i^V(t, t-1)$, измерените стойности $V_i^m(t)$, $V_i^m(t+1)$ и прогнозираните стойности $V_i^p(t+1)$ се използват за обучението на NN1.

Действията $A_1(t+1)$, $A_2(t+1)$ и $A_3(t+1)$, представляващи промяната на електрическия тилт на антената съответно с 1, -1 или 0 градуса, могат да бъдат предприети след като е направена прогноза за следващия времеви интервал. Използвайки обучение с утвърждение (Reinforcement Learning: RL) и NN за класификатор, може да се избере най-доброто действие, което да поддържа KPIs на задоволително ниво. $A_1(t+1)$, $A_2(t+1)$, $A_3(t+1)$, $V_i^m(t+1)$ и стойностите на KPIs се използват за обучението на NN2.

3.4.2. Пример за оптимизация на капацитета и експериментални резултати

В [A24] е предложен метод за предоставяне на предсказуеми и адаптивни средства за балансиране между покритието и капацитета на мобилна мрежа, въз основа на който се предлага самоорганизиращ се алгоритъм. Последният се базира на данни от измервания в реално време, KPIs и статистически данни, събрани от мрежовите елементи и потребителските устройства. За решаване на проблема по автономен и предсказуем начин

алгоритъмът използва AI методи, базирани на машинно обучение (Machine Learning: ML), и по-специално – RL.

В [A23] за моделиране на излъчването и дефиниране на целева функция за регулиране на ъгъла на наклона на антената се използва същият подход, както в [A24]. За да се гарантира, че на всеки потребител ще му бъде предоставен исканият капацитет, целевата функция може да се дефинира по следния начин:

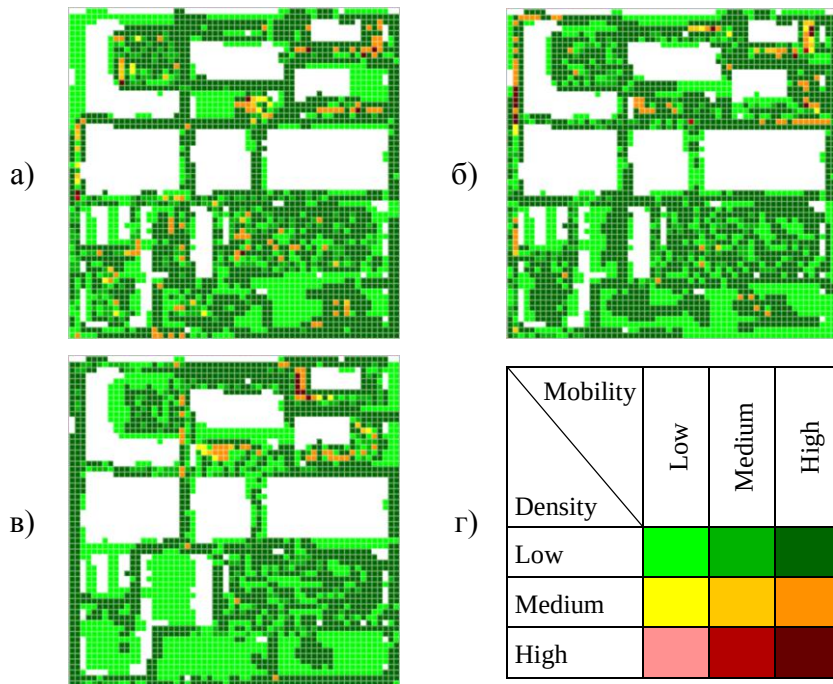
$$\sum_{k=1}^K w_k (\tilde{R}_k - R_k) \quad (3.14)$$

където $R_k \equiv R_{k,b}$ е пропускателната способност на потребител k ; $\tilde{R}_k$ е исканата пропускателна способност от потребител k ; w_k е теглови коефициент, зависещ от исканите от потребителя приоритет и клас на обслужване, като $0 \leq w_k \leq 1$. Високите стойности на w_k осигуряват високи стойности на пропускателната способност. Когато $w_k = 0$, изискванията на потребителя се пренебрегват. Електрическият тилт на антената се управлява, за да се оптимизира капацитетът на мрежата, решавайки следната оптимизационна задача:

$$\underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \sum_{k=1}^K w_k (\tilde{R}_k - R_k(\Theta)) \quad (3.15)$$

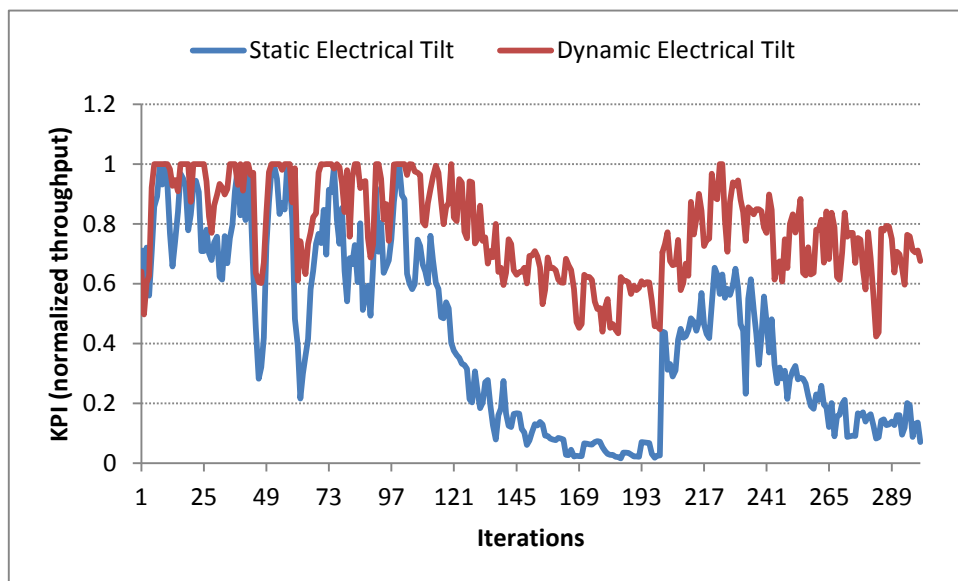
$$\text{subject to } \theta_{b,\min} \leq \theta_b \leq \theta_{b,\max}$$

където $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_b, \dots, \theta_B)$ е вектор, съдържащ градусите на наклон на антената на всяка AP в мрежата. Трябва да се отбележи, че оптимизационният проблем (3.15) не е конвексен, от което следва, че не може да бъде решен със стандартните оптимизационни техники. В [A24] оптимизационната задача е решена чрез RL, докато в [A23] се използва моделът и алгоритъмът, описани в предишната точка.



Фигура 3.23 Промяна на UHM за три последователни времеви интервала [A23]

На Фигура 3.23 се вижда как елементите от УНМ променят цветовете си в зависимост от плътността и мобилността на потребителите, т.е. отразяващи динамиката на УНМ.



Фигура 3.26 Сравнение на KPI с динамичен и статичен електрически тилт [A23]

На Фигура 3.26 са показани стойностите на нормализираната обща пропускателна способност на клетката в 300 последователни времеви интервала за два сценария. Първият сценарий е със статичен електрически наклон, настроен на стойност от 15 градуса. Вторият е с динамичен електрически наклон, прилагащ предложения алгоритъм с обучена NN.

3.5. Заключение

Имплементирането на платформа за RF аналитика, прилагането на адаптивни подходи за следене на спектъра и предсказването на потребителското поведение ще дадат възможност да се реализират две от задължителните функционалности, които трябва да се имплементират в CPWAS, показана на Фигура 1.6, а именно: а) следене параметрите на околната среда, и по-специално, интелигентно следене и анализ на радиочестотния спектър; и б) гъвкаво управление на работата на съответните APs и APGs в съответствие с действията и характеристиките на потребителите.

3.6. Приноси към трета глава

1. Разработен е модел и е имплементирана на практика платформа за събиране на „големи RF данни“, даваща възможност за прилагане на различни видове аналитики. Въведено е понятието „RF аналитика“, отразяващо обработката, анализа и извличането на знания от големи RF данни с различни цели. Разгледани са примери за приложение на дескриптивна, предсказателна и препоръчваща RF аналитики, свързани с определянето на възможностите за използване на различни честотни ленти, ефективното използване на радиочестотния спектър, идентификацията на специфични смущенията, прогнозирането на състоянието на RF средата и оценката на използваемостта на радиочестотния спектър.
2. Предложен е алгоритъм за следене на спектъра, предлагащ оптимален компромис между скорост и точност, въз основата на хибриден подход, използващ едновременно енергиен детектор и размита логика. Формулирана и решена е оптимизационна задача за

балансиране между времето за измерване и точността на детекция, даваща възможност за подобряване на ефективността на енергийни и циклостационарни детектори. Алгоритъмът е имплементиран върху платформа за провеждане на практически експерименти за CR, работещо в реално време, и получените резултати са сравнени с тези от съответни аналитични или симулационни модели.

3. Предложен е подход за динамична и проактивна оптимизация на ефективността на работа и капацитета на CPWAS, базиращ се на възможността за предсказване на потребителското поведение. Подходът отчита разпределението, мобилността и активността на потребителите и се основава на изграждането на UHM в последователни времеви интервали за дадена област и прогнозиране на състоянието на картата в следващия интервал от време. За да се избегне съхранението на голям обем от данни, за да се намали изчислителната сложност и да се осигури работа в реално време, прогнозирането се осъществява чрез NN, използваща данните от UHM. Подходът се демонстрира със сценарий за оптимизиране на общата пропускателна способност на клетката чрез контролиране на електрическия наклон на антената на обслужваща AP.

ГЛАВА 4. Подходи за управление на ресурси и реализация на 3S функционалност в ANOS

В тази глава се предлагат подходи за управление на ресурси и реализация на 3S функционалности в ANOS с цел предоставяне на повсеместна свързаност и необходимия капацитет в CPWAS, т.е. реализация на концепцията за хипер-свързаност. Те се базират на прилагането на иновативни и интелигентни методи за управление на ресурсите (честотна лента, мощност) и реализацията на 3S и автономични функционалности в ANOS на CPWAS.

4.1. Подходи за управление на ресурси

В тази точка са анализирани възможностите за използване на някои от съществуващите и намерили вече приложение принципи и методи за управление на ресурси в HetNets. Те могат да се считат като основа, която да се използва за разработване на оптимални и адекватни подходи за управление на ресурси с цел реализацията на концепцията за хипер-свързаност. Отчитайки комплексния характер на CPWAS и необходимостта от прилагането на подходи за управление на ресурси с по-ниска изчислителна сложност, за адекватно решение може да се счита евристичният алгоритъм за оптимизация, представен в [A27]. При него, идеята е да се асоциират UEs в групи (UEs с подобни свойства), към които може да бъде приложена една и съща политика за управление на ресурси. Предложеният метод се базира на прилагане на две евристични процедури. Първата е процедура за класифициране на групи от UEs при предаване в обратна посока в зависимост от SINR, което би се получило на входа на дадена AP. Процедурата се основава на алгоритъм за евристична асоциация за решаване на p -медианния проблем, разгледан в Глава 2, като асоциацията е функция на разпределението, местоположението и необходимата пропускателна способност на UEs в клетката. Освен това се използва евристичен генеричен алгоритъм за определяне на множества от UEs, за които намаляването на предавателната мощност ще доведе до повишаване на средната пропускателна способност на системата без да се намалява пропускателната способност на

AP. Резултатите от симулационните експерименти показват, че подобни подходи могат да доведат до намаляване на междуклетъчните смущения и увеличаване на общия капацитет на CPWAS без да се влоши на капацитетът на отделните APs.

4.1.1. Подходи, базирани на ролеви игри

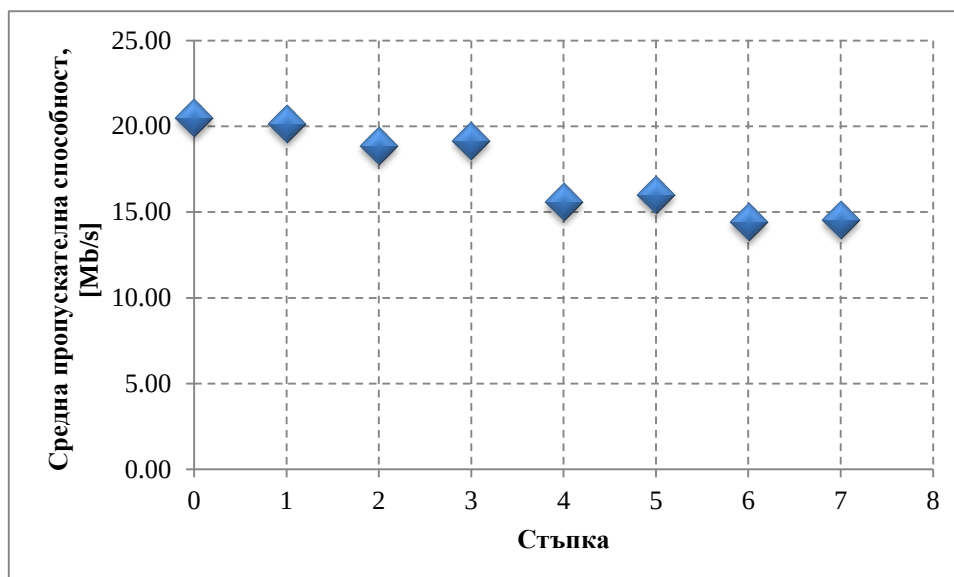
В контекста на CPWAS, теорията на игрите може да осигури набор от инструменти за анализиране на ресурсни конфликти, или по-общо казано, на оптимизационни задачи с множество конфликтни целеви функции. Поради наличието на плътно разположени разнородни UEs и изискването за осигуряване на повсеместна и безпроблемна свързаност при ограничени ресурси (спектр и мощност), възникването на ресурсен конфликт е с голяма вероятност. В този случай, имплементирането в ANOS на игрови подходи е решение, което може да осигури ефективното управление на ресурси.

В [A28] са предложени игрови подходи към управление на мощността и координация на смущенията, които се основават на максимизиране на ползата. Такива подходи могат да се приложат за постигане на едно „равновесие“ между множествата от APs и потребителите в аспектите на CPWAS. Предизвикателството пред ролевия подход е намирането на компромис между задоволяването на нуждите на UEs, включващи изисквания капацитет и качество на обслужване, от една страна и по-лесното администриране на CPWAS от друга.

Един прост пример, показващ целесъобразността от прилагането на ролеви игрови подход, е изложен в [A29], където целта е да се управлява мощността на предаване на APs, така че да се поддържа общото SINR близко до неговата максимално допустима стойност. Разглежданият сценарий на относително малки клетки може да се счита сходен до този на CPWAS. За намаляване на зависимостта на SINR от натоварването може да се приложи предложеният в [A30] ролеви игрови подход, използващ невронен класификатор за имплементиране на динамично разпределяне и управление на мощността в обратна посока (Uplink Power Control: UPC), като се взимат предвид разпределението, местоположението и необходимата пропускателна способност на UEs в клетката. При този подход се цели и оптимизиране на консумираната енергия от батерията на UE, както и справедливост по отношение на отделните потребители на мрежата.

В предложеният подход се използва самообучаващ невронен класификатор на зоните за определяне на изолинии, по такъв начин, че всяка зона показва вероятностното разпределение на UEs, изискващи една и съща услуга или съответната пропускателна способност. Като краен резултат от симулацията се получават общата и средната пропускателна способност на клетката, в зависимост от различното разпределение на ролите по зони. Получените резултати са представени на Фигура 4.6, от които се вижда, че средната пропускателна способност се изменя в относително малки граници.

На практика в предложения ролеви игрови подход се прилага модел на Стакелберг за постигане на равновесие, при който лидерът е AP, а последователите са зоните в клетката. Разпределението на ролите по зони представлява стратегията на последователите, а поддържането на средната пропускателна способност (Фигура 4.6), възможно най-близо до максималната възможна в клетката, осигурявайки ниво на междуклетъчните смущения под граничната стойност, както и справедливо предоставяне на QoS на отделните потребители, е печалбата на лидера.



Фигура 4.6 Средна пропускателна способност на клетката за всяка стъпка от невронния класификатор [A30]

4.1.2. Подход за управление на ресурси, базиран на анализ на риска

В [A31] е предложен механизъм за управление на мощността и смущенията на базата на обща процедура за управление на риска. При него се прилага проактивен алгоритъм за управление на мощността и смущенията в обратна посока, работата на който се илюстрира със симулация в опростен HetNet сценарий. Резултатите от симулационните експерименти показват, че такъв подход би могъл ефективно да се приложи за динамично и ефективно управление на ресурси в CPWAS. В предложеният подход се отчита, че при хетерогенни сценарии и плътно разположени APs се появява нова интерферентна среда, тъй като условията по отношение на смущенията се влошават, особено при плътни и непланирани разгръщания на APs [105]. В такива сценарии има съществена разлика в SINR в различните клетки, което води до различна пропускателна способност за UEs в зависимост от разположението им по отношение на APs. Процедурата за управление на риска се имплементира чрез проактивна схема за управление на ресурси, при която APs коригират своята предавателна мощност или режим на работа в зависимост от взаимните смущения, които UEs си причиняват. За механизма за управление на мощността се използва модифициран подход на управлението на мощността без обратна връзка (Open Loop Power Control: OLPC), основан на асоцииране на UEs в множества, предложен в [A4], [A22].

Таблица 4.3 Резултати от работата на алгоритъма за оценка на риска [A31]

Parameter	AER pAP operating mode	ANR pAP operating mode
Damage	25	100
Calculated risk value	40	115
Level of the preventive measures	40%	40%
Overall ranking of the threat	24	69

Таблица 4.4 Промяна в пропускателната способност на отделните групи от UEs преди и след прилагане на процедурата за управление на риска [A31]

ΔThr	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
<i>AER operating mode of the pAP</i>						
ΔThr before, (%)	-12.5	4.6	-16.0	-44.3	-15.3	4.9
ΔThr after, (%)	17.9	1.1	21.5	42.1	17.0	1.3
<i>ANR operating mode of the pAP</i>						
ΔThr before, (%)	-8.9	6.4	-11.5	-28.1	-10.9	-21.9
ΔThr after, (%)	21.5	3.9	26.4	90.1	21.7	74.7

Резултатите от симулацията са дадени в Таблица 4.3 и Таблица 4.4. В Таблица 4.3 са показани резултатите от работата на алгоритъма за оценка на риска при прилагане на режимите на работа "активен - разширен обхват" (Active Extended Range: AER) и "активен - нормален обхват" (Active Normal Range: ANR) на пико AP (pico Access Point: pAP). Стойността на „нивото на превантивните мерки“ е пропорционална на процента на групите UEs, на които е увеличен компенсационният фактор на мощността α . Параметърът "обща класификация на заплахата" (Overall Ranking of the Thread) определя риска от заплахата - нисък, среден, висок след прилагането на превантивни мерки. Скалата за стойността на риска е следната: нисък риск 10 - 24 (зелен); среден 25-99 (жълт); висок 100 - 400 (червен). В Таблица 4.4 е показана промяната в пропускателната способност на отделните групи от UEs преди и след прилагането на процедурата за управление на риска.

4.2. Реализация на 3S и автономични функционалности в CPWAS

Въвеждането на интелигентност в ANOS може да се счита като добавяне на едно ново измерение в управлението на ресурси в рамките на CPWAS. Пример за това са предложените в [193, 194, 195] подходи за ML, използвани за управление на мощността и интерференция в HetNets. Чрез прилагане на ML върху събрани данни за трафика, за топологията на мрежата, за разпределението и динамиката на UEs, които стават все по-разнородни и динамично променящи се при плътни и хетерогенни сценарии, такива, каквито се очаква да бъдат в CPWAS, може да се повиши пропускателната способност на мрежата и да се създадат условия за въвеждането на SON функционалности.

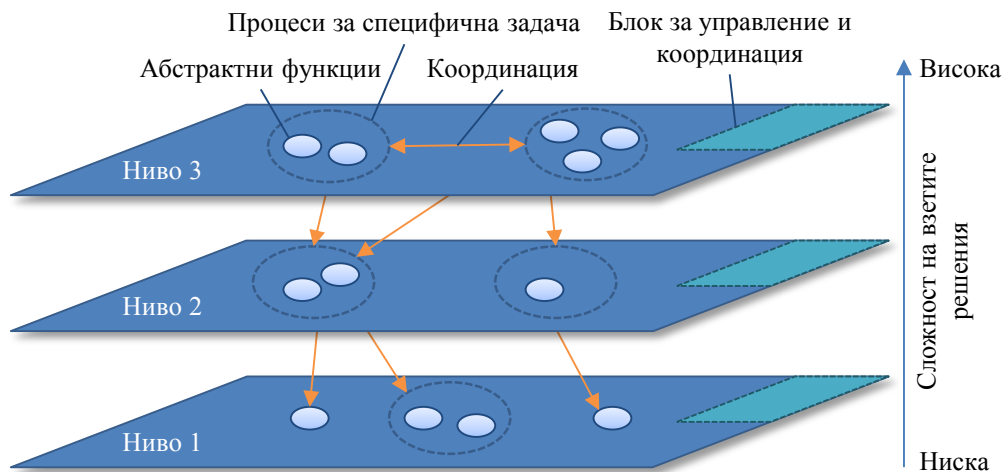
4.2.1. Имплементиране на ML за реализация на 3S и автономични функционалности

Събирането и сливането на сензорни, мониторингови и OAM данни, тяхната обработка и анализ, заедно с прилагане на алгоритми за ML, AI и др., ще позволи имплементиране на 3S и автономични функционалности в ANOS и еволюция на CPWAS. В CPWAS логиката на тази автономичност ще бъде поставена или съхранена в отделна равнина в ANOS, наречена "когнитивна равнина", която ще взаимодейства и ще контролира различните комуникационни технологии и устройства. Примерен подход за реализацията на такава когнитивна равнина е предложеният идеен модел в [A33] за въвеждане на характеристики за SON за решаване на проблем за ефективно използване на ресурси и пестене на енергия. Моделът е развит и неговата имплементация илюстрирана в [A5]. Като основа за реализацията на автономични функции в CPWAS, в тази работа се предлага въвеждането на

когнитивна равнина и схема за ML, базирани на абстракция, модулност и йерархия, както е показано на Фигура 4.11 и Фигура 4.12.



Фигура 4.11 Абстракция на когнитивната равнина [A5]



Фигура 4.12 Йерархичност при вземане на решение [A5]

На Фигура 4.13 е илюстриран процесът на наблюдение, обучение и самооптимизация в когнитивния блок на предложената ML схема. Той е разделен на индивидуални функционални стъпки, които са модулни и абстрактни една от други.



Фигура 4.13 Йерархичност при вземане на решение [A5]

Когнитивните стъпки и блокове от предложената когнитивна равнина са следните:

- *Инициализация.* В този блок се дефинират параметрите, действията, ограниченията и целевите параметри, които е необходимо да бъдат оптимизирани или следени.
- *Наблюдение и статистическа обработка.* Данните за взимане на решение се събират от наблюденията на UEs, състоянието на CPWAS и средата. След като е събрана необходимата информация, се прилагат аналитики и се извлича информация от данните, която ще е нужна за самообучителния процес в ANOS.
- *Нормализиране и групиране.* За да може всеки параметър да има необходимото въздействие при вземане на решение, се извършва предварително нормализиране. Данните, които имат приблизителни стойности се групират, при което се минимизира броя на състоянията, в които CPWAS може да попадне.
- *Обучение (връзка група-действие).* За всяка група трябва да се намери оптималното действие, което максимизира целевия параметър или параметри, ненарушавайки поставените ограничения.
- *Характеристика на въздействията.* Тази характеристика се използва за предсказване на следващите потенциални състояния на системата, следейки реакцията на CPWAS при определено действие. Една такава характеристика може да бъде извлечена, като се запазят входните и изходните данни, когато се предприема определено действие. Събраната информация се интерполира, за да се намери повърхността на прехода на CPWAS за това действие.
- *Намаляване на размерността.* Параметрите, които не допринасят за вземане на решение се премахват от когнитивния процес.
- *Извличане на правила.* След завършване на процеса на обучение, може да се извлече полезна информация, относно границата между различните състояния при предприемане на различни действия. Тази информация може да бъде споделена и да ускори самообучителния процес за други агенти или други автономични функции.

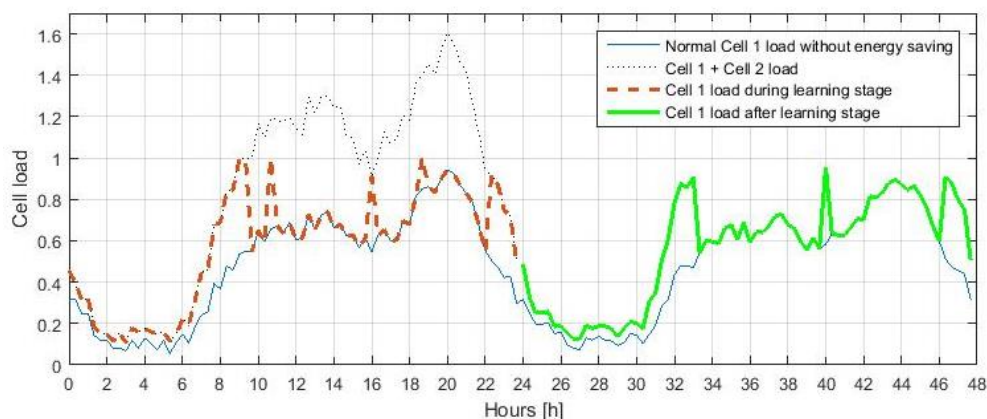
- *Самооптимизация.* Въз основа на получената информация от предишните стъпки, може да бъде разработен алгоритъм за целевите параметри, който е лесен за разбиране.

При създаването на такава ML схема се получават следните предимства:

- ✓ *Намалена сложност.* Един комплексен оптимизационен проблем може да бъде решен и разбит на няколко по-прости функционални стъпки. Понякога е невъзможно да се разработи оптимизационен алгоритъм, поради факта, че пълно знание и информация, относно проблемът не са налични, като например параметрични зависимости, граници и други. Поради тази причина се правят допускания и се опростява оптимизационният проблем. Въпреки опростяването на проблема, крайният резултат е сложен алгоритъм, който е твърде труден за реализиране, с високо ниво на детерминираност и почти невъзможен за мащабиране. Когато проблемът се раздели на по-малки оптимизационни задачи, които се решат с ML алгоритми, се получава решение, което е лесно за проследяване, разбиране, оформено и адаптирано, чрез използване на генерираните данни от наблюдението на средата в CPWAS;
- ✓ *Преизползване.* Обикновено някои комплексни проблеми имат прилики. Ако тези прилики се решат с ML и се направят абстрактни, алгоритмите могат да бъдат преизползвани за разрешаването на други проблеми и цели;
- ✓ *Гъвкавост и мащабируемост.* Когнитивните алгоритми трябва да бъдат лесни за манипулиране и могат да се използват при увеличаване размерите на CPWAS. Създавайки функционални стъпки с абстрактни ML алгоритми, ще бъде лесно да се проследи информационният поток и начинът на вземане на решение. Също така, създаденият когнитивен поток може лесно да се променя.

4.2.2. Пример за реализация на 3S функционалности

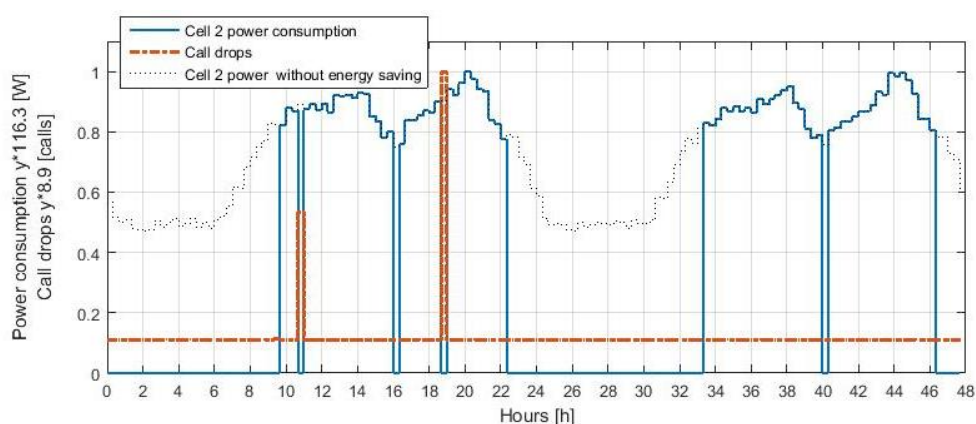
В [A5], имплементирането на ML, съгласно предложения подход, е илюстрирано за реализацията на 3S функционалности, по-конкретно за самоконфигурация с цел осигуряване на максимална пропускателна способност и оптимизация (минимизация) на изразходваната енергия в хетерогенен мрежови сценарий, съставен от плътно разположени макро APs (Macro Access Points: MAPs), микро APs (micro Access Points: mAPs) и пико APs (pAPs). В предложения сценарий, всяка MAP действа като агент и контролира множество mAPs/pAPs, натоварването на които варира през денонощието.



Фигура 4.19 Товар на приемащата AP1 по време и след обучението [A5]

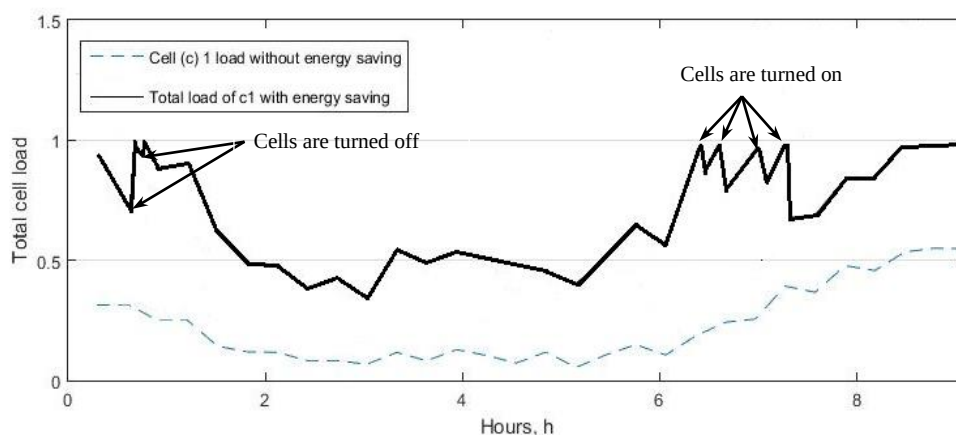
От Фигура 4.19 могат да се видят резултатите от симулирането на работата на две клетки AP1 и AP2. Показано е натоварването на AP1 по време на обучение (ден 1) и след обучение (ден 2); какво ще бъде действителното натоварване на AP1 без изключване на AP2; сумата от натоварванията на двете APs.

На Фигура 4.20 са показани нормализираната консумация на енергия на AP2 и стойностите на необслужените повиквания. Съществува ясна разлика между етапа на обучение и този на експлоатация. В етапа на обучение има три периода, в които е взето погрешно решение, когато AP2 е била изключена и AP1 не е имала капацитет да поеме товара на AP2. Резултатът е, че броят на необслужените повиквания надвишава, предварително зададения нормализиран праг. В етапа на експлоатация агентът (в случая ANOS) вече е научил, че в тези периоди от време състоянието ще бъде в зоната, в която е по-добре да се прилага действие “включване”. След като се вземе правилното решение, не се наблюдават по-високите стойности на необслужените повиквания.



Фигура 4.20 Нормализирана консумирана мощност на AP2 и стойност на необслужените повиквания [A5]

На Фигура 4.21 са показани резултатите от симулирането на сценарий за спестяване на енергия при съвместната работа на множество APs. В първия час AP1 има достатъчно свободен капацитет и алгоритъмът, вграден в агента, решава да изключи една AP, като по този начин общото натоварване на AP1 започва да се увеличава. След половин час друга AP се изключва. След 6 часа, в резултат на увеличения общ трафик, още APs се включват, в следствие на което товарът на AP1 се изменя трионообразно.



Фигура 4.21 Сценарий за пестене на енергия [A5]

4.3. Самоконфигуриране и разпределение на ресурси въз основата на комбиниран подход

В [A34] е предложен алгоритъм за самоконфигуриране и самоорганизиране на разпределението на ресурси в полукоординирани и некоординирани HetNet сценарии, съчетаващ познанията за местоположение на UEs с Q-обучение и игрови подходи, с цел подобряване на динамичното разпределение на физическите ресурси по време на процеса на агрегиране на носещи честоти (Carrier Aggregation: CA). Подходът се основава на Марковски процеси за вземане на решения (Markov Decision Processes: MDP), които оценяват стойността на функциите $V^\pi(s)$ и $Q^\pi(s, a)$. Стойността на състояние s при провеждане на политика π , означено с $V^\pi(s)$, е очакваната възвращаемост при започване в s и следвайки π . За MDPs, $V^\pi(s)$ формално може да се опише като:

$$V^\pi(s) = E_\pi\{R_t | s_t = s\} = E_\pi\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s\right\} \quad (4.13)$$

където $E_\pi\{\}$ е очакваната стойност при положение, че агентът следва политиката π , t е стъпката във времето, γ е дисконтов коефициент.

По същият начин, се дефинира стойността $Q^\pi(s, a)$ на предприетото действие a в състояние s при прилагане на политика π , като очакваната възвращаемост, която се получава като се започне от s , предприеме се действие a , а след това се следва политика π :

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi\{R_t | s_t = s, a_t = a\} = E_\pi\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a\right\} \quad (4.14)$$

Чрез използването на вероятностите на всяко възможно следващо състояние s' ($P''_{ss'}$) и очакваната стойност за следващата награда $R''_{ss'}$, може да се изрази връзката между стойността на дадено състояние и стойностите на последващите състояния, както е показано в уравнения (4.15) и (4.16):

$$V^\pi(s) = E_\pi\{r_{t+1} + \gamma V^\pi(s') | s_t = s\} = \sum_a \pi(s, a) \sum_{s'} P''_{ss'} [R''_{ss'} + \gamma V^\pi(s')] \quad (4.15)$$

$$Q^\pi(s) = E_\pi\{r_{t+1} + \gamma V^\pi(s') | s_t = s, a_t = a\} \quad (4.16)$$

За метод, какъвто е Q-обучението, трябва да се намери най-добрата политика или оптималната политика, която ще даде максимална награда или най-добрата стойност за $Q^\pi(s)$. Това може да бъде изразено като:

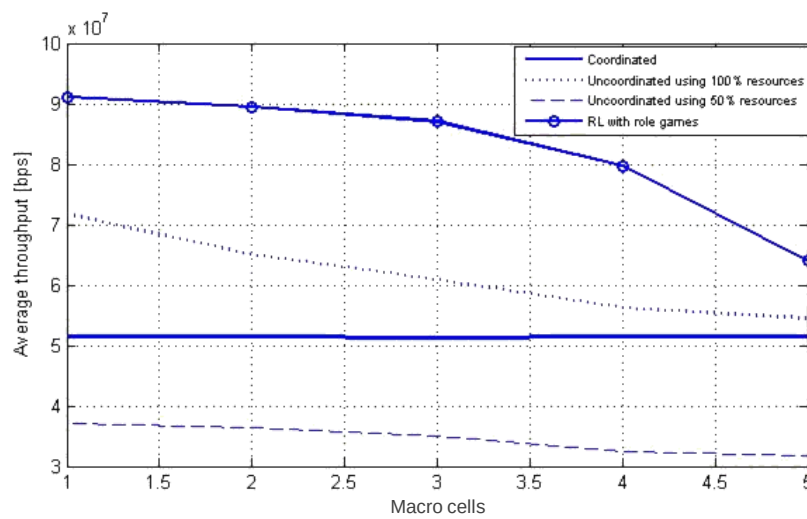
$$Q^*(s) = \max_{\pi} Q^\pi(s) = \sum_{s'} P''_{ss'} [R''_{ss'} + \gamma \max_a Q^*(s', a')] \quad (4.17)$$

Актуализацията на функцията, определяща стойността на действието, е:

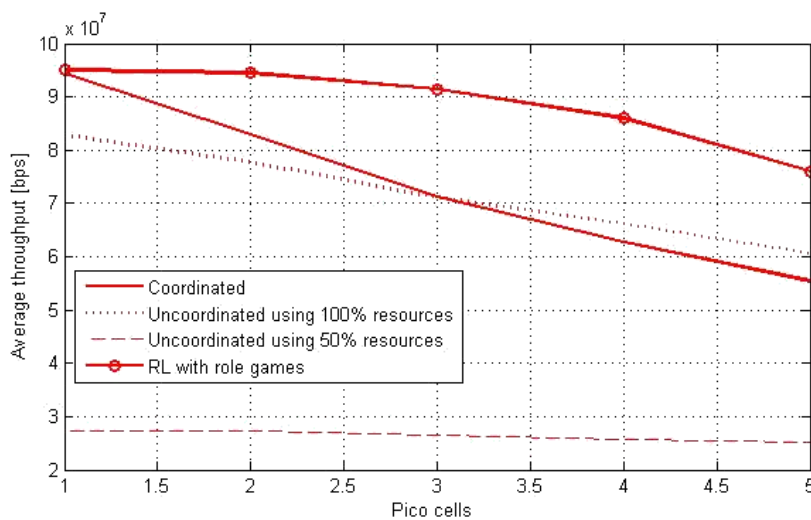
$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \delta [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (4.18)$$

където $Q(s_t, a_t)$ е последната актуализирана функция на действието; r_{t+1} е наградата за предприемане на действие a_t в състояние s_t ; $\max_a Q(s_{t+1}, a)$ е максималната стойност на действие, която може да се получи в състояние s_{t+1} ; δ е скоростта на обновяване; γ е процентът на дисконтиране. В този случай, научената или актуализираната функция $Q(s_t, a_t)$, директно приближава оптималната функция за действие-стойност $Q^*(s)$, независимо от политиката, която се следва. Това значително опростява анализа на алгоритъма и дава възможност за доказване на ранна конвергенция.

Предложеният алгоритъм се основава на Q-обучение подсилено с игрови подход, за да се гарантира справедливостта и кооперативността между APs. Алгоритъмът използва приблизителното местоположение на UEs, за да се диференцират действията им по области. Първоначалните резултати за ефективността на този алгоритъм, от гледна точка на пропускателната способност на UEs и APs, са представени в [A35].



Фигура 4.24 Средна пропускателна способност на MAP [A34]



Фигура 4.25 Средна пропускателна способност на pAPs [A34]

От Фигура 4.24 се вижда, че прилагането на такъв комбиниран RL алгоритъм с ролеви игри има значителен ефект върху средната пропускателна способност на MAPs. На Фигура 4.25 е

показано, че средната пропускателна способност на рАР с използване на алгоритъма RL е по-голяма от другите, но също намалява бавно, както при прилагането на координиран подход.

4.4. Заключение

В тази глава са предложени подходи за ефективно управление на ресурси и реализация на 3S функционалности в ANOS с ниска изчислителна сложност с цел предоставяне на повсеместна свързаност и необходимия капацитет в CPWAS, т.е. подходи, които могат да способстват за реализация на концепцията за хипер-свързаност. Предложените подходи за управление на ресурси, са в контекста на общата концепция за функциониране на AN в SC и моделирането ѝ като CPWAS, представена в Глава 1, както и изложените в Глава 2 и в Глава 3, схеми за групиране на APs, асоцииране на UEs, анализ на данни и контекстуализиране на потребителско поведение.

4.5. Приноси към четвърта глава

1. Предложен е подход за динамично управление на ресурси в CPWAS, базиран на ролеви игрови подход с максимизиране на ползата. В CPWAS сценарии, ползата е общия капацитет на APs, който може да се увеличи, чрез постигане на „равновесие” между SINR, които APs могат да осигурят на UEs от една страна, и от друга, предоставянето на исканата пропускателна способност и повсеместна свързаност. За имплементиране на ефективно управление на мощността и намаляване на зависимостта на SINR от натоварването на APs, както и за по-лесното администриране на CPWAS, се предлага ролите в игровия подход да се дефинират с помощта на невронен класификатор като се вземат предвид разпределението, местоположението и исканата пропускателна способност от UEs в зоната на покритие на APs.
2. В CPWAS характерът на интерферентната среда се изменя непрестанно в зависимост от разпределението, разположението и динамиката на UEs, по отношение на множеството хетерогенни и плътно разположени APs. Изхождайки от факта, че при такъв сценарий има условия, при които SINR може да се влоши недопустимо, е предложен подход за динамично и ефективно управление на ресурси, базиран на анализ и моделиране на риска. В основата е имплементирането на проактивен механизъм за управление на смущенията на базата на обща процедура за коригиране на предавателната мощност и/или режимът на работа на APs в зависимост от взаимните смущенията, които UEs могат да си причинят.
3. Предложен е метод за реализация на 3S и автономични функционалности в CPWAS, при който логиката на автономичността е поставена в отделна когнитивна равнина в ANOS, която да взаимодейства и контролира различните комуникационни технологии и устройства. В основата на предложения метод е прилагането на схема за ML, базирана на абстракция, модулност и йерархия, както и адаптация чрез обучение от предварително обработени данни, генерирани от мрежата.
4. Предложен е метод за самоконфигуриране и самоорганизиране на разпределението на ресурси в CPWAS въз основа на прилагане на комбиниран алгоритъм, основан на Q-обучение подсилено с ролеви игрови подход. В работата на алгоритъма е заложен полукоординиран принцип, за да се гарантира справедливост и кооперативност между

APs с оглед освобождаване на ресурси и увеличаване на средната пропускателна способност. Използват се познанията за разпределението и динамиката на UEs, за да се предвиди очакваното им местоположение и се секторизира зоната на обслужване на APs като същевременно се отчита какви ресурси използва всяка AP и какви смущения се получават. На секторите се назначават различни роли с оглед постигане на оптимално ниво на удовлетвореност (или зададено QoS) на UEs във всеки сектор. Всяка роля е функция на използваните ресурси, възможността за освобождаване на ресурси за използване от други APs и смущенията, които предизвиква сектора.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНИ ПРИНОСИ

Темата на настоящата дисертация се отнася до предлагането на подходи за осигуряване на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурсите в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични ANs. Такива сценарии на ANs се очаква да възникнат в бъдещите SCs, за които основна характеристика ще бъде наличието на хетерогенност на UEs и APs, тяхното плътно разположение и висока динамика. В дисертационният труд са предложени нови подходи, имплементирането на които ще може да осигури повсеместен достъп и свързаност на UEs, както и използване и управление на ограничените комуникационни ресурси в безжичния достъп, чрез които да може да се предостави един видимо „безкраен капацитет“ на потребителите, независимо от вида им, броя на единица площ и тяхното движение.

Обобщавайки изложеното в дисертационния труд, може да се счита, че поставената цел е реализирана, чрез изпълнение на поставените задачи, вследствие на което са постигнати следните съществени резултати с научно-приложен характер:

1. Извършен е анализ на развитието на ANs и са направени аргументирани изводи за невъзможността NGA мрежите, развиващи се на базата на конвергирани HetNets и 5G безжични мрежи, да отговорят на изискванията, наложени от един хипер-свързан, разнообразен и динамичен сценарий за достъп такъв, какъвто е този в един SC на бъдещето.
2. Дефинирани са основните характеристики на AN в бъдещите SCs, на базата на които е развита концепцията за структурата и функционалността на една AN в SC и нейната еволюцията към т.н. безклетъчен унифициран безжичен достъп (UWA).
3. На базата на сравнителна оценка на характеристиките и функционалността на UWA с тези на една мащабна CPS е предложен нов подход за моделиране и анализ на работоспособността на такава UWA архитектура, наречена CPWAS, основаваща се на концепциите за изграждане и функциониране на CPS.
4. Разработен е модел за проактивно динамично асоцииране на потребители и групиране на APs с ниска изчислителна сложност, базиран на теория на графите, чрез дефиницията на две базови свойства на APs: *норма на привличане* и *норма на насищане*. Дефинирана е целева функция за динамично асоцииране и групиране, формирана на основата на статични и динамични компоненти, и е формулирана оптимизационна задача за

динамично асоцииране на потребители и групиране на APs. За решаване на оптимизационната задача е предложен и разработен евристичен алгоритъм за асоцииране и групиране, комбиниращ предимствата на *Евристичното концентриране*, *Линейното програмиране* и *Теорията на графите*. Работата на разработения алгоритъм е илюстрирана чрез симулационен експеримент за динамично асоцииране на потребители за обслужване към определени APs и/или APGs.

5. Предложен е метод, използващ евристичен подход, базиран на модел за партньорство, който може да се приложи за откриване и свързване на комуникационни възли в широкомащабни неструктурирани и ресурсно ограничени среди с оглед колективно използване на ресурси. Методът се използва във връзка с необходимостта от решаването на сложна задача за оптимизация в експоненциално растящо пространство за търсене, каквото е пространството на CPWAS. В такава сложна AN, броят и параметрите на потребителите се променят много динамично спрямо плътно разположени APs, поради което пространството за търсене на възел за асоцииране се изменя изключително бързо и може да нараства. Моделът за партньорство се базира на намиране на комуникационен възел, който има необходимия набор от желани ресурсни атрибути, в съответствие с исканията на заявената услуга или приложение от страна на друг възел, и е илюстриран чрез разработен и симулиран алгоритъм за конкретен сценарий. Основното предимство при използване на такъв евристичен подход е, че позволява дефинирането на различни характеристични показатели или метрики, които да улеснят процеса на асоцииране и предоставяне на свързаност на потребители в една динамична система, каквато е CPWAS.
6. Предложен е подход за асоцииране на един потребител към повече от една AP или към група от коопериращи се APs, който може да осигури оптимално и ефективно функциониране на CPWAS като потребителски ориентирана унифицирана безклетъчна мрежа за достъп, в която плътността на APs е сравнима с плътността на потребителите. Прилагането на такъв подход ще позволи един потребител да може да бъде асоцииран и свързан към група от няколко коопериращи се APs с цел предоставяне на исканата пропускателна способност или QoS. Подходът е аналитичен и се базира на възможностите за прилагане на кооперативна стратегия за осигуряване на по-висока вероятност за покритие на APs и реализиране на оптимална и повсеместна свързаност на потребителите, чрез динамично организиране на APG. Предимство на предложениия подход е, че използва критерии, базирани, както на свързаността и покритието, която всяка AP може да предостави и осигури, така и на нейното влияние върху общата спектрална и енергийна ефективност на системата.
7. Разработен е модел и е имплементирана на практика платформа за събиране на „големи RF данни“, даваща възможност за прилагане на различни видове аналитики. Въведено е понятието „RF аналитика“, отразяващо обработката, анализа и извличането на знания от големи RF данни с различни цели. Разгледани са примери за приложение на дескриптивна, предсказателна и препоръчваща RF аналитики, свързани с определянето на възможностите за използване на различни честотни ленти, ефективното използване на радиочестотния спектър, идентификацията на специфични смущенията, прогнозирането на състоянието на RF средата и оценката на използваемостта на радиочестотния спектър.

8. Предложен е алгоритъм за следене на спектъра, предлагащ оптимален компромис между скорост и точност, въз основата на хибриден подход, използващ едновременно енергиен детектор и размита логика. Формулирана и решена е оптимизационна задача за балансиране между времето за измерване и точността на детекция, даваща възможност за подобряване на ефективността на енергийни и циклостационарни детектори. Алгоритъмът е имплементиран върху платформа за провеждане на практически експерименти за CR, работещо в реално време, и получените резултати са сравнени с тези от съответни аналитични или симулационни модели.
9. Предложен е подход за динамична и проактивна оптимизация на ефективността на работа и капацитета на CPWAS, базиращ се на възможността за предсказване на потребителското поведение. Подходът отчита разпределението, мобилността и активността на потребителите и се основава на изграждането на UHM в последователни времеви интервали за дадена област и прогнозиране на състоянието на картата в следващия интервал от време. За да се избегне съхранението на голям обем от данни, за да се намали изчислителната сложност и да се осигури работа в реално време, прогнозирането се осъществява чрез NN, използваща данните от UHM. Подходът се демонстрира със сценарий за оптимизиране на общата пропускателна способност на клетката чрез контролиране на електрическия наклон на антената на обслужваща AP.
10. Предложен е подход за динамично управление на ресурси в CPWAS, базиран на ролеви игрови подход с максимизиране на ползата. В CPWAS сценарии, ползата е общия капацитет на APs, който може да се увеличи, чрез постигане на „равновесие” между SINR, които APs могат да осигурят на UEs от една страна, и от друга, предоставянето на исканата пропускателна способност и повсеместна свързаност. За имплементиране на ефективно управление на мощността и намаляване на зависимостта на SINR от натоварването на APs, както и за по-лесното администриране на CPWAS, се предлага ролите в игровия подход да се дефинират с помощта на невронен класификатор като се вземат предвид разпределението, местоположението и исканата пропускателна способност от UEs в зоната на покритие на APs.
11. В CPWAS характерът на интерферентната среда се изменя непрестанно в зависимост от разпределението, разположението и динамиката на UEs, по отношение на множеството хетерогенни и плътно разположени APs. Изхождайки от факта, че при такъв сценарий има условия, при които SINR може да се влоши недопустимо, е предложен подход за динамично и ефективно управление на ресурси, базиран на анализ и моделиране на риска. В основата е имплементирането на проактивен механизъм за управление на смущенията на базата на обща процедура за коригиране на предавателната мощност и/или режимът на работа на APs в зависимост от взаимните смущенията, които UEs могат да си причинят.
12. Предложен е метод за реализация на 3S и автономични функционалности в CPWAS, при който логиката на автономичността е поставена в отделна когнитивна равнина в ANOS, която да взаимодейства и контролира различните комуникационни технологии и устройства. В основата на предложения метод е прилагането на схема за ML, базирана на абстракция, модулност и йерархия, както и адаптация чрез обучение от предварително обработени данни, генерирани от мрежата.

13. Предложен е метод за самоконфигуриране и самоорганизиране на разпределението на ресурси в CPWAS въз основа на прилагане на комбиниран алгоритъм, основан на Q-обучение подсилено с ролеви игрови подход. В работата на алгоритъма е заложен полукоординиран принцип, за да се гарантира справедливост и кооперативност между APs с оглед освобождаване на ресурси и увеличаване на средната пропускателна способност. Използват се познанията за разпределението и динамиката на UEs, за да се предвиди очакваното им местоположение и се секторизира зоната на обслужване на APs като същевременно се отчита какви ресурси използва всяка AP и какви смущения се получават. На секторите се назначават различни роли с оглед постигане на оптимално ниво на удовлетвореност (или зададено QoS) на UEs във всеки сектор. Всяка роля е функция на използваните ресурси, възможността за освобождаване на ресурси за използване от други APs и смущенията, които предизвиква сектора.

IV. ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

3C	Computation, Communications and Control	IQ	In-phase Quadrature
3S	Self-configuration, Self-organization and Self-optimization	KPI	Key Performance Indicator
5G	5th Generation	LTE-A	Long Term Evolution Advanced
AER	Active Extended Range	LV	Lotka-Volterra
AI	Artificial Intelligence	M2M	Machine-to-Machine
AN	Access Network	MAP	Macro Access Point
ANOS	Access Network Operating System	mAP	micro Access Point
ANR	Active Normal Range	MDP	Markov Decision Processes
AP	Access Point	MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
APG	Access Point Group	ML	Machine Learning
BD	Big Data	NGA	Next Generation Access
BS	Base Station	NG-PON	Next-Generation Passive Optical Network
CA	Carrier Aggregation	NN	Neural Network
CDMA	Code Division Multiple Access	OAM	Operation, Administration & Maintenance
CPS	Cyber Physical System	OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CPWAS	Cyber Physical Wireless Access System	OLPC	Open Loop Power Control
CR	Cognitive Radio	OPL	Optimum Level of Performance
C-RAN	Centralized, Collaborative, Cloud and Clean Radio Access Network	pAP	pico Access Point
DCI	Dynamic Control Impact	QoE	Quality of Experience
DSSS	Direct Spread Spectrum Signals	QoS	Quality of Service
EE	Energy Efficiency	RF	Radio Frequency
eNB	evolved Node Base	RL	Reinforcement Learning
FL	Fuzzy Logic	SC	Smart City
GSM	Global System for Mobile communication	SDR	Software Defined Radio
HetNet	Heterogeneous Network	SE	Spectral Efficiency
IoT	Internet of Things	SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
		SNR	Signal to Noise Ratio

SON	Self Organizing Networks	UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UCN	User-Centric Network		
UDH	Ultra Dense Heterogeneous	UPC	Uplink Power Control
UE	User Equipment	UWA	Unified Wireless Architecture
UHM	User Heat Map	UWAN	Unified Wireless Access Network
		VNC	Virtual Network Core

V. СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- [A1] T. Kyoseva, V. Poulkov, M. Mihaylov, A. Mihovska, “Disruptive innovations as a driving force for the change of wireless telecommunication infrastructures”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 78, no. 3, pp. 1683-1697, 2014, DOI: 10.1007/s11277-014-1902-0.
- [A2] O. Asenov, V. Poulkov, “Multimedia and Network Quality of Service”, in *Communications, Navigation, Sensing and Services*, L. P. Ligthart, R. Prasad (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2013, pp. 115-139, ISBN: 978-87-92982-39-1.
- [A3] O. Asenov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, “An Approach to Resource Management in Future Internet”, in *Resource Management in Future Internet*, R. Prasad (Ed.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2015, pp. 185-209, ISBN: 978-87-93102-45-3.
- [A4] P. Koleva, V. Poulkov, O. Asenov, “Resource Management Based on Dynamic Users Association for Future Heterogeneous Telecommunication Access Infrastructures”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 78, no. 3, pp. 1595-1611, 2014, DOI: 10.1007/s11277-014-1911-z.
- [A5] P. Semov, H. Al-Shatri, K. Tonchev, V. Poulkov, A. Klein, “Implementation of Machine Learning for Autonomic Capabilities in Self-Organizing Heterogeneous Networks”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 149-168, 2017, DOI: 10.1007/s11277-016-3843-2.
- [A6] V. Poulkov, “The Wireless Access for Future Smart Cities as a Large Scale Complex Cyber Physical System”, *Springer, Wireless Personal Communications*, pp. 1-15 (First Online: 03 April 2019), 2019, DOI: 10.1007/s11277-019-06343-9.
- [A7] V. Poulkov, “Beyond the Next Generation Access”, in *Wireless World in 2050 and Beyond: A Window into the Future!*, R. Prasad, S. Dixit (Eds.), Springer Series in Wireless Technology, Springer, 2016, pp. 17-39, DOI: 10.1007/978-3-319-42141-4_3.
- [A8] V. Poulkov, “The Unified Wireless Smart Access for Smart Cities in the Context of a Cyber Physical System”, in *Proceedings of Global Wireless Summit (GWS)*, Cape Town, South Africa, 15-18 October 2017, pp. 12-16, DOI: 10.1109/GWS.2017.8300499.
- [A9] A. Manolova, V. Poulkov, K. Tonchev, “Challenges in the Design of Smart Vehicular Cyber Physical Systems with Human in the Loop”, in *Breakthroughs in Smart City Implementation*, L. P. Ligthart, R. Prasad (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2017, pp. 165-186, ISBN: 978-87-99932-72-4.

- [A10] O. Asenov, P. Koleva, V. Poulkov, "Quality Improvement of Generic Services by Applying a Heuristic Approach", in *Convergence of Communications, Navigation, Sensing and Services*, L. Ligthart, R. Prasad (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2014, pp. 91-125, ISBN: 978-87-93102-76-7.
- [A11] V. Poulkov, "Dynamic Access Points Grouping for Mobility Driven User-Centric Wireless Networks", in *Proceedings of Global Wireless Summit (GWS)*, 25-28 November 2018, Chiang Rai, Thailand, Thailand, pp. 110-113, DOI: 10.1109/GWS.2018.8686595.
- [A12] M. Gechev, S. Kasabova, A. Mihovska, V. Poulkov, R. Prasad, "Node Discovery and Interpretation in Unstructured Resource-Constrained Environments", in *Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (Wireless VITAE)*, 11-14 May 2014, Aalborg, Denmark, pp. 1-5, DOI: 10.1109/VITAE.2014.6934457.
- [A13] S. Kasabova, M. Gechev, V. Vasilev, A. Mihovska, V. Poulkov, R. Prasad, "On Modeling the Psychology of Wireless Node Interactions in the Context of Internet of Things", *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 85, no. 1, pp. 101-136, 2015, DOI: 10.1007/s11277-015-2730-6.
- [A14] V. Vasilev, G. Iliev, V. Poulkov, A. Mihovska, "Optimization of Wireless Node Discovery in an IoT Network", in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (Workshop on Optimizing Heterogeneous Networking Technologies for the Internet of Things)*, 6-10 December 2015, pp. 1-5. San Diego, California, USA, DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414153.
- [A15] S. Samal, S. Bandopadhyaya, S. Dora, V. Poulkov, "Coverage Analysis of Heterogeneous Wireless Network with n-Interacted Transmission Nodes", *IGI Global, International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*, vol. 9, no. 4, pp. 49-58, 2017, DOI: 10.4018/IJITN.2017100106.
- [A16] S. Bandopadhyaya, S. Samal, S. Dora, V. Poulkov, "Base Station Transmission Power Optimization in Interference-Limited Cellular Networks for Maximum Energy Efficiency", in *Proceedings of International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, October 2017, Nish, Serbia, pp. 228-231, DOI: 10.1109/TELSIKS.2017.8246269.
- [A17] T. Cooklev, V. Poulkov, I. Iliev, D. Bennett, K. Tonchev, "Enabling RF Data Analytics Services and Applications via Cloudification", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, no. 5-6, pp. 44-55, 2018, DOI: 10.1109/MAES.2018.170108.
- [A18] I. Iliev, B. Bonev, K. Angelov, P. Petkov, V. Poulkov, "Interference Identification based on Long Term Spectrum Monitoring and Cluster Analysis", in *Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Varna, Bulgaria, 6-9 June 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2016.7901562.
- [A19] P. Baltiiski, I. Iliev, B. Kehaiov, V. Poulkov, T. Cooklev, "Long-Term Spectrum Monitoring with Big Data Analysis and Machine Learning for Cloud-Based Radio Access

Networks”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 87, no. 3, pp. 815-835, 2016, DOI: 10.1007/s11277-015-2631-8.

- [A20] A. Ivanov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, “Hybrid Accuracy-Time Trade-off Solution for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks”, *Inderscience Enterprises Ltd., International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, 2019, DOI: 10.1504/IJMNDI.2019.098223.
- [A21] A. Ivanov, A. Mihovska, K. Tonchev, V. Poulkov, “Real-Time Adaptive Spectrum Sensing for Cyclostationary and Energy Detectors”, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, no. 5-6, pp. 20-33, May-June 2018, DOI: 10.1109/MAES.2018.170098.
- [A22] P. Koleva, V. Poulkov, O. Asenov, P. Semov, “Improved Open Loop Power Control for LTE Uplink”, in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Berlin, Germany, 9-11 July 2015, pp. 1-5, DOI: 10.1109/TSP.2015.7296456.
- [A23] P. Semov, P. Koleva, N. Dandanov, V. Poulkov, O. Asenov, “Performance Optimization in Heterogeneous Wireless Access Networks Based on User Heat Maps”, in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Athens, Greece, 4-6 July 2018, pp. 732-736, DOI: 10.1109/TSP.2018.8441319.
- [A24] N. Dandanov, H. Al-Shatri, H., A. Klein, V. Poulkov, “Dynamic self-optimization of the antenna tilt for best trade-off between coverage and capacity in mobile networks”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 251-278, January 2017, DOI: 10.1007/s11277-016-3849-9.
- [A25] V. Poulkov, “Wireless Access Networks in Future Smart Cities and Data Driven Business Opportunities”, in *Towards Future Technologies for Business Ecosystem Innovation*, R. Prasad, L. P. Ligthart (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2018, pp. 21-40, ISBN: 978-87-93609-77-8.
- [A26] H. Gochev, V. Poulkov, G. Iliev, “Improving cell edge throughput for LTE using combined uplink power control”, *Springer, Telecommunication Systems*, vol. 52, no. 3, pp. 1541-1547, March 2013, DOI: 10.1007/s11235-011-9521-5.
- [A27] O. Asenov, P. Koleva, V. Poulkov, “Heuristic Approach to Dynamic Uplink Power Control in LTE”, in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2-4 July 2013, Rome, Italy, pp. 235-238, DOI: 10.1109/TSP.2013.6613927.
- [A28] В. Пулков, „Игрови подход към управление на мощността и координация на смущенията в телекомуникационни мрежи от ново поколение“, *Монография, Издателство на ТУ-София*, 2011, ISBN: 978-954-438-918-5.
- [A29] V. Poulkov, P. Koleva, O. Asenov, G. Iliev, “Combined power and inter-cell interference control for LTE based on role game approach”, *Springer, Telecommunication Systems*, vol. 55, no. 4, pp. 481-489, April 2014, DOI: 10.1007/s11235-013-9803-1.

- [A30] P. Koleva, O. Asenov, G. Iliev, V. Poulkov, "Interference Limited Uplink Power Control Based on a Cognitive Approach", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic, 3-4 July 2012, pp. 242-246, DOI: 10.1109/TSP.2012.6256290.
- [A31] P. Koleva, P. Semov, O. Asenov, V. Poulkov, "Risk Assessment Based LTE HetNet Uplink Power and Interference Control", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic, 9-11 July 2015, pp. 210-214, DOI: 10.1109/TSP.2015.7296254.
- [A32] P. Semov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, "Increasing Throughput and Fairness for Users in Heterogeneous Semi Coordinated Deployments", in *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Istanbul, Turkey, 6-9 April 2014, pp. 40-45, DOI: 10.1109/WCNCW.2014.6934858.
- [A33] P. Semov, P. Koleva, K. Tonchev, V. Poulkov, A. Mihovska, "Autonomous learning model for achieving multi cell load balancing capabilities in HetNet", in *Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Varna, Bulgaria, 6-9 June 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2016.7901602.
- [A34] P. Semov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, "Self-Resource Allocation and Scheduling Challenges for Heterogeneous Networks Deployment", *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 87, no. 3, pp. 759-777, April 2016, DOI: 10.1007/s11277-015-2640-7.
- [A35] P. Semov, A. Mihovska, R. Prasad, V. Poulkov, "Use of positioning information for performance enhancement of uncoordinated heterogeneous network deployment", in *Proceedings of Wireless VITAE*, Atlantic City, NJ, USA, 24-27 June 2013, pp. 1-6, DOI: 10.1109/VITAE.2013.6617069.

VI. ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Thomson Reuters, "The World in 2025: 10 Predictions of Innovation", Technical Report, 2014. [Online]. <https://www.slideshare.net/sustainablebrands/the-world-in-2025-10-predictions-of-innovation>
- [7] M. Maier, "Fiber-Wireless (FiWi) Broadband Access Networks in an Age of Convergence: Past, Present, and Future", *Hindawi Journal, Advances in Optics*, Article ID 945364, June 2014, DOI: 10.1155/2014/945364.
- [8] N. Ghazisaidi and M. Maier, "Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities", *IEEE Network*, vol. 25, no. 1, pp. 36-42, January-February 2011, DOI: 10.1109/MNET.2011.5687951.
- [24] T. Han, G. Mao, Q. Li, L. Wang, and J. Zhang, "Interference Minimization in 5G Heterogeneous Networks", *Springer Journal, Mobile Networks and Applications*, vol. 20, no. 6, pp. 756-762, December 2015, DOI: 10.1007/s11036-014-0564-1.
- [27] T. Han, Y. Yang, X. Ge, and G. Mao, "Mobile converged networks: framework, optimization, and challenges", *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 34-40, December 2014, DOI: 10.1109/MWC.2014.7000969.

- [28] P. Lynggaard and K. E. Skouby, "Deploying 5G-Technologies in Smart City and Smart Home Wireless Sensor Networks with Interferences", *Springer Journal, Wireless Personal Communications*, vol. 81, no. 4, pp. 1399-1413, April 2015, DOI: 10.1007/s11277-015-2480-5.
- [29] A. Cimmino, T. Pecorella, R. Fantacci, F. Granelli, T. F. Rahman, C. Sacchi, C. Carlini, and P. Harsh, "The role of small cell technology in future Smart City applications", *John Wiley & Sons, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 11-20, January 2014, DOI: 10.1002/ett.2766.
- [30] F. Giust, L. Cominardi, and C. J. Bernardos, "Distributed mobility management for future 5G networks: overview and analysis of existing approaches", *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 142-149, January 2015, DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010527.
- [31] X. Ge, J. Ye, Y. Yang, and Q. Li, "User Mobility Evaluation for 5G Small Cell Networks Based on Individual Mobility Model", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 528-541, March 2016, DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525439.
- [32] T. Han, X. Ge, L. Wang, K. S. Kwak, Y. Han, and X. Liu, "5G Converged Cell-Less Communications in Smart Cities", *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 44-50, March 2017, DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600256CM.
- [35] X. Wang, X. Li, and V. C. M. Leung, "Artificial Intelligence-Based Techniques for Emerging Heterogeneous Network: State of the Arts, Opportunities, and Challenges", *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1379-1391, 2015, DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2467174.
- [36] R. Prasad, "Future networks and technologies supporting Innovative communications", in *Proceedings of IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC)*, Beijing, China, 21-23 September 2012, pp. 4-6, DOI: 10.1109/ICNIDC.2012.6418846.
- [37] M. K. Weldon, *The Future X Network: A Bell Labs Perspective*. CRC Press, March 2016, ISBN: 9781498779142.
- [38] H. Gill, "A Continuing Vision: Cyber-Physical Systems", in *Proceedings of Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry*, Pittsburgh, PA, USA, 10-11 March 2008.
- [39] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems", *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, January 2017, DOI: 10.1109/JAS.2017.7510349.
- [40] S. Engell, "Cyber-physical Systems of Systems - Definition and core research and innovation areas", Working Paper of the Support Action CPSoS, October 2014. [Online]. <http://www.cpsos.eu/wp-content/uploads/2015/07/CPSoS-Scope-paper-vOct-26-2014.pdf>
- [75] M. J. Varnamkhasti, "Overview of the Algorithms for Solving the P-Median Facility Location Problems", *Hikari Journal, Advanced Studies in Biology*, vol. 4, no. 2, pp. 49-55, 2012.
- [77] J. E. Beasley, "A note on solving large p-median problems", *Elsevier, European Journal of Operational Research*, vol. 21, no. 2, pp. 270-273, August 1985, DOI: 10.1016/0377-2217(85)90040-2.
- [93] J. M. Gottman, J. D. Murray, C. C. Swanson, R. Tyson, and K. R. Swanson, *The Mathematics of Marriage: Dynamic Nonlinear Models*. A Bradford Book, MIT Press, January 2005, ISBN: 9780262572309.
- [105] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, G. d. l. Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek, and J. Zhang, "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 22-30, June 2011, DOI: 10.1109/MWC.2011.5876497.
- [129] H. Hu, Y. Wen, T.-S. Chua, and X. Li, "Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial", *IEEE Access*, vol. 2, pp. 652-687, June 2014, DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2332453.

- [193] S. Deb and P. Monogioudis, "Learning-Based Uplink Interference Management in 4G LTE Cellular Systems", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, no. 2, pp. 398-411, April 2015, DOI: 10.1109/TNET.2014.2300448.
- [194] M. Bennis and D. Niyato, "A Q-learning based approach to interference avoidance in self-organized femtocell networks", in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops*, Miami, FL, USA, 6-10 December 2010, pp. 706-710, DOI: 10.1109/GLOCOMW.2010.5700414.
- [195] A. Alsarhan and A. Agarwal, "Spectrum sharing in multi-service cognitive network using reinforcement learning", in *Proceedings of First UK-India International Workshop on Cognitive Wireless Systems (UKIWCWS)*, New Delhi, India, 10-12 December 2009, pp. 1-5, DOI: 10.1109/UKIWCWS.2009.5749427.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS
DEPARTMENT "COMMUNICATION NETWORKS"

Prof. Vladimir Poulkov, Ph.D.

**UBIQUITOUS CONNECTIVITY AND EFFECTIVE RESOURCE MANAGEMENT
APPROACH IN USER-CENTRIC ULTRA-DENSE UNIFIED WIRELESS ACCESS
NETWORKS**

ABSTRACT of D.Sc. THESIS

The topic of this dissertation is related to the proposal and development of approaches related to ensuring ubiquitous connectivity and efficient resource management in user-centric ultra-dense unified wireless access scenarios. Due to the rapid development of digital and ICT technologies, convergence of communication networks such type of access networks are expected to evolve in future Smart Cities. The will be characterized by a dense distribution and variety of users (human and machine) with high mobility and heterogeneity of densely deployed access points. In this aspect the dissertation proposes novel approaches, the implementation of which will provide ubiquitous access and connectivity to such types of users, as well as the efficient use and management of the limited communication resources in the access points. The application of such approaches is expected to provide a visible "endless capacity" to the users irrespective of their type, number in unit area and their dynamics. The dissertation introduces a new concept and structural approach to modeling such future access networks as large scale Cyber Physical Wireless Access System (CPWAS). For the provision of user-centric access in CPWAS heuristic approaches and algorithms for dynamic user association and access point grouping are proposed. The introduction of RF data analytics, along with examples of the results from its practical implementation, is a new approach that can enhance the efficient utilization of the most expensive and limited wireless access resource - the radio frequency spectrum. Cognitive radio and coverage optimization approaches for more efficient spectrum utilization are also considered. For efficient resource management is such future access networks new approaches to ensuring ubiquitous connectivity and efficient resource utilization based on the joint implementation of role-game theoretic and machine learning approaches are proposed. Generalizing, the goal of the thesis could be formulated in the aspect of *"Provision of novel approaches for the implementation of access networks in the future that will meet the users' ubiquitous and unlimited connectivity requirements. Such approaches should allow the implementation of methods for utilization and management of the limited communication resources in User-Centric Ultra-Dense Wireless Access through which a visible "endless capacity" to the users, regardless of their type, number of unit area and their mobility could be provided."*



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS
DEPARTMENT “COMMUNICATION NETWORKS”

Prof. Eng. Vladimir Kostadinov Poulkov, Ph.D.

**UBIQUITOUS CONNECTIVITY AND EFFECTIVE
RESOURCE MANAGEMENT APPROACH IN
USER-CENTRIC ULTRA-DENSE UNIFIED
WIRELESS ACCESS NETWORKS**

EXTENDED ABSTRACT
of
DISSERTATION

FOR AWARDING THE SCIENTIFIC DEGREE
„DOCTOR OF SCIENCE”

Area of Science: 5. Technical Sciences

Professional Field: 5.3 Communications and Computer Engineering

Specialty: Communication Networks and Systems

Sofia, 2019

The dissertation was approved for public defence at the regular session held on 03.06.2019 of the council of the Department of Communication Networks at the Faculty of Telecommunications of the Technical University of Sofia (Protocol №11).

Dissertation Data:

Number of Pages:	193
Number of Figures:	82
Number of Tables:	12
Number of Equations:	80
Number of References:	218
Number of Author's Publications on the Topic of the Dissertation:	35

The public defense of the dissertation will be on the 03.10.2019, starting 13.00h, at the conference hall of the Library and Information Center of the Technical University of Sofia according to order № ОЖ-5.3-58/12.06.2019 of the Rector of the Technical University of Sofia, at an open public council of the scientific jury composed as follows:

1. Prof. Eng. Ognian Boumbarov, Ph.D. – Chairman
2. Assoc. Prof. Eng. Kamelia Nikolova, Ph.D. – Scientific secretary
3. Prof. Eng. Milena Lazarova – Mitseva, Ph.D.
4. Prof. Eng. Mihail Iliev, D.Sc.
5. Prof. Eng. Raycho Ilarionov, D.Sc.
6. Prof. Eng. Borislav Bedzhev, D.Sc.
7. Assoc. Prof. Eng. Ognyan Fetfov, Ph.D.

Reviewers:

1. Prof. Eng. Milena Lazarova – Mitseva, Ph.D.
2. Prof. Eng. Mihail Iliev, D.Sc.
3. Assoc. Prof. Eng. Kamelia Nikolova, Ph.D.

The documentation related to the defense is available for all interested at the office of the faculty of Telecommunications, Building 1, Room 1439-b and at the internet page of the Technical University of Sofia. The results of the research are published by the author.

Author: Prof. Eng. Vladimir Kostadinov Poulkov, Ph.D.

Title: Ubiquitous connectivity and effective resource management approach in user-centric ultra-dense unified wireless access networks

Printed copies: 20 pcs

Printed at the Publishing and Printing House of the Technical University of Sofia

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

Topicality of the problem

The rapid progress and the evolution of telecommunication technologies lead the world to a fully networked society where the access to communication resources and the exchange of information will be possible everywhere and at any time by anyone or everything. *"From the smallest personal belongings to the major continents, everything will be digitally connected and will respond to what we want and like" [1].* Today's vision for the future access network implies that access technologies will maintain connectivity between people, machines, devices, and a diverse range of everything else that can be connected. Even today, however, the huge increase of the multimedia traffic caused by the growing number of applications, social networking, online gaming, etc., along with the new types of communication technologies imposed by the Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) communications, causes problems and challenges affecting the access to the network, the connectivity and the ability to transmit and process large volumes of data generated by end users and devices. In order to be able to address these challenges, to make possible the management of all these connected things and meet the increasing traffic requirements, the future generation of Access Networks (ANs) will have to introduce new functionalities and maintain a much wider range of services. Future ANs, especially those in Smart Cities (SCs), will also impose new requirements on the way the access to the network is realized, as they are expected to be very dynamic in nature and with a very dense user and Access Point (AP) distribution. In relation to all this, the issue of providing ubiquitous connectivity and efficient resource management in user-centric ultra-dense wireless ANs is very topical.

Goal of the dissertation, basic tasks and research methods

The goal of the dissertation is formulated as follows: *To introduce novel approaches for the realization of future Access Networks that will meet the requirements for ubiquitous access and user connectivity, and will allow the implementation of such methods of utilization and management of the limited communication resources in the wireless access, through which an "apparent to the user unlimited capacity" will be provided, regardless of their type, number per unit area and mobility.* The dissertation thesis puts forward several tasks to be solved, the main ones being related to the provision of new approaches for association, grouping and co-operative communication of users and APs, thus providing seamless, ubiquitous and instant connectivity and robust handover procedures. Necessary conditions for this are the introduction of innovative approaches for collecting, processing and analyzing sensor and monitoring data in order to allow contextualization of the wireless access and the proposition of resource sharing and resource management algorithms, based on cognition and intelligence, to allow the effective use of the wireless interfaces.

Methodological basis

The methodology of research in the dissertation includes the use of analytical, statistical, simulation approaches and Big Data (BD) analytics. The analysis of the development of the ANs and the AN modeling concept from a Cyber-Physical System (CPS) perspective is based on this methodology, including the proposed generalized approach and related methods for providing ubiquitous connectivity and efficient resource management in user-centric, ultra-dense unified wireless ANs.

Scientific novelty

The dissertation proposes new approaches, the implementation of which will provide ubiquitous user access and connectivity as well as efficient utilization and management of the limited communication resources in ANs, through which an “apparent to the user unlimited capacity” could be provided to the users irrespective of their type, number in unit area and dynamics. The approach to modeling the AN as a Cyber Physical Wireless Access System (CPWAS) and its structural concept is not found in the literature up to now. The proposed heuristic approaches and algorithms for APs grouping and dynamic user association is a novelty in the methods for realization of user-centric access. The introduction of the specific area of Radio Frequency (RF) Data Analytics, along with examples of its practical implementation, is a new approach to the application of radio spectrum analysis for more efficient utilization. Novel is also the proposed approach to ensuring ubiquitous connectivity and efficient resource management in user-centric ultra-dense unified wireless ANs, based on the joint implementation of Game Theory and Machine Learning (ML).

Practical applicability

All methods and models developed in the dissertation are validated by simulation experiments or by analyzing the results from their practical implementation and testing. This provides the opportunity the application of the results of this dissertation in practice to be straightforward and easy. The proposed methods and models are compared to others that have similar functionalities and/or features, and with similar goals in terms of achieving better performance.

Publication of the results of the research

The analysis, the proposed approaches and the results are presented in *35 author's publications* in the period 2012 to 2019, as follows:

- *Six author's publications*, including *one monography* [A28], *two book chapters* [A7], [A25], *two international conference papers* [A8], [A11] and *one impact factor journal publication* [A6].
- *The rest 29 publications are co-authored*, including *12 international conference papers*, *4 book chapters*, *13 international journal papers*, of which *11 are with impact factor and/or impact rang*.

All publications except the monography are indexed in *SCOPUS and/or WoS*.

In order to analyze and evaluate the publicity of the proposed dissertation thesis, it could be noted that by May 2019, *42 citations of the author's publications* are in *SCOPUS*. Citations in other databases are available (such as *WoS*, *Google Scholar*, *internet*, etc.).

Structure of the dissertation

The dissertation has **193 pages** including introduction, four chapters and conclusion; lists of figures, tables, abbreviations, author's publications and references. The thesis contains **82 figures**, **12 tables**, **80 mathematical expressions**, **218 references**. The numbers of the figures and the tables in this extended abstract correspond to those in the dissertation.

Chapter 1 analyzes the development of ANs and proposes the concept of evolution of the ANs to networks based on a unified wireless access (UWA). Such access will be characterized by flexible user association schemes ; approaches for cooperative communication of groups of User Equipment (UE) and APs; innovative approaches to resource sharing and resource management; intelligence based on the collection, merging and processing of sensor, monitoring, and other types of data. All this, along with the application of ML and Artificial Intelligence (AI) algorithms will allow the implementation of 3S (Self- configuration, Self-organization and Self-optimization), functionalities, state prognosis, adaptation and evolution of the AN. Based on a comparative analysis of the characteristics and functionality of such UWA with those of a CPS, the vision of their functioning and modeling as CPWAS is proposed. As a result, the main tasks of the dissertation are formulated, related to the proposition of: *new schemes for association, grouping and cooperative communication of users and APs; new approaches to collecting, processing and analyzing RF data and contextualizing of the wireless access; methods of efficient resource sharing and resource management.*

Chapter 2 proposes approaches for associating, grouping, and cooperative user and APs communications to provide seamless, ubiquitous and uninterrupted connectivity to different types of UEs in CPWAS. They are based on methods of proactive connectivity management and APs grouping and are implemented through heuristic algorithms with low computational complexity and simplified analytical calculations. Based on these approaches, CPWAS through the Access Network Operating System (ANOS) will be able to organize dynamic groups of APs for the introduction of user-centric functionalities. For the implementation of association, grouping and cooperative communication schemes in CPWAS, two mandatory functionalities are proposed: *intelligent monitoring and analysis of RF data and efficient organization and management of resources.*

In Chapter 3 are proposed approaches to the practical implementation in data cloud structures of RF data processing and analysis, contextualization and prediction of user behavior. The concept of "*RF analytics*" is introduced, reflecting the processing, analysis and extraction of knowledge from large volumes of RF data. For the practical implementation of adaptive spectrum monitoring approaches a platform is proposed allowing connection of different types of RF clients. An approach for user mobility, activity and distribution prediction is proposed based on *User Heat Maps* (UHMs). The application of RF analytics and user behavior prediction are essential prerequisites for the realization of the basic functionalities necessary to be implemented in CPWAS.

Chapter 4 proposes approaches for efficient resource management and the realization of 3S functionalities in ANOS, with low computational complexity. For resource management, two approaches are proposed: a role game approach providing trade-off between UEs Quality of Service (QoS) and easy CPWAS administration; and an approach based on risk prevention and management for effective APs resource utilization. For the implementation of 3S functionalities, ML algorithms and a combined algorithm combining Q-learning and Game Theory are proposed.

II. CONTENTS OF THE DISSERTATION

CHAPTER 1. Access Networks with Unified Cell-less Architecture

In this chapter the development of wireless Access Networks (ANs) towards Heterogeneous Networks (HetNets) and the emergence of ANs with ultra-high density and heterogeneity are discussed. The emergence of new network architectures, based on new approaches to servicing the users, converged cell-less networks, as well as the prerequisites for the emergence of a unified cell-less access architecture are justified. A model of a unified wireless access network is proposed from the point of view of a large-scale Cyber Physical System (CPS).

1.1. Development of the wireless ANs

At a certain stage in the development of mobile communications it will no longer be possible to increase the channel throughput due to the theoretically possible limits and bandwidth limitations. In these cases, the only possibility is to increase the bandwidth and/or to move to higher operating frequencies and higher density of placement of the Base Stations (BSs) and Access Points (APs). Therefore, in the future, the major innovations in this area are expected to be aimed at reducing the cost per one bit of transmitted information and energy costs per bit. This can be done mainly by changing the cellular infrastructure, introducing innovative approaches to sharing the radio spectrum and air interfaces, effective utilization and management of resources.

1.1.1. Convergence of fixed and mobile ANs

This convergence is in practice an integration of wireless and fixed networks for provision of different kinds of broadband services, including voice, video and multimedia. Such scenarios are already being implemented in practice since they not only provide a variety of services to end-users but also give a wide range of benefits to service providers and operators. Such hybrid architectures are considered to be the cornerstone of future ANs and will be based on the integration of Next-Generation Passive Optical Network (NG-PON) with Long Term Evolution Advanced (LTE-A), 5th Generation HetNets, or Centralized, Collaborative, Cloud and Clean Radio Access Networks (C-RAN) [7, 8].

1.1.2. Distributed and hierarchical converged HetNets

Besides the convergence of fixed and mobile networks, today the trend in wireless ANs is the implementation of distributed and hierarchical HetNets. The introduction of the HetNets concept, including coordinated macro and pico or even nano coverage, is considered as a means to improve the capacity and throughput of the ANs. However, these networks are characterized by drawbacks related to the delivered to the end-users QoS and Quality of Experience (QoE) (especially for fast moving users) due to the fact that in complex electromagnetic environments such as those in a Smart City (SC), the high density of installed BSs/APs can cause highly correlated noise or interferences that will worsen the QoS on neighboring BSs/APs [24]. This section outlines some of the drawbacks of converging HetNets, noting that they can be overcome by introducing intelligent resource management approaches and by the deployment of new AN architectures based on the principles of virtualization and shared resource utilization.

1.2. ANs with ultra-high density and heterogeneity

A specific feature of future ANs is the availability of different types of users (human and machine) with high dynamics and diversity in terms of mobility and services. A typical scenario of such Ultra Dense Heterogeneous (UDH) networks, from both user and network aspects, are the ANs in the future SCs.

1.2.1. Challenges with the implementation of UDH access networks in SCs

The immediate implementation and interconnection of different types of HetNets into a common communications infrastructure will not be able to support the ubiquitous information services in future SCs [27]. For SCs, instead of such a direct interconnection of HetNets, a new converged network architecture based on heterogeneous wireless networks and different transmission technologies has to be proposed [28, 29]. The essential technological features of wireless ANs in SCs are related to a transformation of the network based on:

- ✓ massive ultra-dense networks and cell size reduction to make use of the frequencies above 6GHz to meet future traffic demands and achieve maximum network energy efficiency;
- ✓ integration of multiple wireless access technologies and implementation of sophisticated transmission techniques such as: massive Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO), beamforming, coordinated transmissions, etc., which will enable efficient allocation of the air interface wireless resources (power, time, bandwidth, frequency, space);
- ✓ intelligent resource management such as: real-time intelligent control and utilization of the wireless resources, based on: antenna muting, sleep modes, energy optimized mixed transmission rates, dynamic routing, topology optimizations, etc.;
- ✓ novel interference management and energy efficient approaches, such as: interference alignment, sophisticated power control, off the grid power, energy harvesting, etc.;
- ✓ inclusion of ultra-narrowband and short-burst (sporadic) communications, for Machine-to-Machine (M2M) applications with minimal energy consumption, and device battery life in excess of 10 years.

The implementation these technological features will impose many issues and challenges, that could also act as disruptive factors and/or driving forces in the realization of the wireless AN in a SC [A1]. Some of these are:

- ✓ The ultra-dense deployment of different technologies and types of Access Points (APs) for ensuring higher data rates and ubiquitous information services will bring up issues with the resource management and provision of the required network QoS when transmitting uplink and downlink streaming multimedia traffic [A2], [A3].
- ✓ The more complex and volatile mobility scenarios will raise complicated handover and load balancing issues [29, 30].
- ✓ The variety and increased complexity of the wireless channels in the millimeter-wave transmission due to many obstacles causing diffraction, in addition to the complicated SC electromagnetic environments, will cause severe interference and power control issues [24].

- ✓ The large number and variety of users, Internet of Things (IoT) and M2M applications and emergence of a new class of control systems (requiring ultra-low-latency communications), such as remote controlled autonomous vehicles, will bring up delay and latency issues due to saturation of the spectrum and its utilization.
- ✓ The traffic load in SCs will fluctuate in space and over time. The fluctuation of the traffic load in the spatial domain will be due to the stochastic spatial distribution of APs in SC. Fluctuations in traffic over time will result from user mobility, depending on work and lifestyle in SCs [31].

1.3. Convergent cell-less networks

For these challenges to be handled and for the realization of an effective UDH access, new network architectures based on novel approaches for serving the users have to be proposed. In general, they have to implement simple user association schemes with the goal of 1:1 type of service (one AP serves one user), grouping of active mobile terminals for cooperation, mobility prediction, and flexible solutions in coverage and energy efficiency. New and innovative approaches are already being considered for SCs, such as the introduction of ultra-dense HetNets and converged cell-less networks to handle some of the a.m. challenges. The idea behind these is to practically implement novel user association schemes and/or converged cell-less scenarios, as for example are the ones proposed in [A4] and [32].

1.3.1. Challenges with the convergent cell-less ANs

Cell-less communications can provide flexible solutions to ensure coverage and energy efficiency in future SCs, i.e. they can solve the heterogeneous problems at the physical level. But in order the benefits of cell-less communications to be realized, cloud computing and data processing are expected to collaborate with and become part of the cell-less infrastructure. The cell-less telecommunication access approach can solve some of the challenges related to the physical level, but for the goal of performance optimization, user cooperation, mobility prediction and the implementation of flexible solutions in coverage and energy efficiency, intelligence has to be implemented overall in the cloud-based infrastructure of the network [27]. Bringing intelligence in HetNets is not a new topic and many Artificial Intelligence (AI) based techniques have already been proposed for realization of autonomic management capabilities, such as self-configuration, self-organization and self-optimization (3S) of HetNets [35], [A5]. The tendencies towards Self Organizing Networks (SON) is one step forward to a novel approach towards incorporating intelligence in the network, which will have influence also on the way the networks are accessed.

Such intelligence can only be implemented if a proper analysis of the different types of data observed and stored in the AN cloud is possible to be performed. The data will be gathered from both the monitoring of the physical environment and the user behavior, as well as from the AN's Operation, Administration & Maintenance (OAM) system. This will require the implementation of a subscriber access infrastructure with a wide range of sensing capabilities and storage conditions for big data. Figure 1.5 illustrates the variety of wireless nodes, different types of users and sensors in the infrastructure of an AN in a future SC [A6].

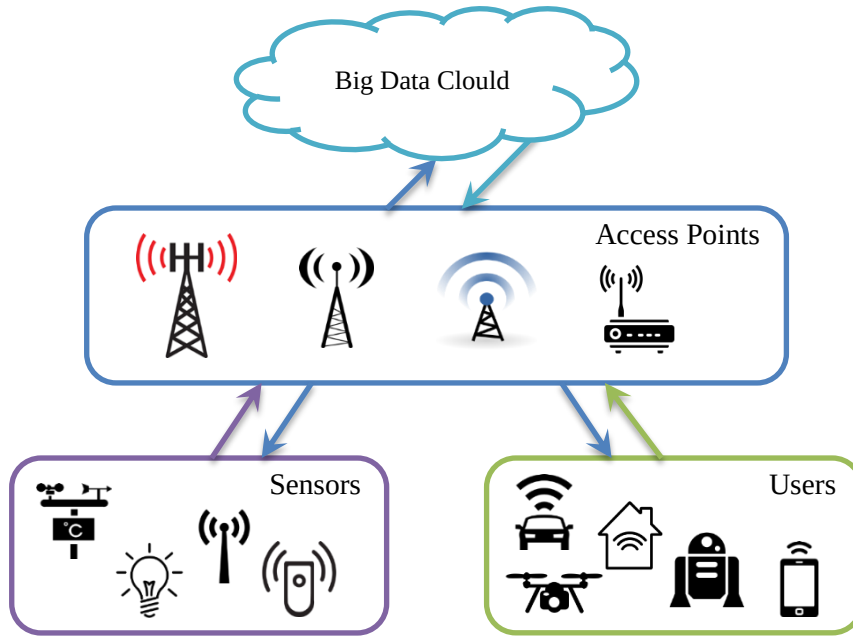


Fig. 1.5 Elements of the infrastructure of the AN in a SC [A6]

1.4. The cell-less unified access architecture

Given the challenges for cell-less networks in terms of grouping, cooperation, convergence of information and communication infrastructure, intelligence, etc., it can be argued that in future SCs ANs will evolve towards the realization of a cell-less and Unified Wireless Architecture (UWA). The argument for this assumption is set out below, based on what has been described in the previous points regarding the convergence of HetNets and converged cell-less networks and taking into account the perspectives for development of the ANs outlined in [A6], [A7], [36, 37].

1.4.1. Basic prerequisites for the emergence of UWA

The development of information and communication technologies and networks is changing the way we interact among each other and with the surrounding environment, and is taking us into an era of communication with anyone and/or anything, and accessible by anyone and/or anything. A new digital existence is appearing, *“one in which we are always connected and can communicate with any system, device or person, allowing continuous and perpetual augmentation of our lives”* [36]. This means to say that *hyper-connectivity* will be one major symptom of the access network in SCs. Hyper-connected telecommunication infrastructures and networks will be the *“single, most indispensable element of binding humans and individual societies, industries, economies, and humans, building an infrastructure of large-scale, complex and highly networked systems whose efficiency, sustainability and protection would require intelligent, interoperable and secure ICT solutions and novel business models”* [36]. From the user perspective, this means that the user (human and machine) will be able to connect to the network from anywhere and at any time (not depending on the underlying AN) and utilize the apparent “infinite capacity” provided through the effective utilization of the telecommunication access infrastructure due to implementation of shared, flexible and reliable solutions.

1.4.2. Basic characteristics of the ANs in future SCs

This section discusses and summarizes the characteristics of ANs from the following main aspects: *distribution of the access, access to resources, network intelligence, and user behavior*. The concept of a Unified Wireless Access Network (UWAN) is presented in Figure 1.6 [A6], [A8].

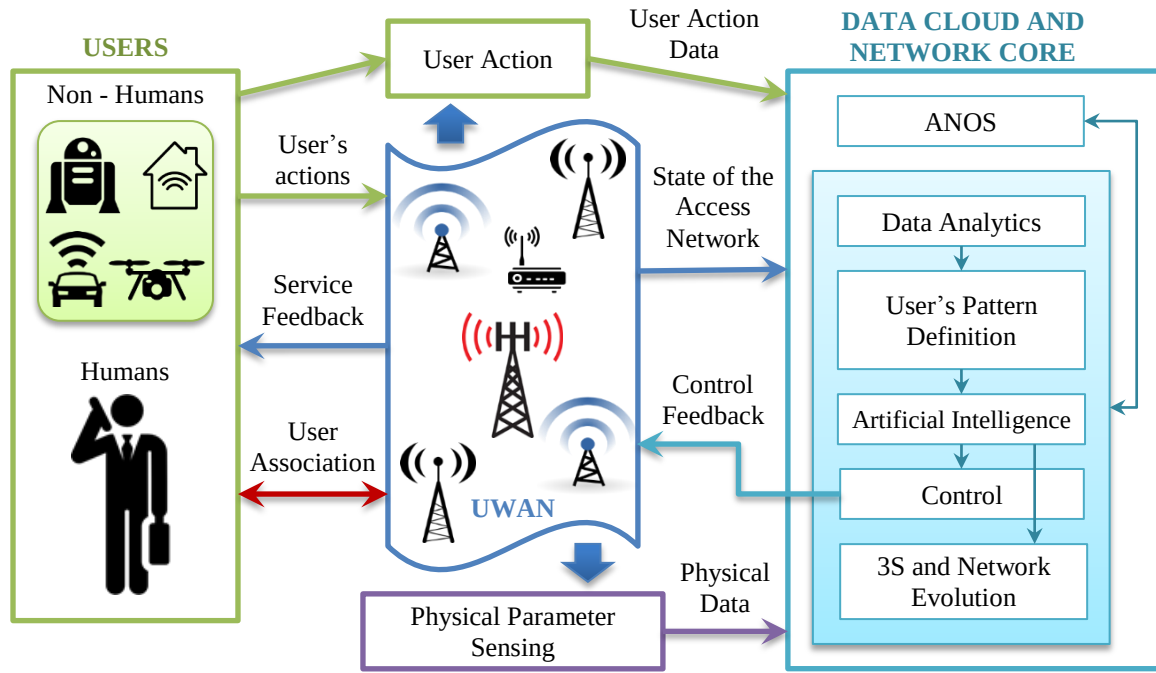


Fig. 1.6 Structure of the UWAN Architecture [A6], [A8]

The users' (human and non-human) actions, related to their behavior (mobility, connectivity, requirements, generated traffic, etc.), are monitored via a User Action monitoring block collecting information from the User Equipment (UE) and the UWAN. The resulting user data is sent to the Virtual Network Core (VNC). In the VNC the Access Network Operating System (ANOS) and other functionalities related to the intelligence of the network are implemented. To fully utilize the intelligence of the network the VNC receives data from monitoring of the overall operational state of the UWA network and other physical parameters (environmental, channel conditions, spectrum utilization, interference, etc.). Based on AI and 'big data' analytics actions are generated. Through respective feedback loops the operational state of the network is controlled, the User-to-AN association functionality realized and the required service provided to the users. The 3S and network evolution features are implemented in the VNC. Due to virtualization and unification of the access, adaptation to an ever-changing physical environment and stochastic user behavior will be possible so that the system to be able to implement the concept of "hyper-connectivity".

1.5. UWAN as a cyber-physical system

1.5.1. Basic characteristics of cyber-physical systems

In this point the definition and features of a typical Cyber Physical System (CPS) are considered, including its physical components, sensors, computing devices, and a communications network, all these enabling the physical world to be monitored, controlled and influenced based on embedded intelligence, with the goal to adapt, organize and evolve the system. An up-to-date definition connecting the IoT with CPS is given in [39]: "CPSs are systems featuring a tight combination of, and coordination between network systems and physical systems. By organic integration and in-depth collaboration of computation, communications and control (3C) technology, they can realize the real-time sensing, dynamic control and information services of large engineering systems."

1.5.2. UWAN as a cyber-physical access system

Considering the CPS definitions given in [38, 39, 40] and the previous paragraph, it is worth noting that the main CPS features can be attributed to the UWAN elements and interactions from Figure 1.6, for example: input and possible feedback from and to the physical environment; distributed management and control; requirements for real-time operation; geographic distribution of the infrastructure; multi-level structures and management features such as those of a system buildup of multiple systems; ability to dynamically reconfigure the entire system over time; continuous system development during operation; opportunity for emerging behavior. In the same way as CPS, a UWAN must also be able to tolerate failures and faults, noise, insecurity, inaccuracy, security attacks, lack of perfect synchronization, scalability, openness, increasing complexity, heterogeneity and disconnections. Some of these questions are related to people as users in such a CPS. As noted, in a CPS, a person, whether part of the chain or center, will bring uncertainty and unpredictability to the system, and these problems could be solved by introducing intelligence in CPS that will allow operation in dynamically changing conditions and will enable the system to adapt and evolve. Summing up everything mentioned above, UWAN can be perceived as CPS with a control feedback and users that introduce stochasticity into the loop of the system. By measuring user actions, monitoring environmental parameters and physical (related to the communication channel) parameters, applying data analytics methods to detect patterns of user behavior and habits, and based on the implementation of solutions based on AI, this type of *Cyber Physical Wireless Access System (CPWAS)* can overcome stochasticity in its loop and provide all requested services to its users. The ability of this CPWAS to analyze and bring up knowledge about user behavior, actions and preferences will be crucial to enabling automated and intelligent control over connectivity and service delivery, contextualization of the wireless access, and ultimately for achieving the goals and realization of the concept of hyper-connectivity in SCs.

Figure 1.6 can be the basis for defining models of such a CPWAS that reflect its basic parameters and functional relationships in order to analyze and optimize its performance. The models should include the parameters of user activity and physical environment, VNC and computational components, control feedback, and the corresponding interfaces between them. The sources of stochasticity and non-determinism in these models will be related to user mobility and behavior, the physical environment, the variation of wireless channel parameters (interference, latency, delay jitter, packet loss, etc.). In this case, some of the basic approaches to modeling CPS can be used.

An appropriate connectivity model or principle of associating a user to one AP in a CPWAS should be based on algorithms of low computational complexity, providing seamless, ubiquitous, instantaneous connectivity and robust handover procedures. Even when implementing UWAN in a future SC, APs will have limited service capability and the possibility to process in real time the user requests for service. Delay in responding to such requests is unacceptable for a complex environment such as that in SCs with different types of users - human and machine. As noted in the previous sections, connecting of a user with an AP in real-time and seamless handover from one AP to another is mandatory, which means that CPWAS should function as a system without queues and blocking. In addition, CPWAS is expected to have the necessary management and function in such a way that it can provide alternatives to associating users to two or more APs. All this implies that such a system needs to implement efficient and dynamic mechanisms for user association and resource management. The implementation of dynamic association schemes for one or a group of users to one or more APs as well as effective CPWAS resource allocation and management

schemes can be based on defining various utility functions for different system parameters. They can be considered static - depending on the wireless access infrastructure, or dynamic - related to the communication profile of users (human and machine) requesting service. Such utility functions can be used to achieve an Optimum Level of Performance (OPL) of the CPWAS that can be described as a target function in the following way:

$$OPL = func \left\{ UET_i, \sum_{j=1}^k UEA_j, UELoc_i, MAX[uf_i(ST_i, p_i, P_n)] \right\} \quad (1.1)$$

where UET_i refers to the type of user i , $\sum UEA_j$ to user activity, $UELoc_i$ is the user location with respect to the available APs, uf_i is a function of utility, required by user i , ST_i is the type of service (voice, data, text, image, video), p_i are the dynamic parameters such as the current channel state, user mobility, etc., and P_n are static parameters depending on the specific AN infrastructure.

This approach describes the performance of the CPWAS as a continuous process with discrete control impacts based on user types and values of the utility functions. This principle will allow the use of predictive data analytics to ease the decision-making process. The input information for determining a new state of the system is related to the feedback from monitoring the physical environment and user behavior. As a consequence, the control impact will result from the optimization procedure of the target function (1.1), i.e. *"serving the user requests for association with equal or better than requested QoS, while minimizing the use of the AP resources"*.

1.6. Conclusion

Based on the analysis of the development of Next Generation Access (NGA) networks and considering the dynamic communication scenarios in a SC, it is concluded that the access to resources in future SCs will be characterized with ultra-high density of APs, high heterogeneity and mobility of users, and that practically it will be realized by evolved converged cell-less ANs. The concept of the structure and functionality of an AN, called Unified Wireless Access (UWA), is presented in this dissertation thesis. Unlike conventional cellular network architectures, in an UWAN architecture, it will be possible to develop and implement features and functionalities such as:

- ✓ flexible schemes for mobile user association and approaches for the connection of cooperative groups of users and APs;
- ✓ innovative resource sharing and resource management approaches, advanced transmission methods (such as: massive MIMO, beamforming, coordinated transmission, etc.) and intelligent real-time management;
- ✓ AN intelligence, based on the collection and merging of sensor, monitoring and OAM data, processing and analysis of Big Data (BD), and application of ML algorithms, AI, etc.;
- ✓ development and integration of reliable and accurate techniques for modeling and predicting user behavior by measuring user actions, monitoring environmental parameters and physical (communication channel) parameters, analysis of BD for detection of models and correlations.

1.7. Tasks of the dissertation

Based on all presented in this chapter and the proposed model of AN as a CPWAS, the dissertation has the following main tasks:

1. To propose new schemes for association, grouping and cooperative communication of users and APs in CPWAS. These schemes should take into consideration the spatial distribution of users and APs and the wireless channel conditions. The schemes should be based on algorithms with low computational complexity, providing seamless, ubiquitous, instantaneous connectivity and robust handover procedures.
2. To propose approaches for collecting, processing and analyzing sensor and monitoring data that along with the application of modeling and predictive techniques for user behavior and AI algorithms will allow contextualization of the wireless access, state prediction, adaptation, and evolution of CPWAS.
3. To propose resource sharing and resource management methods that will allow effective use of the wireless air interface resources, based on the introduction of cognitive features and intelligence in CPWAS, with regard to ensuring ubiquitous connectivity and required capacity, i.e. the implementation of the concept of hyper-connectivity.

1.8. Contributions to Chapter 1

1. An analysis of the development of the ANs has been made based on which reasoned conclusions are drawn about the impossibility of the NGA based on HetNets and 5G wireless networks to meet the requirements imposed by a hyperlinked, diverse, and dynamic access scenario such as is the one in a SC of the future.
2. The major characteristics of the AN in future SCs are defined, based on which the concept of the structure and functionality of the AN and its evolution towards the so-called cell-less Unified Wireless Access (UWA) is introduced.
3. Based on a comparative assessment of the characteristics and functionality of the UWA with those of a large scale CPS, a new approach to modeling and analyzing the performance of such access architecture, called CPWAS, is proposed. The approach follows the concepts of building and operation of large scale CPS.

CHAPTER 2. Association, Grouping and Cooperative Communication Schemes in CPWAS with Low Computational Complexity

CPWAS, as a service system, should provide the ability to track the current number of requests and redistribute the load (dynamic association) with respect to the number of active service elements, i.e. APs. In CPWAS, this will be one of the basic functions set up in ANOS to provide service to any user request without waiting (without blocking). This chapter proposes a solution to the problem of dynamic connectivity management, on one hand, based on new approaches and user association schemes and grouping of APs, and on the other on the basis of approaches for the implementation of cooperative work of groups of APs in order to ensure the necessary coverage and

provide uninterrupted connectivity to users. These schemes are based on proactively managing and dynamically connecting APs to a set of user requests for association and methods for APs grouping, and are implemented through heuristic algorithms with low computational complexity and analytical approaches that can provide seamless, ubiquitous, instantaneous and uninterrupted connectivity in CPWAS.

2.1. Heuristic approaches and algorithms for dynamic user association and APs grouping

The basic idea of the methods for dynamic user association is based on the assumption that it is possible to adapt the architecture of the system through a Dynamic Control Impact (DCI). The purpose of DCI is to provide service without buffering all user requests within one final time slot [A10]. The starting point for developing the dynamic association model is based on graph theory, and CPWAS is considered as a weighted non-directional graph. To implement the association model in real time, it is necessary to develop a new and/or modify an existing algorithm combining the advantages of *Heuristic Concentration, Linear Programming, and Graph Theory* [75].

2.1.1. Characteristic model of the servicing properties of the APs

By dynamically associating APs to a number of user service requests, the "ideal" DCI is the one that will provide such a CPWAS architectural profile within each time slot, so that each request will be associated for service to an AP which has equal or greater free capacity than the rate of requests for association. The "1:1" service model is the closest to this "ideal" architectural profile, i.e. the number of APs is equal to or greater than the maximum number of active user association requests. In defining such a model, it is assumed that for each AP, at least two basic properties can be inferred, representing the dynamic association process with proactive control with DCI [A4]:

- ✓ *attraction rate* - the longest distance from which an AP can provide service to a user. This property is related to *the ability to associate a user*;
- ✓ *saturation rate* - the maximum number of user requests with a given QoS that an AP can serve without queuing. This property is related to *the capacity of an AP to provide service to user requests*.

By using such a model of representation of the APs properties, it is possible to solve the following task: *With a previously known user set and topology, as well as the nature and parameters of the association requests, an effective service system structure to be defined*. In this regard, the CPWAS architecture with the corresponding APs must be dynamically controlled in such a way that within each time slot the system is configured to ensure the condition of effective management of the CPWAS, i.e. *seamless and ubiquitous service of all user association requests and service provision with the required QoS through the optimal utilization of the resources of each AP*.

2.1.2. Dynamic user association and APs grouping model

The model that is proposed is based on the two basic properties of APs already defined, the *attraction rate* and the *saturation rate*. In the model, the *attraction rate* is represented by a "Weight Matrix" using the graph theory. The weight of each arc is calculated in the same metric in which the *attraction rate* is measured. Thus, based on a "Weight Matrix", an assessment is made of the service area boundaries of each AP. In the model, the *saturation rate* is represented by a "weight matrix of the graph nodes" describing CPWAS. The weight of each node is a positive number corresponding

to the *saturation rate* of the AP (in the appropriate metric of capacity, bandwidth or other applicable measure of the quantitative limit of the resources provided) or is zero if the node represents a user generating a request for association and service. Thus, the model defines two types of nodes - served (users) and serving (APs) represented respectively with a zero and non-zero value of the *saturation rate*. To form the *Weight Matrix*, it is necessary to define an objective function that reflects the specifics of the CPWAS operation as a connectivity provisioning system.

The variable in the model and respectively its formal representation as a linear programming task is the "*Association Table*" or "*Association Matrix*". The *Association Matrix* A is a 2-dimensional matrix of $N \times M$ size, where N is the number of served nodes (users) in the graph, and M is the number of nodes providing service (APs). The *Association Matrix* needs to be compiled in such a way as to provide unambiguous and up-to-date information which AP will service the requests of each one of the users within the next time slot. From a practical point of view, the *Association Matrix* is the physical expression of the DCI, and in each time slot this matrix is updated.

The key element of the dynamic association and grouping model is the definition of the *objective function* and the *corresponding optimization task*.

Objective function for dynamic user association and APs grouping

The objective function is formed on the basis of three "*price*" components, one of which is static and two dynamic. The objective function reflects the "*total cost*" of associating and providing requested services and QoS to a given user i to an AP j , at a distance d_{ij} from user i :

$$\text{Objective Function} = P_S(i, j) + P_{OAM}(i, j) + P_{AP}(j), \quad (2.1)$$

where $P_S(i, j)$ is the "*price for service*", $P_{OAM}(i, j)$ is the "*price of OAM*", $P_{AP}(i, j)$ is the "*price of the APs*". The first member of the objective function reflects the CPWAS dynamics in terms of the resources that will be needed to provide user-requested services under a service scheme defined by the *Association Matrix*, i.e. which user from which AP will be served. The second and third members of the objective function present the "*OAM price*" of the AP and its associated infrastructure, depending on the user requests served as a result of the association. As noted in the previous chapter, CPWAS is a "*cell-less*" structure and one user in a given time slot can be associated with more than one AP, for example for the different directions of transmission or in case of cooperative service by several APs with the goal to provide the necessary capacity.

Optimization task for dynamic user association and APs grouping

The purpose of the optimization task is to find the type of *Association Matrix* (matrix variable in the task) in which the value of the objective function reaches its minimum, satisfying certain conditions resulting from the limitations of the operation of CPWAS as a service system without blocking. The optimization task consists in finding such a subset of p active APs, $X_p \in X_M$ and $X_p = \{1, \dots, p\}$, for which the generalized objective function (2.3) gets the minimum possible value under certain rules and constraints imposed by the *Linear Programming*, *APs attraction rate*, and *APs saturation rate* (capacity), taking into account the fact that APs need to serve user requests without buffering.

Taking into account the specifics of CPWAS as a slot-based service mechanism without buffering and proactive DCI management, it is necessary the generic objective function, reflecting the dynamic association of APs to the set of user service requests, to reflect also the dynamics within a serving time slot (Δt_s):

$$\begin{aligned}
Z_{APG}(\Delta t_s) &= \sum_{i=1}^{N(\Delta t_s)} \sum_{j \in X_P}^{p(\Delta t_s)} a_{ij}(\Delta t_s) w_{ij}(\Delta t_s) + \sum_{j \in X_P}^{p(\Delta t_s)} y_j [Vstat_j + Vd_j(\Delta t_s)] \\
&= \sum_{i=1}^{N(\Delta t_s)} \sum_{j \in X_P}^{p(\Delta t_s)} a_{ij}(\Delta t_s) w_{ij}(\Delta t_s) + \sum_{j \in X_P}^{p(\Delta t_s)} y_j \left[Vstat_j + f \left(\sum_{i=1}^{N(\Delta t_s)} a_{ij}(\Delta t_s) w_{ij}(\Delta t_s) \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.12}$$

By applying the developed model and minimizing the generic objective function from expression (2.12), two key issues are solved related to the dynamics and configuration of CPWAS as a service system with proactive management and DCI. The first is related to the determination of the number of active APs (medians) within the next slot, and the second to the creation and storing in the ANOS a table (map) of user association requests for the next slot, i.e. which user to which active AP or Access Point Group (APG) is associated for service. Therefore, the optimization task is transformed into two-parametric and its formulation is related to finding the minimum of the objective function [A11]:

$$Z_{APG}(p, A) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} w_{ij} + \sum_{j=1}^M y_j (Vs_j + Vd_j) \tag{2.13}$$

The specific feature of the objective function (2.13) is the second term that reflects the "price" of the active APs. The specific assessment of the "price" through the introduction of the dynamic component Vd_j is typical for CPWAS and reflects its functioning. It is assumed that the AP's "cost" within the current slot is a function of the served user requests for association without blocking.

2.1.3. Heuristic algorithm for dynamic user association and APs grouping

For the purpose of the multi-parametric optimization of the objective function (2.13), and considering the fact that the task of finding p -medians in a weighted graph is NP hard, it is necessary to develop an association and grouping algorithm that will allow simultaneous calculation of the value of p (the number of active APs) and determination the type of *Association Matrix* A , in which $Z_{APG}(p, A)$ reaches a minimum value. Given the dynamics of CPWAS and the need for an efficient and with a relatively low computational complexity algorithm, the application of a heuristic algorithm for bi-parametrical optimization of the objective function (2.13), called in the sense of the applied heuristic procedure - ADD/DROP heuristics is proposed. The purpose of this heuristics is to define such an absolute median subset of APs in graph $G = (X_N \cup X_M, A)$ with dimension p and members $X_P \in X_M$, where the objective function (2.13) reaches its absolute minimum value [77].

2.1.4. Dynamic user association and APs grouping by applying ADD/DROP heuristic algorithm

Figure 2.2 illustrates a block diagram of the ADD/DROP heuristic algorithm for dynamic user association and APs grouping by applying an ADD procedure.

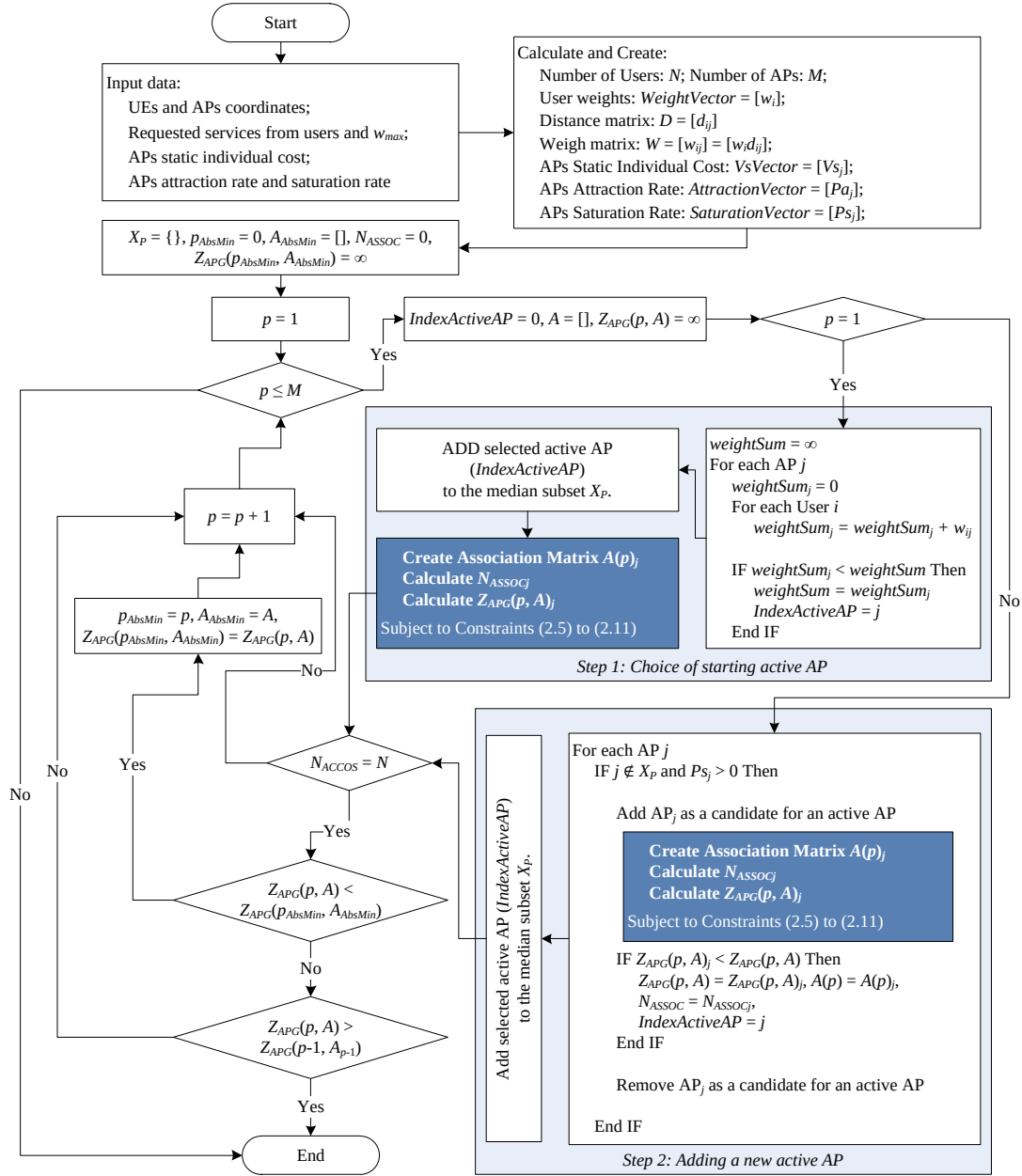


Fig. 2.2 Block diagram of the ADD/DROP heuristic algorithm for dynamic user association and APs grouping by applying ADD procedure

The application of the ADD/DROP heuristic algorithm for user association and APs grouping for dynamic connectivity management in CPWAS is illustrated by a simulation experiment. The following scenarios are considered:

- *Scenario 1.* There are no limits to the parameters *attraction rate* P_{a_j} and *saturation rate* P_{s_j} . Each AP j can serve any one of the users. It is allowed a given user i to be associated for service to more than one active AP.
- *Scenario 2.* There are no limits to the parameter *saturation rate* P_{s_j} . The parameter *attraction rate* P_{a_j} is limited. Each AP j can serve some users. It is allowed a given user i to be associated for service to more than one active AP.
- *Scenario 3.* There are limits applied to the parameters *attraction rate* P_{a_j} and *saturation rate* P_{s_j} . Each AP j can serve some users. A given user i could be associated to only one active AP.

- *Scenario 4.* There are limits applied to the parameters *attraction rate* Pa_j and *saturation rate* Ps_j . Each AP j can serve some users. It is allowed a given user i to be associated for service to more than one active AP.
- *Scenario 5.* Same as *scenario 4* with user mobility. It illustrates the dynamic restructuring of the APGs in *scenario 4*, taking into consideration the user mobility in several consecutive time slots, maintaining connectivity and realizing the principle of “network following the user”.

At each step of the ADD/DROP heuristic algorithm for dynamic user association and grouping of APs through application of the ADD procedure, an active AP is added to the median subset and the *Association matrix* A is constructed. The user association and grouping of the APs according to the logic of the algorithm continues until such a median subset of active APs is obtained, whereby the objective function $Z_{APG}(p, A)$ reaches its absolute minimum.

For *scenario 1* the results of the calculation of the objective function is shown in Figure 2.3. From Figure 2.3 it could be seen that at the first step ($p = 1$) of the algorithm all users are associated to receive service from one active AP, as there is no limit to the *attraction rate* Pa_j . At the next steps of the algorithm the number of active APs increases but the value of the objective function decreases to reach an absolute minimum at $p = 8$, which means that at this point the system performance is optimal, i.e. most effective resource utilization. Figure 2.4 illustrates the performance of the algorithm in *scenario 2*. As can be seen from the results obtained after associating all 50 users at $p = 6$, objective function starts to decrease until reaching the absolute minimum at $p = 10$.

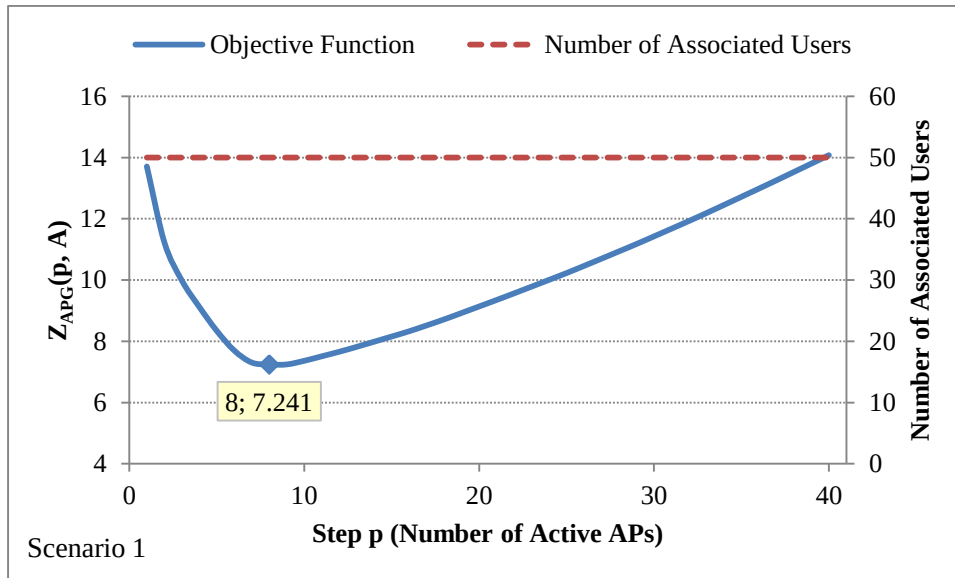


Fig. 2.3 Scenario 1: Results of the calculation of the objective function

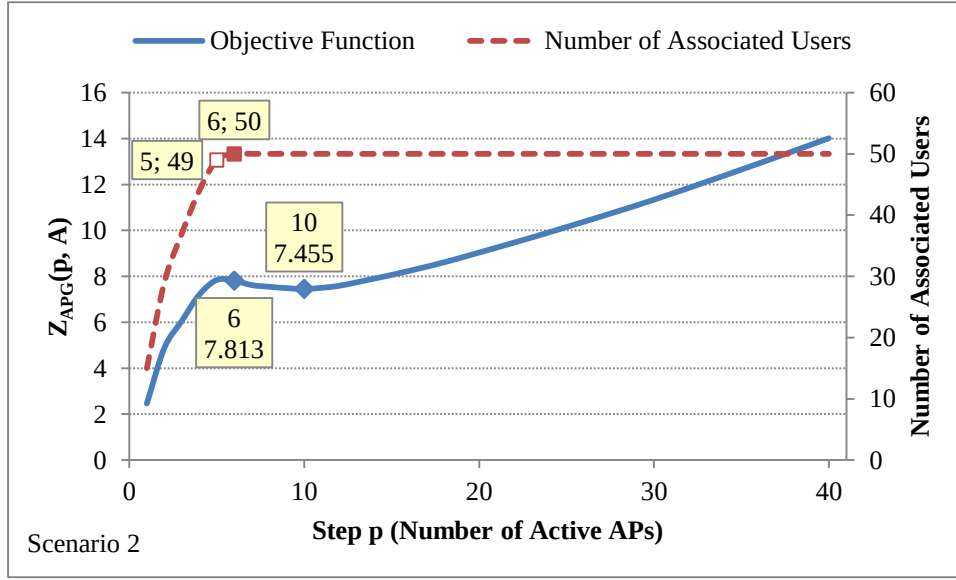


Fig. 2.4 Scenario 2: Results of the calculation of the objective function

Figure 2.5 and Figure 2.6 are a graphical representations of the *Association Matrix A* illustrating the connections between users and APs for *scenario 1* and *scenario 2* respectively and also representing the results from the application of the ADD/DROP heuristic algorithm for user association and AP grouping. From these figures it could be seen that in these two scenarios the users are associated for receiving service from separate APs without the creation of APGs because there are no conditions under which a user cannot be fully served by one active AP. This is due to the fact that there are no resource (capacity) limitations of the APs and hence there is always the possibility that one active AP can provide all the requested capacity to the given user.

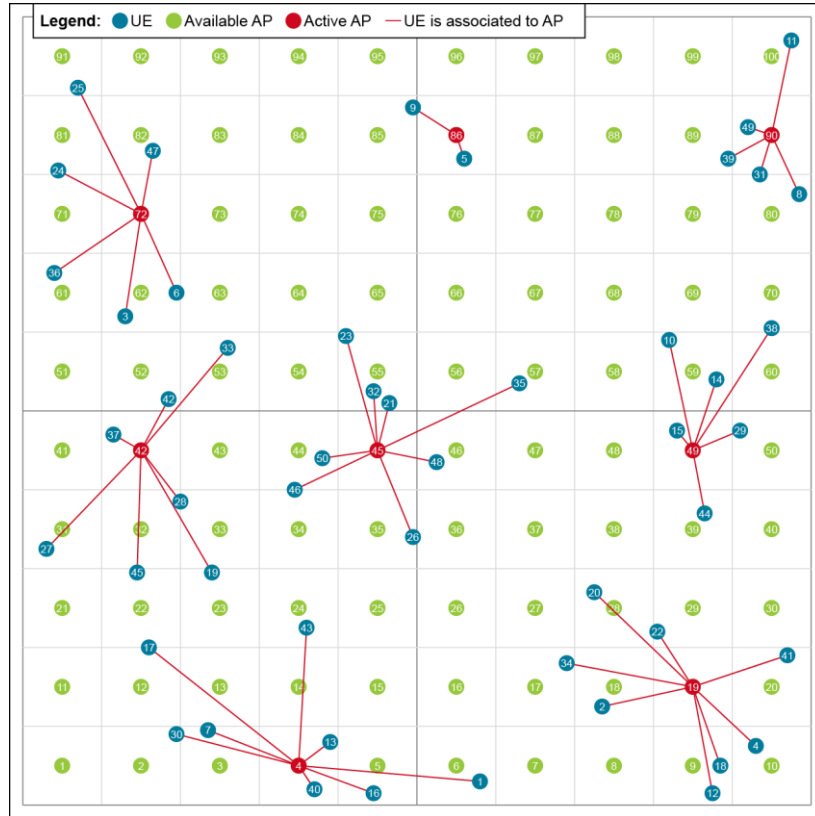


Fig. 2.5 Scenario 1: APs grouping and user association for $p = 8$

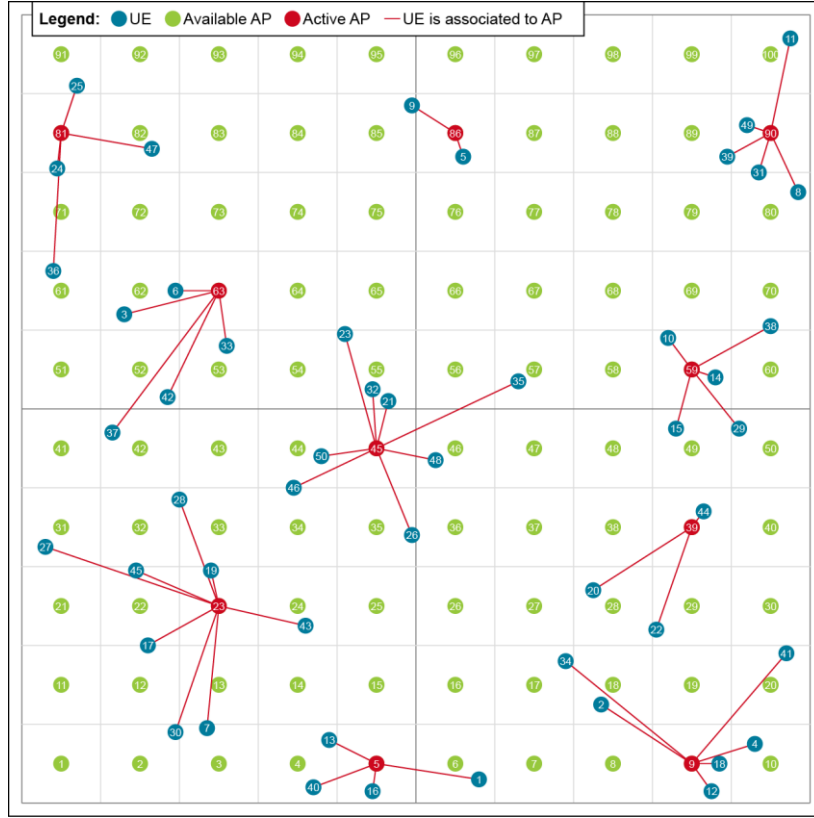


Fig. 2.6 Scenario 2: APs grouping and user association for $p = 10$

In *scenario 3* and *scenario 4* the minimum of the objective function is at $p = 16$ and $p = 14$ respectively, as shown in Figure 2.7 and Figure 2.8.

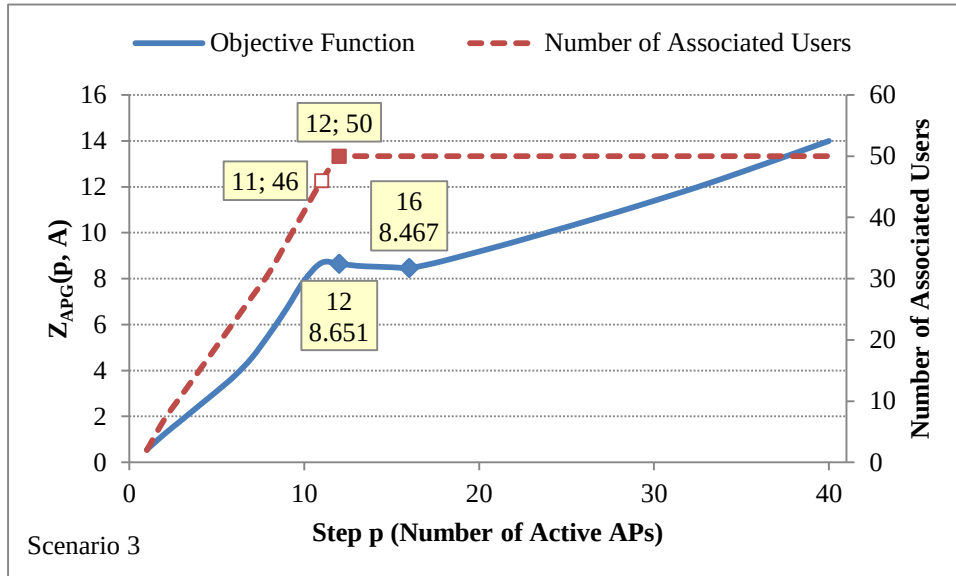


Fig. 2.7 Scenario 3: Results of the calculation of the objective function

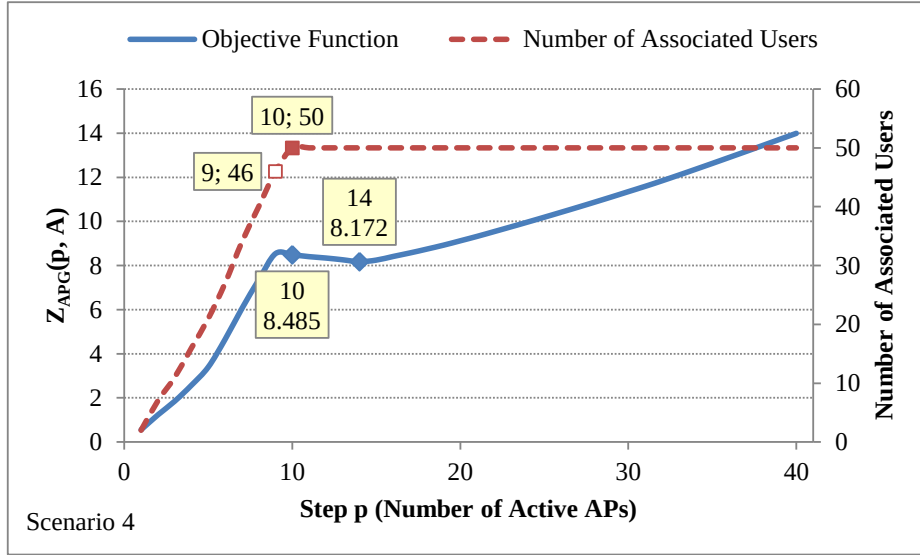


Fig. 2.8 Scenario 4: Results of the calculation of the objective function

Figure 2.9 and Figure 2.10 illustrate the results of applying the ADD/DROP heuristic algorithm for user association and AP grouping for *scenario 3* and *scenario 4* respectively.

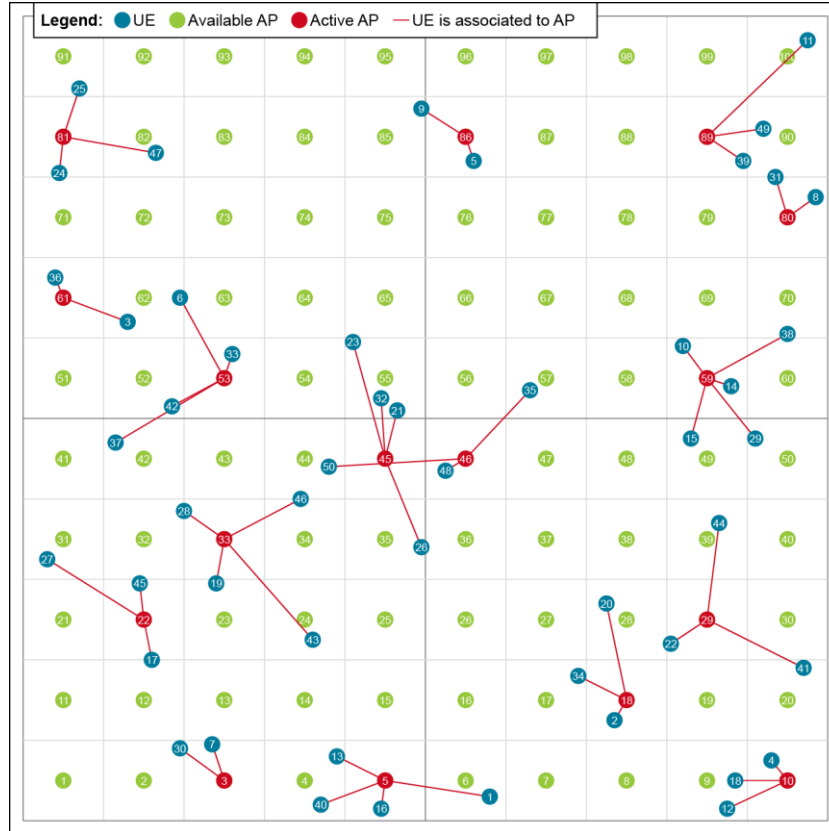


Fig. 2.9 Scenario 3: APs grouping and user association for $p = 16$

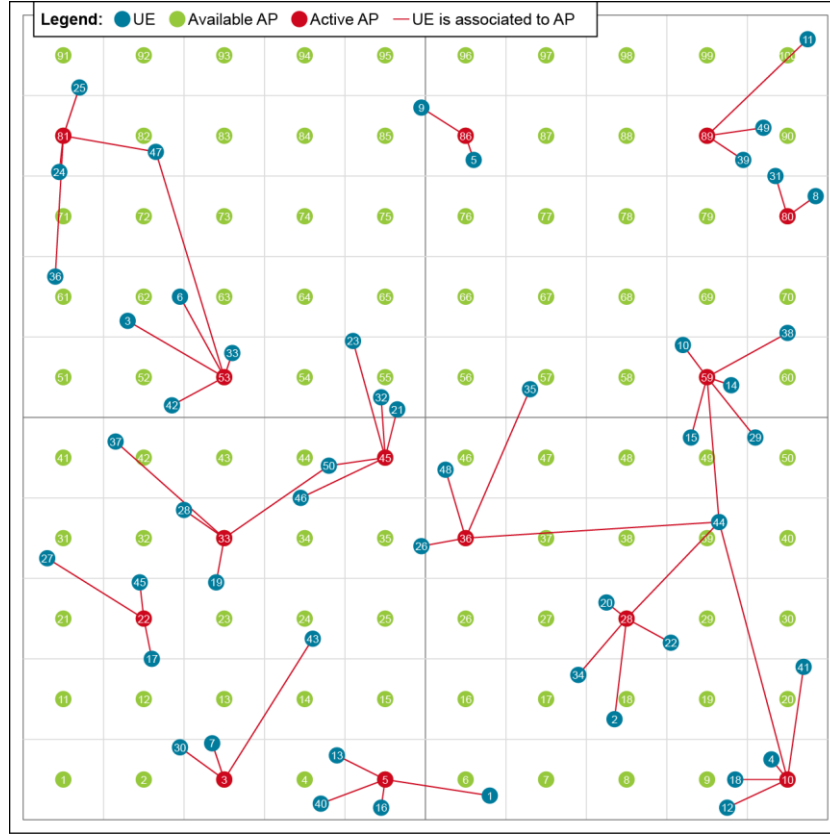


Fig. 2.10 Scenario 4: APs grouping and user association for $p = 14$

The purpose of *scenario 5* is to demonstrate how the APGs in *scenario 4* (time slot Δt_0) are dynamically restructured taking into account the mobility of users in three consecutive time slots (Δt_1 , Δt_2 and Δt_3), maintaining connectivity and realizing the principle of “a network following the user”. The objective function at all the three consecutive time slots reaches its absolute minimum at $p = 14$ as shown in Figure 2.11, Figure 2.12 and Figure 2.13.

In Figure 2.14, Figure 2.15 and Figure 2.16 the results of applying the ADD/DROP heuristic algorithm for dynamic user association and AP grouping for *scenario 5* respectively for Δt_1 , Δt_2 and Δt_3 are shown.

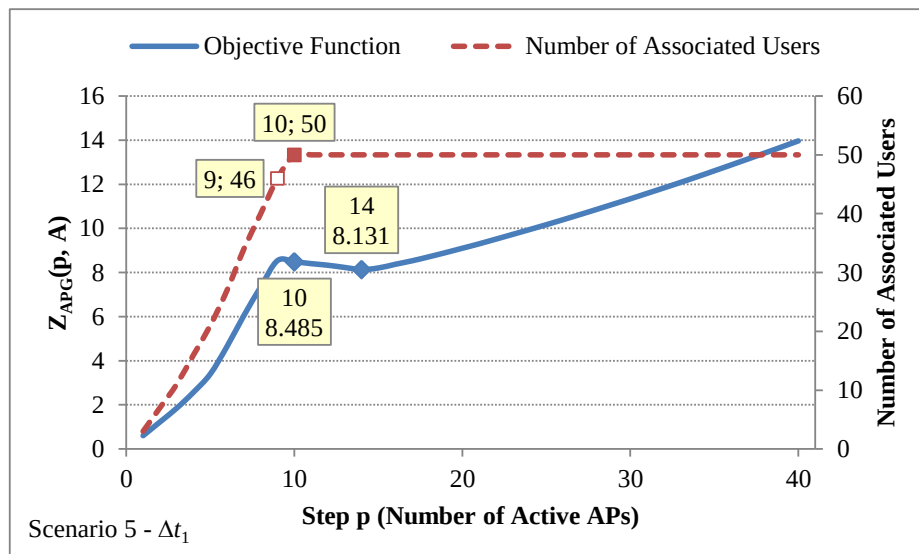


Fig. 2.11 Scenario 5: Results of the calculation of the objective function for Δt_1

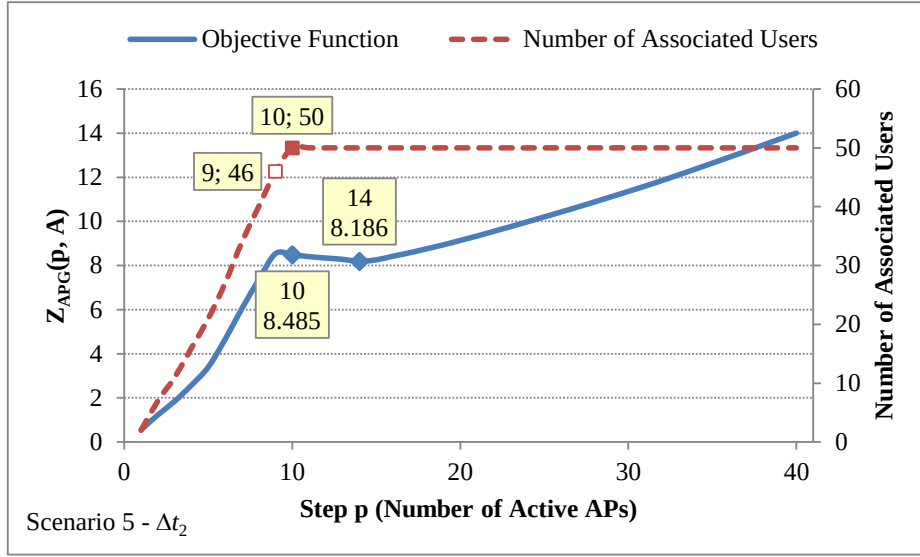


Fig. 2.12 Scenario 5: Results of the calculation of the objective function for Δt_2

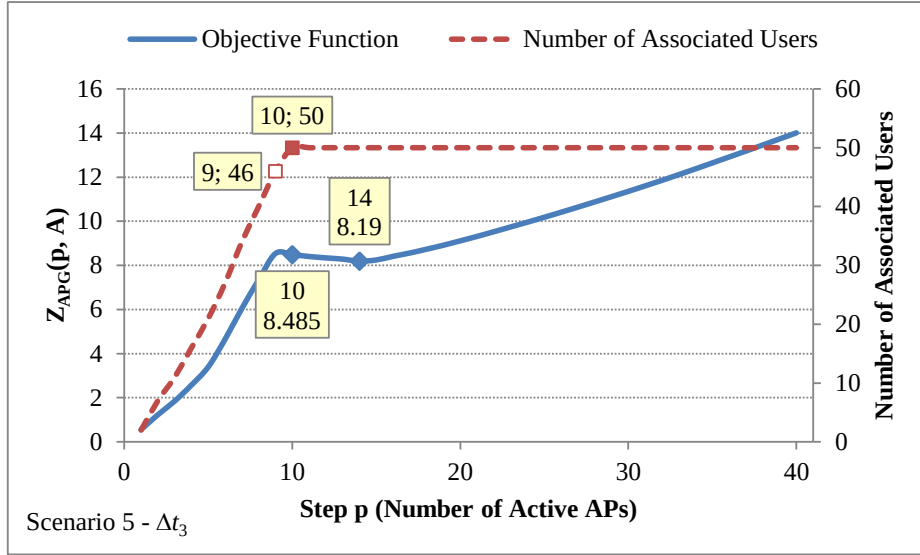


Fig. 2.13 Scenario 5: Results of the calculation of the objective function for Δt_3

At time slot Δt_1 an APG consisting of two APs is formed (AP_{45} and AP_{53}) each of which will partially serve UE_{50} , but the set up group will provide 100% service as required by the user, i.e. the user will receive 87% resources from AP_{45} and 13% from AP_{53} (Figure 2.14). At time slot Δt_2 there is a change in the already created APG as the user continues to be served by AP_{45} and AP_{53} , but AP_{33} is added to APG (Figure 2.15). At time slot Δt_3 there is no change in the APG (Figure 2.16), but there is a change in the resources provided to the user on behalf of the APs forming the group.

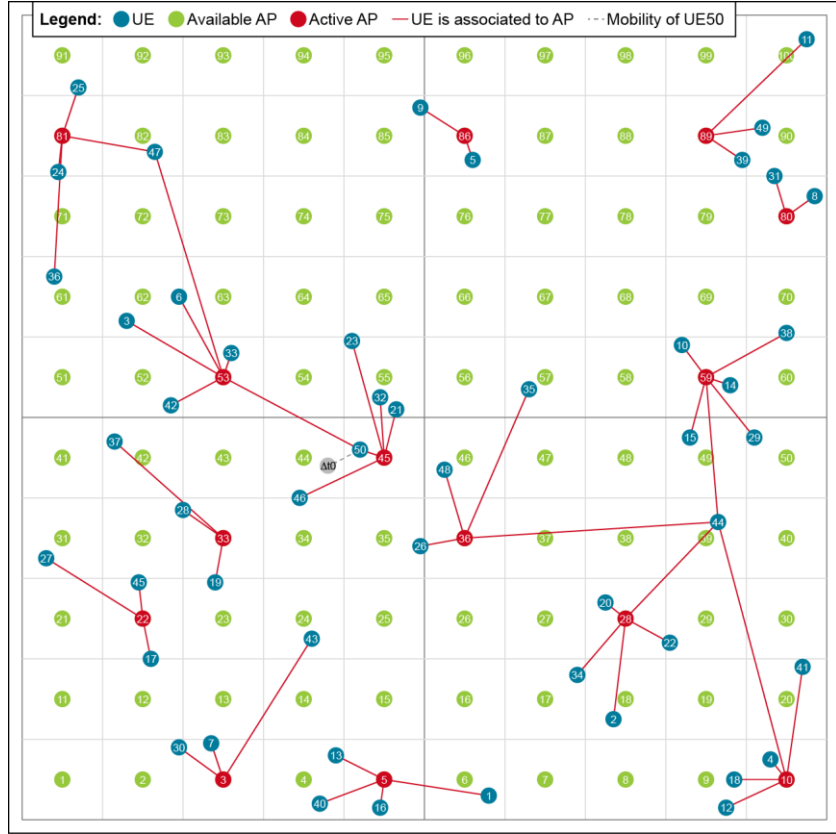


Fig. 2.14 Scenario 5: Dynamic access point grouping for time slot Δt_1

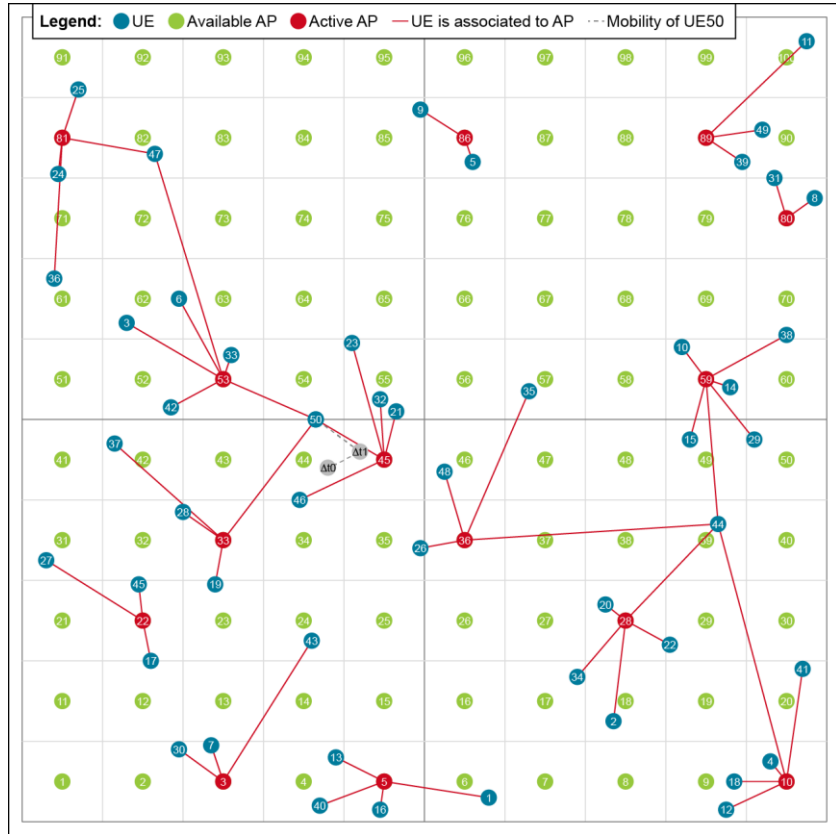


Fig. 2.15 Scenario 5: Dynamic access point grouping for time slot Δt_2

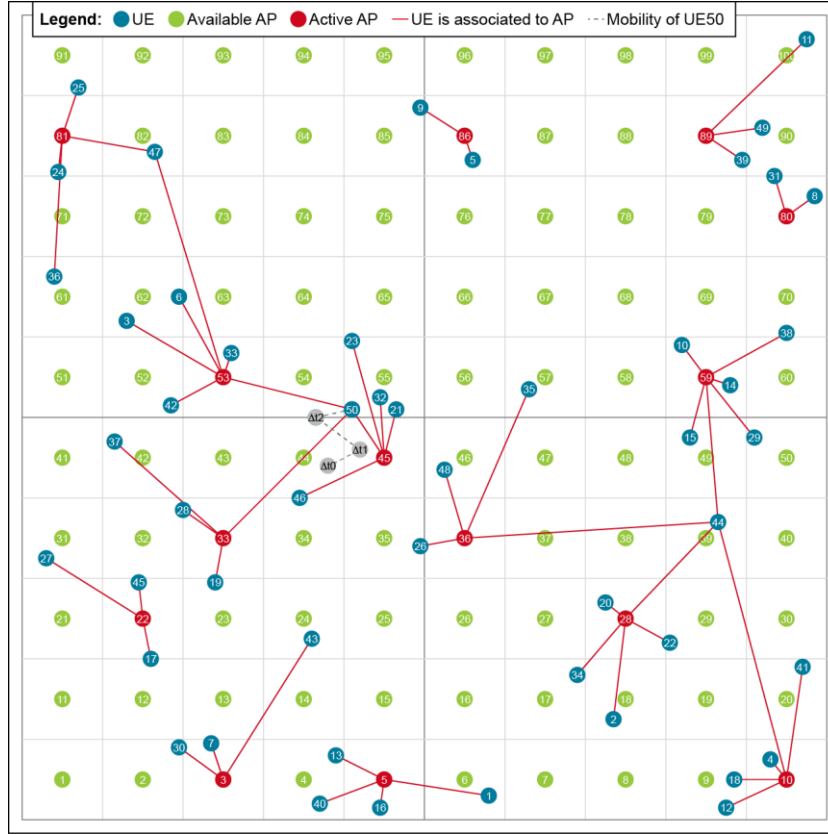


Fig. 2.16 Scenario 5: Dynamic access point grouping for time slot Δt_3

The determination of the time slots or time periods for regrouping of the APs (or updating the APGs) depends on the structure and dynamics of the network, channel models, APs types and density, user mobility and density, etc., which could be reflected in the algorithm through appropriate determination of the *attraction* and *saturation rates*. Taking into account the dynamics of CPWAS and that frequent regrouping will be required the heuristics and simple computational complexity of the proposed approach will be the advantage for its application.

2.2. Association based on a partnership model

Another approach to solving the association task is based on "*Choosing an Appropriate Partner*" by assessing *Behavior* and *Influence* of the nodes. The idea of associating with this approach is to offer a heuristic model for assessing the future "*link*" between a user and an AP in an extremely diverse and dynamically changing environment, such as that of CPWAS. In [A12] and [A13], a model is proposed for connecting communication nodes and evaluating their performance according to the specific QoS requirements and the required resources. The model is based on an analogy of establishing the long-term partnership relationship between the two people as described in [93]. Such a model can be used to detect, connect and interpret communication nodes in large-scale unstructured and resource-constrained environments with the goal of collective resource utilization and service delivery. The idea is to find a communication node that has the required set of desired resource attributes in accordance with the request of the demanded service or application by another node. This model can be successfully applied to associate users to AP in CPWAS, as the user and the AP can be identified by several key variables. To illustrate the association method based on one such partnership model, in [A12] a two-node scenario has been considered, each the nodes having a specific role. In [A13] it is shown that in the process of establishing a communication link by

choosing an appropriate device/partner there are many analogies to human communication during the selection process of a long-term partner [93]. As in human interactions, the model proposed in [A13] considers as a starting point a scenario of two nodes, each of which has a certain role, i.e. user and AP. The node that initiates communication (N_1) and the node that performs the association and maintains communication (N_2) are in role relationships reflected in expressions (2.15) and (2.16) and are defined by evaluations based on a parameter called *Influenced Behavior*.

$$B_1(t + 1) = I_{N_2 \rightarrow N_1} B_2(t) + r_1 B_1(t) + a \quad (2.15)$$

$$B_2(t + 1) = I_{N_1 \rightarrow N_2} B_1(t) + r_2 B_2(t) + b \quad (2.16)$$

where $B_1(t + 1)$ represents the *Behavior* of N_1 in the moment $t + 1$, and $B_2(t + 1)$ is the *Behavior* of N_2 in moment $t + 1$, which are evaluated through the following parameters:

- $I_{N_2 \rightarrow N_1}$ is the value of the *Influence* of node N_2 on node N_1 , a $I_{N_1 \rightarrow N_2}$ is the value of the *Influence* of node N_1 on node N_2 ;
- r_1 and r_2 are parameters, taking into account the required or the provided resources respectively from node N_1 and from node N_2 ;
- $B_1(t)$ and $B_2(t)$ are the results from the *Behavior* of node N_1 and node N_2 in the previous moment of time t ;
- a and b are integer constants, defining the device class (node N_1) and the device class (node N_2);
- t is the moment in time (number of iterations).

The *Behavior* is an assessment showing the capabilities of a given node (user/AP) depending on the requirements it needs to meet (requested/available resources). This estimate can only have positive values due to the specificity of the modeled phenomena. As a result, the values that the *Behavior* parameter can have are integer values in a range that are determined based on a formula evaluating this parameter in the absence of influences from other nodes, or the so called *Uninfluenced Behavior*, as outlined in [A13].

The partner node is selected based on the algorithm shown in Figure 2.18 illustrating the node selection for communication in a heterogeneous scenario described and analyzed in [A13]. Figure 2.19 shows one of the simulation results of a scenario described in [A12], which shows the current values of *Influenced Behavior* of N_1 and N_2 . The main reason for the fluctuations of the curves is the negative *Influence* of N_1 on N_2 and the changes of r_1 and r_2 . It can be seen that after a certain number of iterations (60), the *Influenced Behavior* of N_2 decreases considerably, as the resource capabilities of the node decrease and only 30% of them remain free. Moreover, due to the loss of resource, N_2 can no longer meet the requirements of N_1 , resulting in the *Influenced Behavior* of N_2 reaching a score of 12 that in the particular simulation scenario [A12] is equal to the *Device Class* value of the node, representing the AP. This means that N_2 is no longer an effective partner for N_1 , and a procedure for finding a new partner must be started, i.e. new procedure for association.

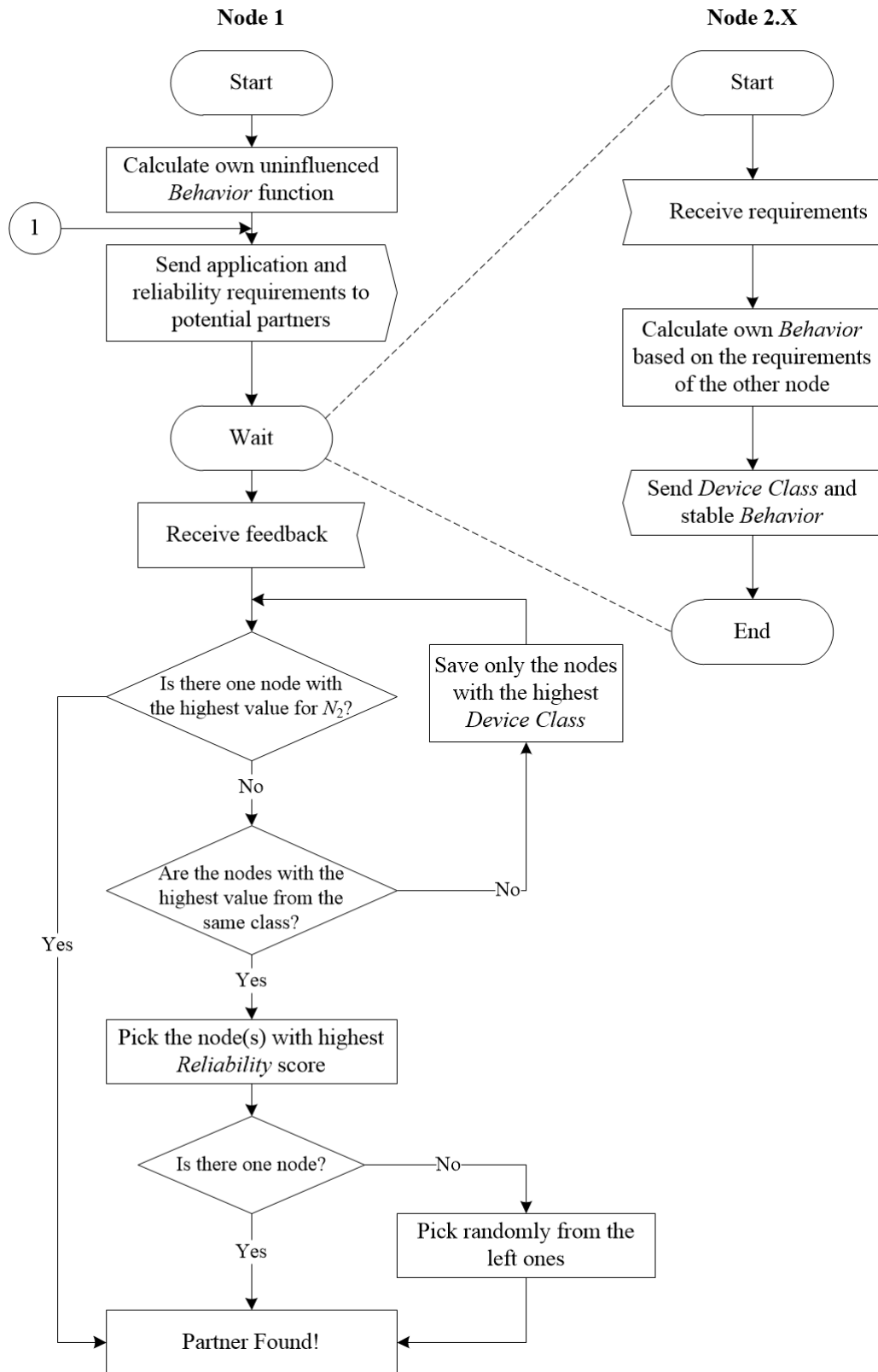


Fig. 2.18 Partner selection algorithm [A13]

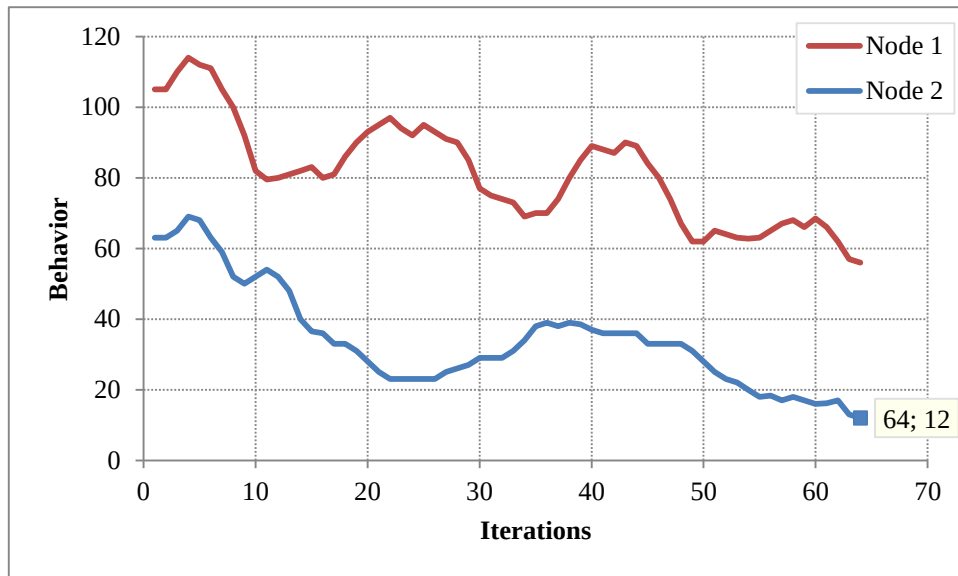


Fig. 2.19 Evaluation of the mutual influence of two connected communication nodes [A12]

In [A14] a model is proposed to evaluate interaction between nodes, representing the dynamics of a complex sensor network in the Internet of Things (IoT) scenario where the goal is to increase the probability of the existence of communication paths in a sensor network while maintaining network resources and energy efficiency above a certain threshold. The starting point for the realization of the model is the result of Figure 2.19, showing that two communication nodes can interfere with each other negatively, which may lead to premature disconnection. The model applies the Lotka-Volterra (LV) method, inspired by biology and reflecting predator-to-prey dependence, to implement a more efficient model of communication between nodes. In this approach, each component or node connects to a cluster, so-called "Hyper-graph", in such a way as to have access to other nodes under certain network constraints that define an optimization task. One advantage of using such a heuristic model is that by solving the optimization task, a characteristic indicator or metric can be defined to facilitate the modeling of *Influenced Behavior* and, hence, the process of associating and providing connectivity to users in a dynamic system such as is CPWAS. Another important advantage of the proposed model is the ability to compute the components in parallel and in real-time, as the metric can be calculated and recalculated constantly and independently for different sub-networks or APs (hyper-graphs), and then to be combined to effectively manage the entire AN.

2.3. Cooperative association for the realization of user oriented functionalities

In a unified cell-less architecture, a user can be associated with a group of several cooperating APs to provide the required bandwidth or service quality. Such a cooperative association will allow CPWAS to function as an effective User-Centric Network (UCN).

2.3.1. Approaches based on ensuring optimal coverage

A strategy for optimal coverage probability based on cooperation, such as the one in HetNets, can successfully be applied for the association of a node to several APs given that in a CPWAS the coordination and management function for its implementation is realized in a centralized way by ANOS. In [A15], coverage probability analysis with n interacting nodes for HetNets was performed for both classes of strategies for improvement of the Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR).

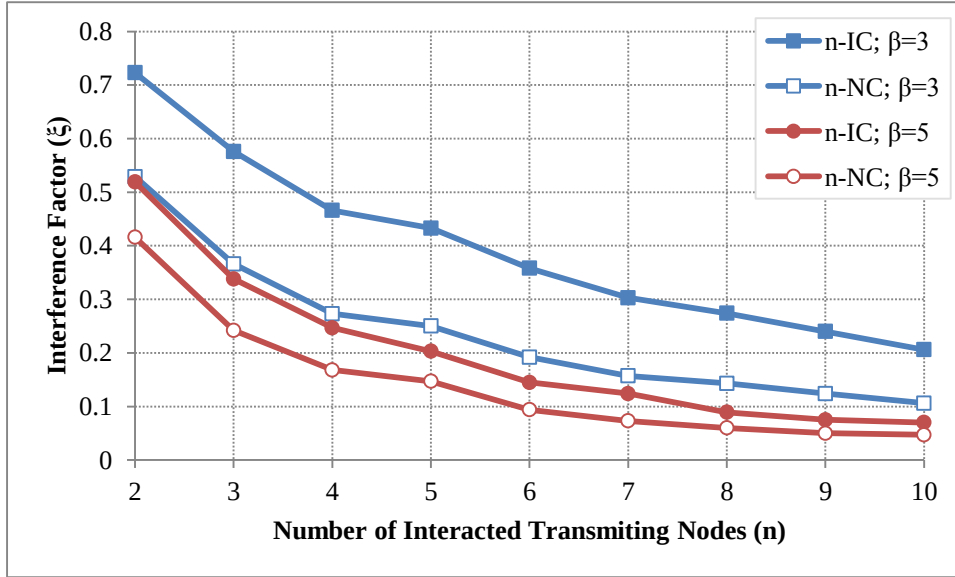


Fig. 2.22 Interference factor depending on the number of interacting nodes [A15]

An important result of the analysis in [A15] is the dependence of the interference coefficient (ξ) shown in Figure 2.22, depending on the number of interacting nodes (n) for both strategies at $\beta = 3$ and $\beta = 5$. In all cases, the application of n -NC achieves a lower value of this factor than with n -IC. From the point of view of a CPWAS, important is the nature of change of ξ with the increase of the number of nodes n that will co-operate to associate and provide connectivity to a user. It can be seen that the value of ξ decreases with the increase of n , but when $n > 6$ an improvement of this coefficient is not achieved.

2.3.2. Approaches based on spectral and energy efficiency

Other criteria that can be used for cooperative user association are spectral and energy efficiency. A new Energy Efficiency (EE) optimization approach in respect of the Spectral Efficiency (SE) in cellular networks is proposed in [A16], which can be used as a criterion for co-operative association of one user to several APs. The basis for this is the fact that the monotonous increase in the transmission power of APs does not necessarily lead to an improvement in the overall spectrum efficiency of the network. For the energy efficiency analysis, an information theoretical approach is applied, depicting energy efficiency as a function of the transmit power of an AP, taking into account the interference signals, and then providing a gradient based solution to optimize the transmit power level of the AP so as to receive the maximum energy efficiency. In cooperative association of one user to several APs, it is essential that ANOS manages the transmission power of the individual APs so as to obtain an optimal compromise between spectral and energy efficiency. Formulation and solution of such an optimization task related to maximum efficiency as a trade-off between spectral and energy efficiency is proposed in [A16] using baseline conditions and scenarios such as those in [A15].

Figure 2.23 and Figure 2.24 show the energy and spectral efficiency as a function of the transmitted power of the AP. It can be seen from Figure 2.23 that the results for the value of the power transmitted by the AP from the simulation of different scenarios corresponding to the maximum achievable energy efficiency almost match the theoretical value. An important result is the saturation of the spectral efficiency after a certain optimum power value, although it is a monotonically increasing function as seen in Figure 2.24.

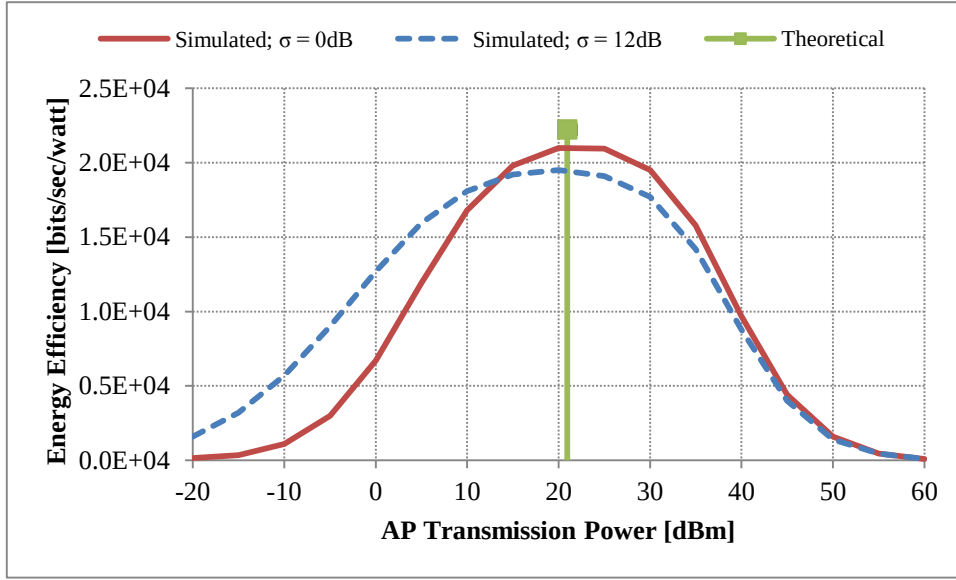


Fig. 2.23 Energy efficiency depending on transmission power [A16]

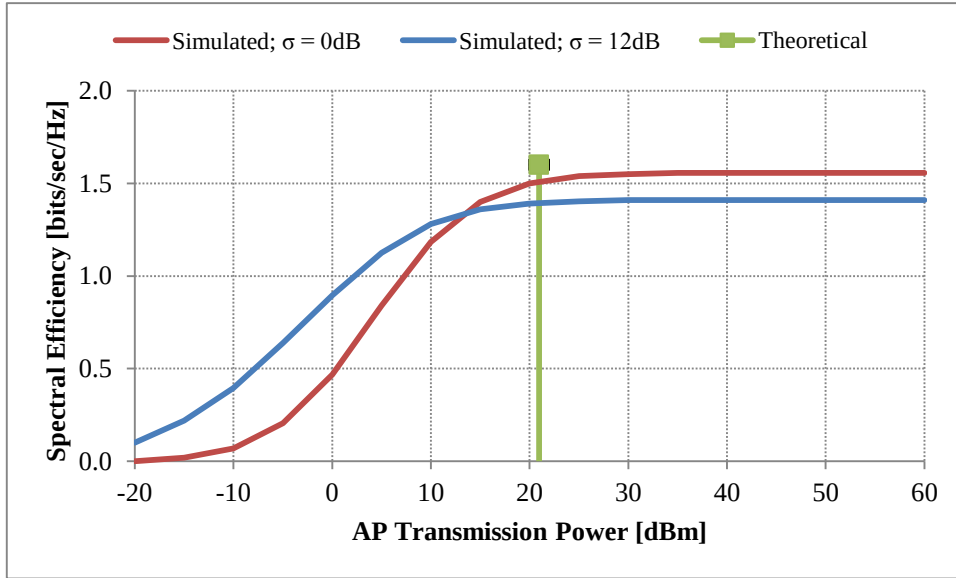


Fig. 2.24 Spectral efficiency depending on transmission power [A16]

2.4. Conclusion

This chapter proposes approaches for association, grouping, and cooperative communications between users and APs to ensure seamless, ubiquitous, and uninterrupted connectivity of different types of user devices in CPWAS. The approaches are based on methods for proactive management of connectivity and APs grouping and are implemented through heuristic algorithms with low computational complexity and simplified analytical calculations. In order to be able to implement the association, grouping and cooperative communication schemes proposed in this chapter, two of the required functionalities to be implemented in CPWAS, as seen in Figure 1.6, are: a) monitoring of the parameters of the wireless environment, and in particular intelligently to monitor and analyze the radio frequency spectrum; and (b) flexible organization and management of the resources and work of the relevant APs and APGs. Possible approaches to implementing these functionalities are suggested in the following chapters.

2.5. Contributions to Chapter 2

1. A model for proactive dynamic association of users and grouping of APs with low computational complexity based on the theory of graphs was developed by defining two basic properties of APs: *Attraction rate and Saturation rate*. An objective function for dynamic association and grouping is defined, based on static and dynamic components, and an optimization task for dynamic user association and AP grouping is formulated. To solve the optimization task, a heuristic algorithm for association and grouping has been proposed and developed, combining the advantages of *Heuristic Concentration, Linear Programming and Graph Theory*. The performance of the developed algorithm is illustrated by a simulation experiment for dynamically associating users for service to certain APs and/or APGs.
2. A method using a heuristic approach based on a partnership model, that can be applied to detect and connect communication nodes in large-scale, unstructured and resource-constrained environments with a view to collectively utilize the available resources is proposed. The method is used in connection with the need to solve a complex optimization task in an exponentially growing search space, such as the space of CPWAS. In such a complex AN, the number and parameters of users are changing very dynamically with respect to the densely distributed APs, thus the association node search space is changing extremely fast and can grow. The partnership model is based on finding a communication node that has the required set of desired resource attributes in accordance with the requests by another node for the delivery of a service or application. The performance of the model is illustrated by a simulated algorithm. The main advantage of using such a heuristic approach is that it allows the definition of different performance indicators or metrics to facilitate the process of user association and providing connectivity in a dynamic system such as CPWAS.
3. An approach is proposed for the association of one user to more than one AP or to a group of cooperating APs that can provide optimal and effective CPWAS functionality as a user-centric unified cell-less access network in which the density of APs is comparable to user density. The application of such an approach will allow a user to be associated and connected to a group of several cooperating APs to provide the requested throughput or QoS. The approach is analytical and is based on the capabilities of implementing a cooperative strategy to provide a higher probability of coverage of APs and the realization of optimal and ubiquitous connectivity of users through a dynamic organization of APG. The advantage of the proposed approach is that it uses criteria based on both the connectivity and coverage that each AP can provide and ensure, as well as its impact on the overall spectral and energy efficiency of the system.

CHAPTER 3. Analytical Processing of Radio Frequency Data and Contextualization of User Behavior for Intelligent Management of the Wireless Access in CPWAS

In this chapter, approaches for collecting, processing and analyzing Radio Frequency (RF) data are proposed. Along with techniques for modeling and predicting user behavior and implementing appropriate algorithms based on AI, they will allow for adaptation of CPWAS to the state of the

environment and the user characteristics for the goal of implementing the concept of ubiquitous "hyper-connectivity".

3.1. Analytical processing of RF data

Analytical data processing or data analytics refers to retrieving information from observations, measurements, or experiments on a phenomenon or object of interest for various purposes such as data interpretation, decision making, diagnostics, forecasting, etc. [129].

3.1.1. Recording and storing RF data in clouds

Currently, RF data are considered in the time-domain to be In-phase and Quadrature (IQ) baseband data or in the frequency-domain as spectrum data. Looking at RF data as "digital IQ" or spectrum data may seem adequate, but since it does not include any knowledge of the RF signal, such as location, center frequency, etc., this definition is insufficient, especially from the point of view of their analysis. RF data should therefore be defined as IQ data in the time domain related to all metadata (data for data), such as center frequency, bandwidth, location, etc.

3.1.2. Cloud services and RF analytics

A cloud architecture is described in [A17] that allows a number of new services to be offered. In the developed platform as described in [A17] and shown in Figure 3.1, different RF clients with different capabilities are used. The implementation of RF clients is based on Software Defined Radio (SDR), which are connected via a high-speed connection to the cloud. Using open interfaces access to different users and applications is provided.

This platform also allows for more sophisticated services and applications, such as RF analytics. RF analytics is an analysis that aims to reveal what is in the data by retrieving knowledge from RF data at different resolution levels.

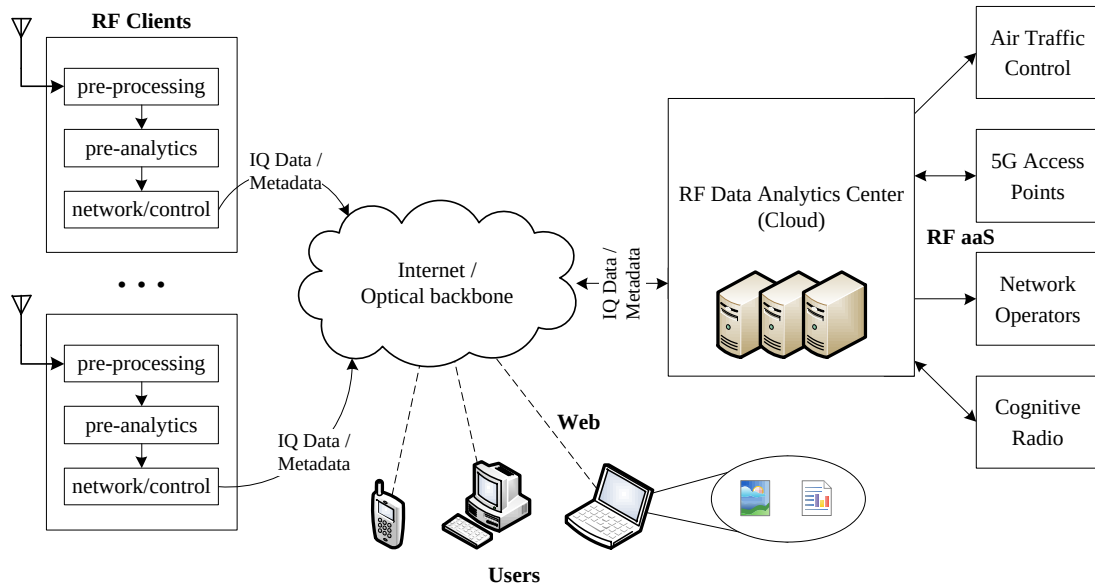


Fig. 3.1 Cloud-based platform for RF data analytics [A17]

3.2. Spectrum monitoring as a service based on RF analytics

The implemented platform shown in Figure 3.1 can be used to provide descriptive, predictive and prescriptive RF analytics.

3.2.1. Examples of descriptive analytics

An example for a descriptive service and application of RF analytics is radio spectrum monitoring for operational evaluation. In this case, the purpose of the monitoring is the information about the systems that are known to be operational to be used to assess and control the proper use of radio spectrum.

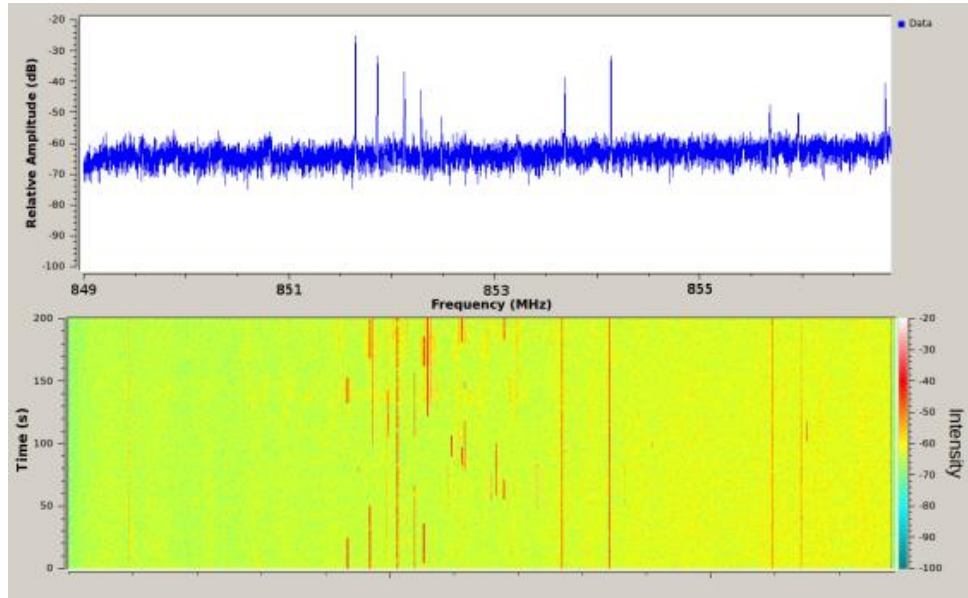


Fig. 3.2 RF spectrum data representing public safety P25 radio system, Fort Wayne, Indiana, USA [A17]

An example of retrieving results from radio spectrum monitoring is shown in Figure 3.2, capturing the work of radio station P25 of the public safety at Ford Way, Indiana, USA. This RF analytic application is based on pairing the radio frequency data with metadata provided by the RF client, such as location, duration of the channel utilization and moment in time.

3.2.2. Examples of predictive and prescriptive analytics

An example of predicting radio frequency occupancy based on the application of ML algorithms on RF data is presented in [A18] and [A19]. In [A18] an approach is offered for interference recognition based on the analysis of a large amount of data derived from long-term radio spectrum monitoring. It has been shown that by applying a suitable approach to analyzing RF data, a specific type of interference in the evolved Node Base (eNB) channel caused by the "atmospheric ducting" effect can be detected and identified.

Figure 3.7 and Figure 3.8 show the changes of the frequency-time variations of the received power for the uplink channel for GSM and UMTS900 with and without interference [A17], while in Figure 3.9 and Figure 3.10, the mean, maximum and minimum measured values with and without interference are visualized [A18]. The analysis of long-term monitoring results shows that in the 869MHz to 888MHz range, the SINR of the uplink channel is seriously degraded. It turns out that the identified interferences caused by CDMA2000 systems have the same bandwidth of 1.25MHz and vary over time in a similar way, depending on environmental and climate conditions. Based on the results obtained from the statistical analysis of RF data correlated with data from the environmental conditions analysis, it can be concluded that the reception of CDMA2000 radio signals from relatively long distances is the result of the effect "atmospheric waveguide".

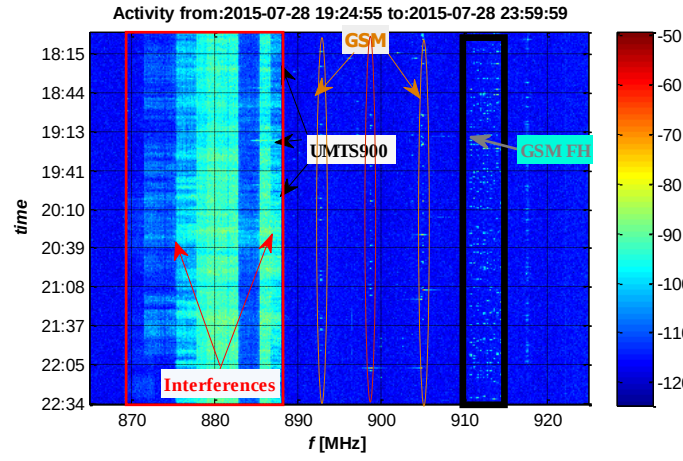


Fig. 3.7 Variations of the received power (with interference) [A17]

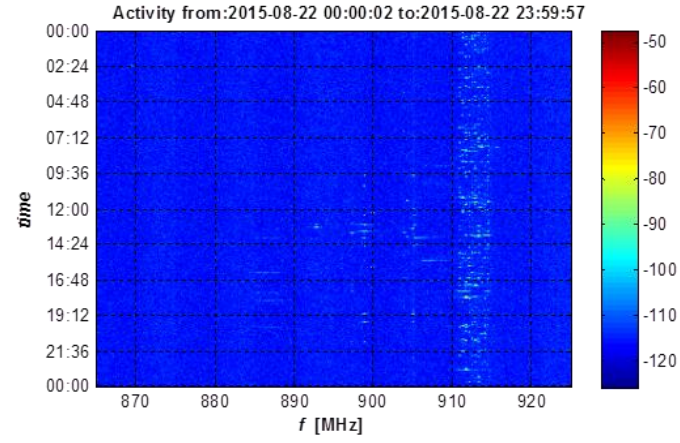


Fig. 3.8 Variations of the received power (no interference) [A17]

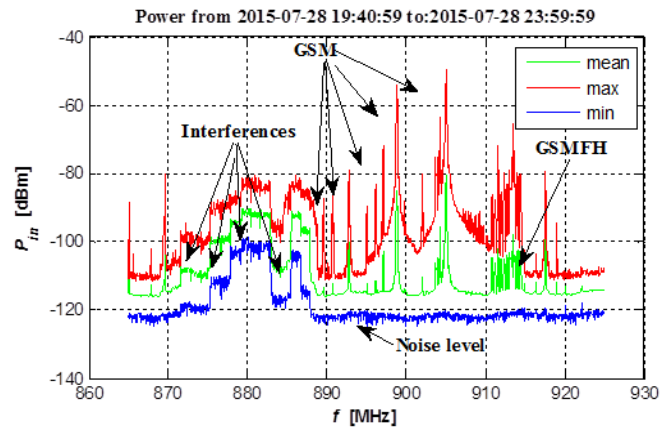


Fig. 3.9 Averaged values (with interference) [A18]

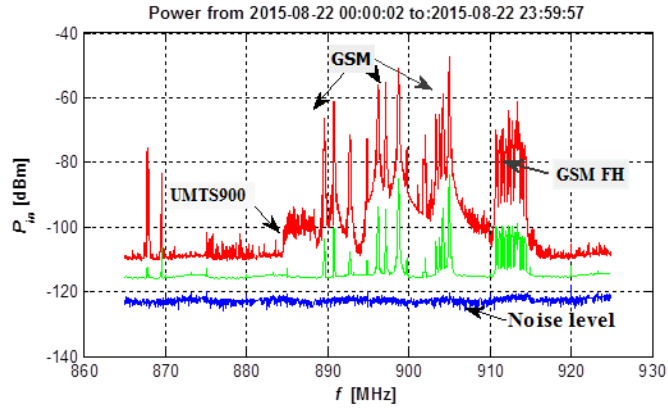


Fig. 3.10 Averaged values (no interference) [A18]

The implementation of predictive RF analyst based on linking the results of continuous spectrum monitoring with the analysis of other environmental, structural or mobile data shows that the occurrence of such effects can be predicted with a high probability which will be a prerequisite for effective and reliable CPWAS performance.

3.3. Spectrum sensing

A hybrid algorithm for detecting spectral holes based on energy detection and fuzzy logic for Cognitive Radio (CR) is proposed in [A20]. In the algorithm proposed, the Signal to Noise Ratio (SNR) levels and the received signal power (P_r) are used for inputs and are classified into three categories: "low level", "medium level" and "high level". The experimental setting and details of the practical implementation of the proposed spectrum sensing algorithm are presented in [A20]. The experimental results show that the introduction of Fuzzy Logic (FL), which complements the channel's decision-making process, increases the efficiency of spectrum usage.

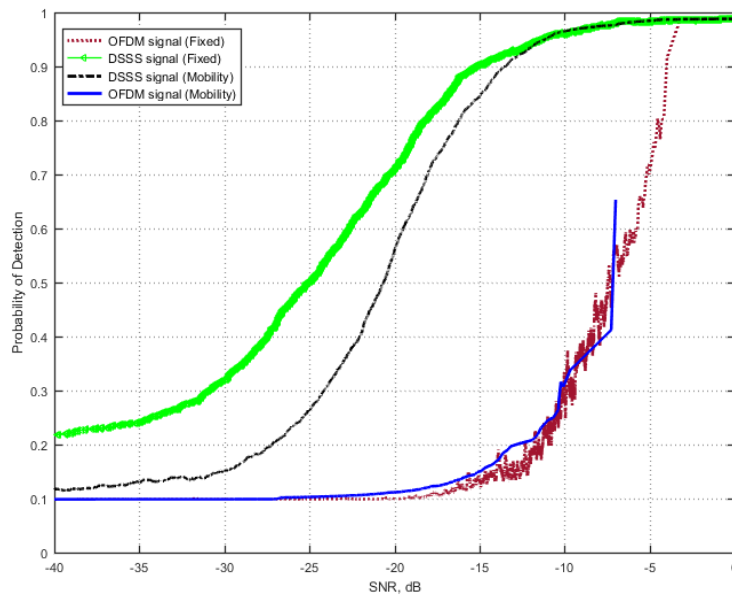


Fig. 3.18 Probability of detection depending on the SNR for the cyclo-stationary detector in Fixed and Mobility cases [A21]

An optimization algorithm to improve the efficiency of existing cyclo-stationary and energy detectors based on balancing between measurement time and detection accuracy is proposed in [A21]. The results of the evaluation of the efficiency of the algorithm based on a cyclo-stationary detector are presented in terms of the detection accuracy and the probability of occupancy of the channel by the transmitter. The performance of the cyclo-stationary detector is assessed by the probability of detection (Figure 3.18) while maintaining a constant probability of a false alarm. A comparison of the detector efficiency is performed for two cases - Fixed and Mobility receiver, as well as two types of signals: a) with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); and b) those that are Direct Spread Spectrum Signals (DSSS).

3.4. Modeling of user behavior based on heat maps

The development of technologies for dynamically creating and maintaining models related to user distribution and their activity can be combined with the addition of metadata to traffic patterns generated by users. Most of the proposed solutions for predicting user behavior and traffic are of relatively high computational complexity. For this reason, they cannot be used when the dynamics of the changes in user behavior and variations in network traffic are high as expected to be in CPWAS. In such cases, algorithms with low computational complexity must be applied directly to APs, such as the algorithm proposed in [A22], using a heuristic approach for grouping users according to their location and the applied methods of uplink power control. By observing the distribution, mobility, activity, and services used by users the so-called “*User Heat Maps*” (UHMs) can be created from which to derive knowledge and to predict future events in CPWAS.

3.4.1. Proactive control of AP based on UHM and NN

The possibility of using patterns to optimize resource allocation and efficient performance of APs by applying appropriate predictive analytics is demonstrated in [A23]. A new approach is being proposed to dynamically and proactively use the resources of an AP based on a Neural Network (NN) architecture using UHM data built on user activity and mobility patterns. The main advantage of this approach is its low computational complexity and high-speed performance, allowing its application in a dynamic environment such as CPWAS.

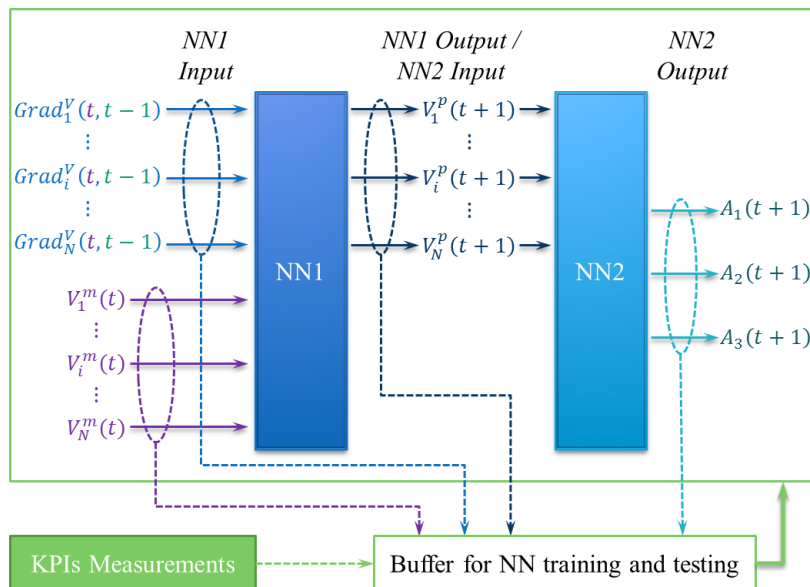


Fig. 3.22 NN Architecture [A23]

The NN architecture used to predict and optimize the electrical tilt of the antenna of the serving AP is shown in Figure 3.22 and consists of two NNs that are trained independently from one another. NN1 is used for predicting the next state taking as an input the gradients of the UHM elements for the last two time slots and the values of the UHM elements for the last time slot. The output of NN1 represents the predicted values for each UHM element. The predicted values are the input for NN2, which outputs the action values for the electrical tilt.

In Figure 3.22 $Grad_i^V(t, t-1)$ is the gradient between the present time period t and the last period $t-1$ for UHM element i ; $V_i^m(t)$ is the measured value at time t for UHM element i ; V is a scalar or a column vector with Key Performance Indicators (KPIs), i.e. number of active users, total traffic, average received power, etc.; $V_i^p(t+1)$ is the predicted value for time period $t+1$ for UHM element i . The gradients $Grad_i^V(t, t-1)$, the measured values $V_i^m(t)$, $V_i^m(t+1)$ and the predicted values $V_i^p(t+1)$ are used to train NN1.

The actions $A_1(t+1)$, $A_2(t+1)$ and $A_3(t+1)$ which represent the change of the electrical tilt of the antenna respectively with 1, -1 or 0 degrees are the actions which can be taken after a prediction for next time period is made. With Q-learning method from Reinforcement Learning (RL) and using NN for policy classifier, the best action will be chosen, which will maintain the KPIs at satisfying levels. $A_1(t+1)$, $A_2(t+1)$, $A_3(t+1)$, $V_i^m(t+1)$ and the KPIs are used for training NN2.

3.4.2. Example of capacity optimization and experimental results

A method is proposed in [A24] to provide predictable and adaptive means of balancing between cellular coverage and capacity of a mobile network applying a self-organizing algorithm. The latter is based on real-time measurement data, KPIs and statistics, collected by network elements and user devices. To solve the problem in an autonomic and predictable way, the algorithm uses AI methods based on Machine Learning (ML), and in particular Reinforcement Learning (RL).

For modeling the radiation pattern and defining a target function for adjusting the angle of the antenna tilt, in [A23] is used the same approach as in [A24]. To ensure that each user is given the requested capacity, the objective function can be defined as follows:

$$\sum_{k=1}^K w_k (\tilde{R}_k - R_k) \quad (3.14)$$

where $R_k \equiv R_{k,b}$ is the data rate of user k ; $\tilde{R}_k$ is required data rate from user k ; w_k is a weighting factor depending on the priority and class of service the user requires and $0 \leq w_k \leq 1$. Higher values of w_k ensure higher throughput assigned to the user. When $w_k = 0$ the user requirements are neglected. The electrical tilt of the antenna is controlled to optimize the network performance predictively based on solving the following optimization problem:

$$\begin{aligned} \underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \quad & \sum_{k=1}^K w_k (\tilde{R}_k - R_k(\Theta)) \\ \text{subject to} \quad & \theta_{b,\min} \leq \theta_b \leq \theta_{b,\max} \end{aligned} \quad (3.15)$$

where $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_b, \dots, \theta_B)$ is a vector containing the tilt angle of each AP in the network. It must be noted that the optimization problem (3.15) is non-convex and therefore cannot be easily solved

with standard optimization techniques. In [A24] the optimization problem is solved through RL while in [A23] the model and algorithm described in the previous point is applied.

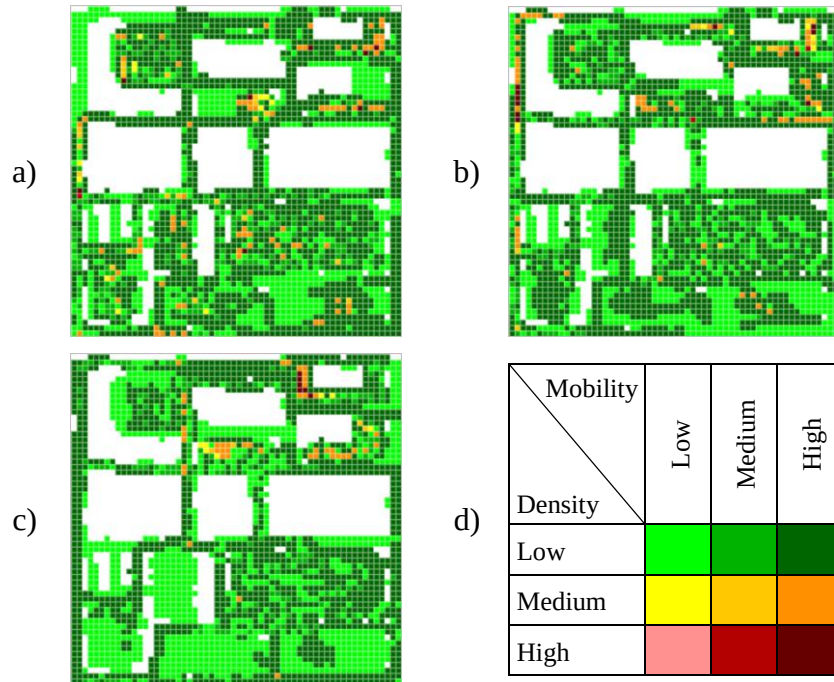


Fig. 3.23 Changes of the UHM in three consecutive time slots [A23]

Figure 3.23 shows how UHM elements change their colors depending on the active user density and user mobility, i.e. representing the UHM dynamics.

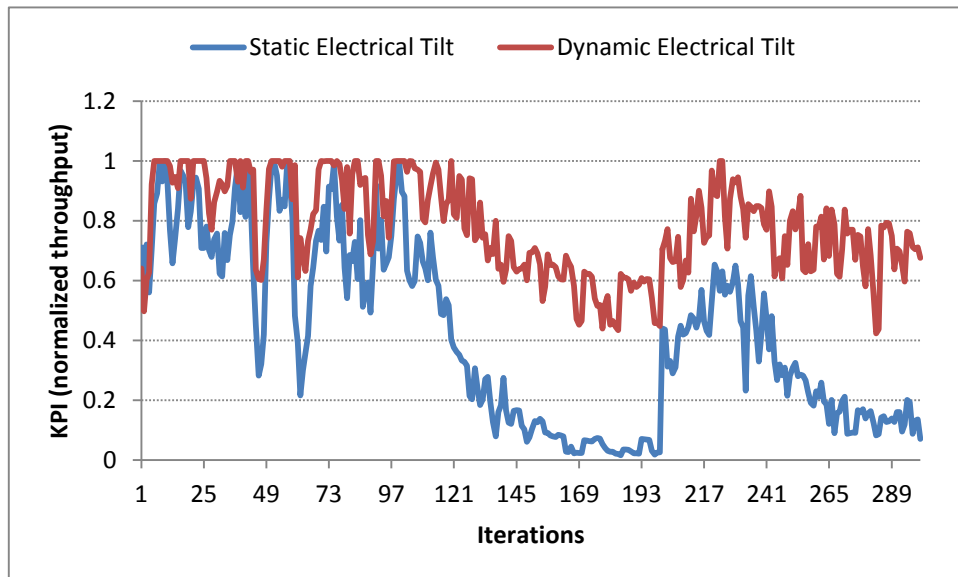


Fig. 3.26 KPI comparison with dynamic and static electrical tilt [A23]

In Figure 3.26 the values of the normalized overall cell throughput used as the KPI are shown in 300 consecutive time slots for two scenarios. The first scenario is with a static electrical tilt set to a value of 15 degrees. The second scenario is with dynamic electrical tilt applying the proposed algorithm with a trained NN.

3.5. Conclusion

Implementing an RF analytics platform, applying adaptive spectrum sensing approaches and predicting user behavior will allow two of the required functionalities to be implemented in the CPWAS shown in Figure 1.6, namely: (a) sensing the environmental parameters, and in particular intelligent sensing and analysis of the spectrum; and (b) flexible management of the performance of the relevant APs and APGs in accordance with the actions and characteristics of the users.

3.6. Contributions to Chapter 3

1. A model has been developed and a platform for collecting "Big RF Data" has been implemented in practice allowing for the use of different types of analytics. The concept of "*RF analytics*" is introduced, reflecting the processing, analysis and extraction of knowledge from large RF data for different purposes. Examples of descriptive, predictive, and prescriptive RF analytics are given related to the determination of the possibilities for using different frequency bands, the efficient use of radio frequency spectrum, the identification of specific interferences, the prediction of the state of the RF environment and the estimation of the utilization of the radio frequency spectrum.
2. A spectrum sensing algorithm offering an optimal compromise between speed and accuracy based on a hybrid approach using simultaneously energy detection and fuzzy logic is proposed. An optimization task has been formulated and solved for balancing the measurement time with the detection accuracy, enabling the efficiency of the energy and cyclo-stationary detectors to be improved. The algorithm has been implemented on a platform for real-time CR experiments and the results obtained are compared with those of relevant analytical or simulation models.
3. An approach to dynamic and proactive optimization of CPWAS performance and capacity is proposed based on the ability to predict user behavior. The approach takes into account the distribution, mobility and activity of users and is based on building UHM at successive time intervals for a given area and predicting the map condition in the next time interval. To avoid storage of big data, to reduce computational complexity and provide real-time performance, the prediction is performed by a NN using UHM data. The approach is demonstrated by a scenario to optimize the total throughput of the cell by controlling the electrical tilt of the antenna of the servicing AP.

CHAPTER 4. Approaches to Resource Management and Realization of 3S Functionalities in ANOS

In this chapter resource management and 3S functionality approaches in ANOS are proposed for the provision of ubiquitous connectivity and the required capacity in CPWAS, i.e. implementation of the concept of hyper-connectivity. They are based on the application of innovative and intelligent methods of resource management (bandwidth, power) and the implementation of 3S and autonomic functionalities in ANOS of CPWAS.

4.1. Approaches for resource management

In this section the possibilities for using some of the existing principles and methods of resource management in HetNets are analyzed. They can be considered as a basis for the development of optimal and adequate resource management approaches with the goal of implementing the concept of hyper-connectivity. Considering the complexity of CPWAS and the need to apply resource management approaches with lower computational complexity, the heuristic optimization algorithm presented in [A27] can be considered an adequate solution. The idea is to associate UEs in groups (UEs with similar properties) to which the same resource management policy can be applied. The proposed method is based on the application of two heuristic procedures. The first is a procedure for classifying groups of UEs according to the SINR that would occur at the input of an AP, i.e. by uplink transmission. The procedure is based on the heuristic association algorithm for solving the p -median problem discussed in Chapter 2, the association being a function of the distribution, location, and required bandwidth of UEs in the cell. In addition, a heuristic generic algorithm is used to determine sets of UEs for which the reduction of the transmission power will result in an increase in the overall throughput of the system without reducing the throughput of the AP. The results of the simulation experiments show that such approaches can reduce the intercellular interference and increase the overall CPWAS capacity without degrading the capacity of the individual APs.

4.1.1. Approaches based on role games

In the context of CPWAS, game theory can provide a set of tools to analyze resource conflicts or, more generally, optimization tasks with multiple conflicting objective functions. Due to the presence of densely deployed and heterogeneous UEs and the requirement to provide ubiquitous and seamless connectivity with limited resources (spectrum and power), the emergence of resource conflict is highly probable. In this case, implementing game theoretic approaches in ANOS is a solution that can provide effective resource management.

In [A28] game theoretic approaches are proposed for power control and interference coordination based on maximizing the reward. Such approaches can be applied to achieve a "balance" between sets of APs and users in the aspect of CPWAS. The challenge to the role-based approach is to find a compromise between satisfying UEs needs, including required capacity and QoS, on the one hand, and easier administration of CPWAS on the other.

A simple example showing the appropriateness of implementing a role-playing approach is set forth in [A29] where the goal is to manage the transmission power of the APs so as to maintain the overall SINR close to its maximum admissible value. The scenario under consideration of relatively small cells may be conceived similar to that of CPWAS. To reduce the dependence of SINR on the load, the proposed [A30] role-playing approach uses a neural classifier for the implementation of dynamic distribution and the Uplink Power Control (UPC), taking into account the distribution, the location and required bandwidth of UEs in the cell. This approach also aims to optimize the energy consumption of the battery of the UE as well as fairness regarding the users in the network.

The proposed approach uses a self-learning neuron classifier for determination of zones and isolines, so that each zone shows the probability distribution of UEs requiring the same service or throughput. As a result of the simulation, the total and average throughput of the cell is obtained,

depending on the different distribution of roles by zones. The results obtained are presented in Figure 4.6, which shows that the average throughput varies within relatively small limits.

In practice, in the proposed role-playing game approach, Stackberg's equilibrium model is applied, with the leader being the AP, and the followers are the zones in the cell. The distribution of roles in zones is the strategy of the followers, while the maintenance of the average bandwidth (Figure 4.6) as close as possible to the maximum possible in the cell, providing a level of intracellular interference below the limit value, as well as fair QoS provision to individual users, is the profit of the leader.

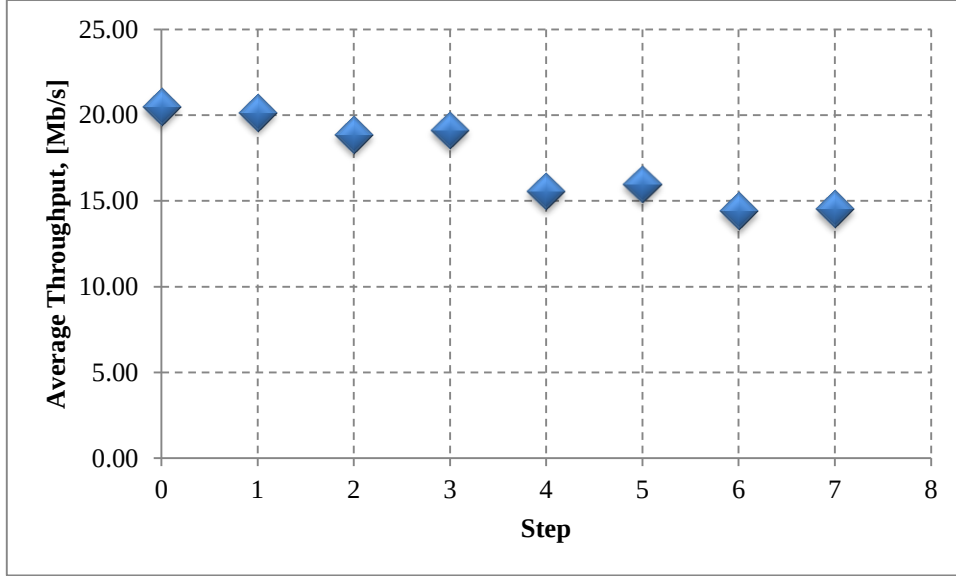


Fig. 4.6 Maximum average cell throughput for each step of the neural classifier [A30]

4.1.2. Approach for resource management based on risk analysis

A mechanism for power and interference management based on a common risk management procedure is proposed in [A31]. It uses a proactive uplink power control and interference algorithm, the operation of which is illustrated by simulation in a simplified HetNet scenario. The results of the simulation experiments show that such an approach could be effectively applied for dynamic and efficient resource management in CPWAS. The proposed approach recognizes that in heterogeneous scenarios and densely deployed APs a new interference environment appears, as interference conditions worsen, especially in dense and unplanned deployments of APs [105]. In such scenarios, there is a significant difference in SINR in the different cells, resulting in different throughput for UEs depending on their location with respect to APs. The risk management procedure is implemented through a proactive resource management scheme in which the APs adjust their transmit power or mode of operation depending on the mutual interference that UEs cause. For the power management mechanism, a modified Open Loop Power Control (OLPC) approach based on the association of UEs in sets is used as proposed in [A4], [A22].

Table 4.3 Results from the implementation of risk assessment algorithm [A31]

Parameter	AER pAP operating mode	ANR pAP operating mode
Damage	25	100
Calculated risk value	40	115
Level of the preventive measures	40%	40%
Overall ranking of the threat	24	69

Table 4.4 Change in the throughput of the sets before and after application of the preventive measures [A31]

ΔThr	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
<i>AER operating mode of the pAP</i>						
ΔThr before, (%)	-12.5	4.6	-16.0	-44.3	-15.3	4.9
ΔThr after, (%)	17.9	1.1	21.5	42.1	17.0	1.3
<i>ANR operating mode of the pAP</i>						
ΔThr before, (%)	-8.9	6.4	-11.5	-28.1	-10.9	-21.9
ΔThr after, (%)	21.5	3.9	26.4	90.1	21.7	74.7

The results from the simulation are given in Table 4.3 and Table 4.4. Table 4.3 gives the results from the implementation of risk assessment algorithm in the “*Active Extended Range*” (AER) and “*Active Normal Range*” (ANR) operating modes of the pico AP (pAP). The value of the “*level of the preventive measures*” is proportional of the percentage of sets of which the compensation factor α is increased. The parameter “*overall ranking of the threat*” determines the risk of the threat – *low*, *medium*, *high* after the application of preventive measures. The scale for the risk value is the following: *Low risk* 10 – 24 (green); *Medium* 25 – 99 (yellow); *High* 100 – 400 (red). In Table 4.4 is shown the change in the throughput of the sets before and after the application of preventive measures.

4.2. Implementation of 3S and autonomic functionalities in CPWAS

The introduction of intelligence in ANOS can be considered as adding a new dimension to resource management within CPWAS. An example of this are the ML approaches used for power and interference management in HetNets [193, 194, 195]. By applying ML to data collected for traffic, network topology, distribution, and dynamics of UEs that are becoming more heterogeneous and dynamically changing in dense and heterogeneous scenarios as expected to be in CPWAS, the throughput of the network can be increased and the necessary conditions for the introduction of SON functionalities can be created.

4.2.1. Implementation of ML for the realization of 3S and autonomic functionalities

The collection and merging of sensor, monitoring and OAM data, their processing and analysis together with algorithms for ML, AI, etc., will allow the implementation of 3S and autonomic functionalities in ANOS and the evolution of CPWAS. In CPWAS, the logic of this autonomy will be placed or stored in a separate plane in ANOS called the “*cognitive plane*” that will interact and control the various communication technologies and devices. An exemplary approach to the

realization of such a cognitive plane is the proposed model in [A33] for the introduction SON characteristics to address the problem of efficient resource utilization and energy saving. The model is developed and its implementation illustrated in [A5]. As a basis for the realization of autonomic functionalities in CPWAS, this work proposes the introduction of a cognitive plane and an ML scheme based on abstraction, modulation, and hierarchy, as shown in Figure 4.11 and Figure 4.12.

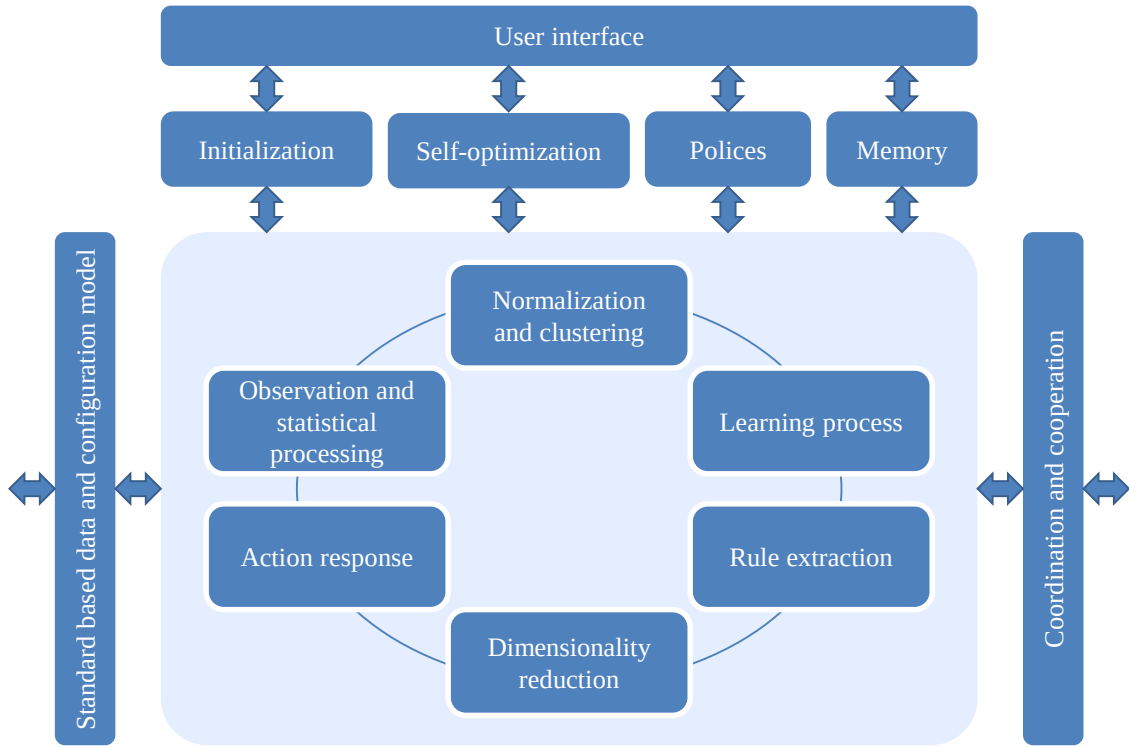


Fig. 4.11 Abstracted cognitive plane [A5]

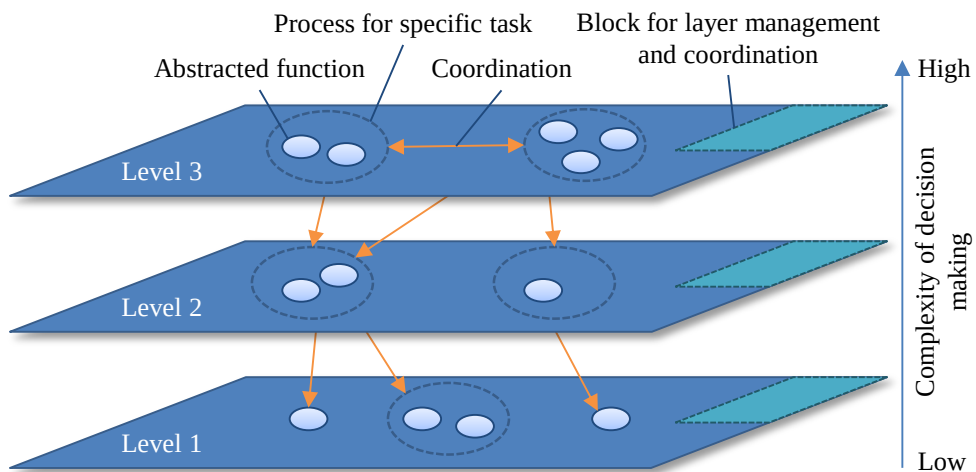


Fig. 4.12 Modular and hierarchical cognition [A5]

Figure 4.13 illustrates the process of observation, learning and self-optimization in the cognitive block of the proposed ML scheme. It is divided into many individual functional steps, which are modular and abstracted from one another.

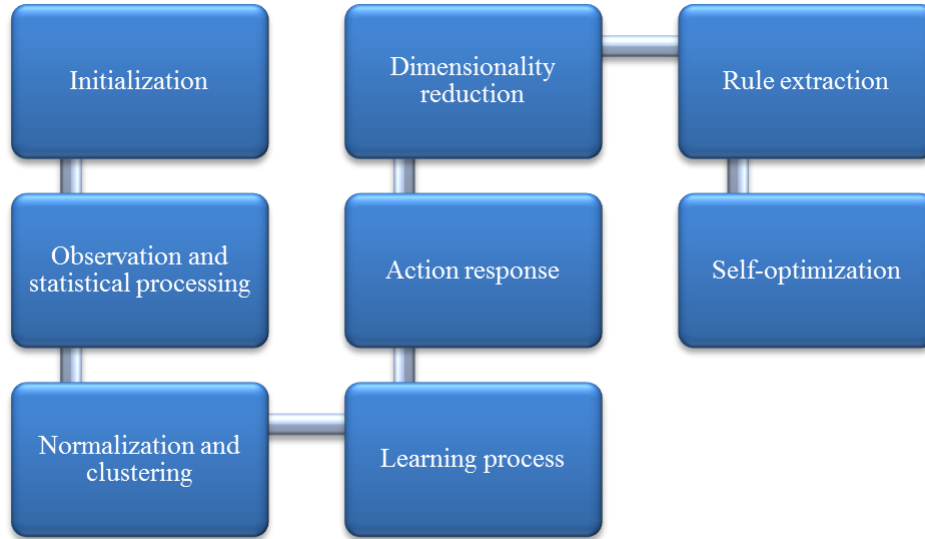


Fig. 4.13 Hierarchy in decision making [A5]

The cognitive steps and blocks of the proposed cognitive plane are as follows:

- *Initialization.* This block defines the parameters, actions, constraints, and target parameters that need to be optimized or monitored.
- *Observation and statistical processing.* Actual learning data is gathered from the UEs observations, the status of CPWAS and the environment. Once the necessary information is collected, analytics are applied and useful information needed for self-learning process in ANOS is extracted from the data.
- *Normalization and clustering.* In order each parameter to have an equal impact to the decision making and similar value ranges, pre-normalization is performed. The data with rather equal values is grouped into clusters to minimize the number of the states in which the CPWAS can be.
- *Learning process (mapping clusters to actions).* An optimal action for each group (cluster) that maximizes the value of target parameter or parameters without violating the constraints should be found.
- *Action response.* This feature is used to predict the next potential system states by monitoring the CPWAS reaction to a given action. One such feature can be gathered by preserving input and output data when a particular action is taken. To find the transition surface of the CPWAS for this action the stored information is interpolated.
- *Dimensionality reduction.* Parameters that do not contribute to the decision-making are removed from the cognitive process.

- *Rule extraction.* After the learning process is completed, useful information on the boundary between different states of action can be extracted. This information can be exchanged (shared) to speed up the self-learning process for other agents or other autonomous functions.
- *Self-optimization.* Based on the information obtained from the previous steps, an easy to understand algorithm for target parameters can be developed.

Having this kind of ML scheme the following advantages are obtained:

- ✓ *Decreased complexity.* One complex optimization problem or task could be solved by many small and simple ML functional steps. Sometimes it is not impossible to develop an optimization algorithm due to the fact that complete knowledge and information about the problem is not available, such as parameter dependencies, ranges and etc. For this reason, assumptions are made to simplify the optimization problem. However, the end result is a complex algorithm that is too difficult to implement, with a high level of determinism and low scalability. By splitting the problem into smaller optimization tasks and solving each one of them by ML algorithms, a solution that is easy to follow and to understand, a solution shaped and adapted using the environmental data generated in the CPWAS;
- ✓ *Reusability.* Usually certain complex problems have similarities. If these similarities are solved with ML and are made abstract, algorithms can be reused to solve other problems and goals;
- ✓ *Flexibility and scalability.* Cognitive algorithms must be easy to manipulate and can be used to increase CPWAS sizes. By creating functional steps with abstract ML algorithms, it will be easy to track the information flow and the decision making process. Also, the created cognitive flow can be easily controlled.

4.2.2. Example of the realization of 3S functionalities

In [A5], implementation of the ML according to the proposed approach is illustrated for the realization of 3S functionalities, in particular for self-configuration in order to ensure maximum throughput and optimization (minimization) of the energy consumed in a HetNet scenario consisting of densely spaced Macro APs (MAPs), Micro APs (mAPs) and pico APs (pAPs). In the proposed scenario, each MAP acts as an agent and controls multiple mAPs/pAPs, the load of which varies overnight.

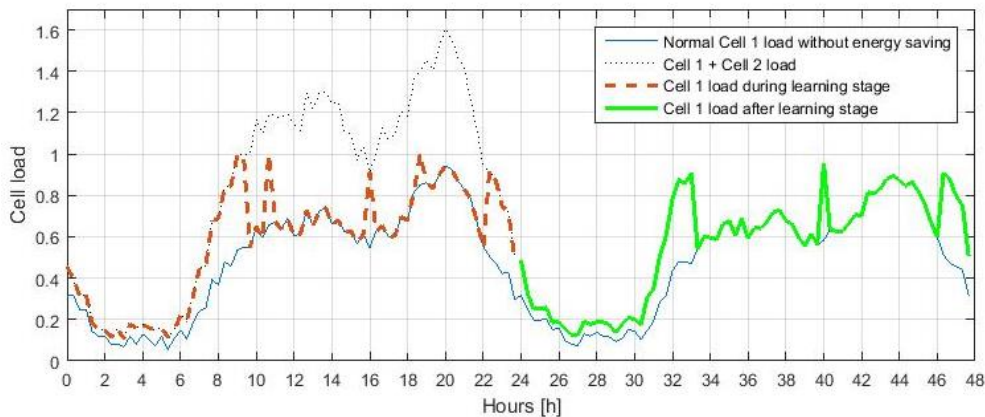


Fig. 4.19 Cell load of receiving AP1 during and after learning process [A5]

From Figure 4.19 we can see the results of the simulation of the operation of two cells AP1 and AP2. The AP1 load is shown during training (day 1) and after training (day 2); what will be the actual workload of AP1 without shutting off AP2; the sum of the loads of the two APs.

Figure 4.20 shows the normalized power consumption of AP2 and the values of the dropped calls. There is a clear distinction between the training and exploitation stages. At the training stage there are three periods when a wrong decision was taken when AP2 was shut down and AP1 did not have the capacity to take over the AP2 load. As a result, the number of call drops exceeds the predetermined normalized threshold. At the stage of operation, the agent (in this case the ANOS) has already learned that in this time periods it is best to apply the "turn on" action. After making the right decision, the higher values of dropped calls are not observed.

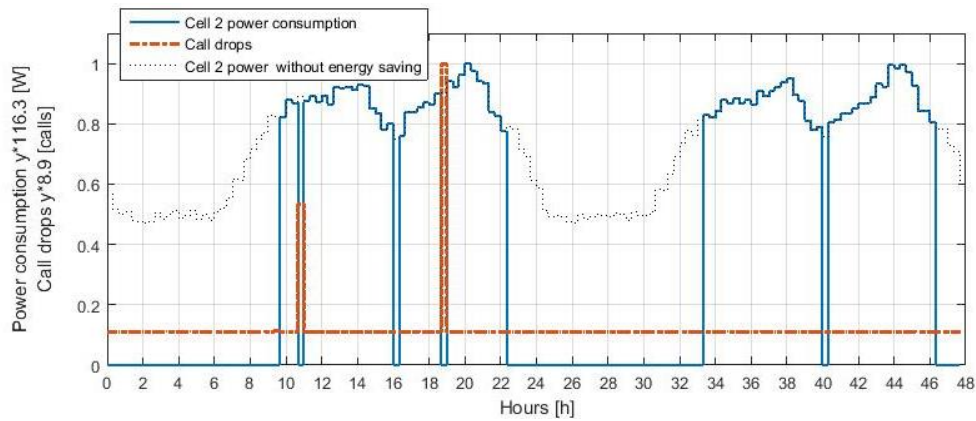


Fig. 4.20 Normalized power consumption of AP2 and call drop values [A5]

Figure 4.21 shows the results of simulating a scenario for energy saving when multiple APs work together. In the first hour, AP1 has enough free capacity, and the algorithm built into the agent decides to exclude an AP, thus increasing the overall AP1 load. After half an hour, another AP is turned off. After 6 hours, as a result of the increased total traffic more APs are included, resulting in the load of AP1 being changed having sawdust character.

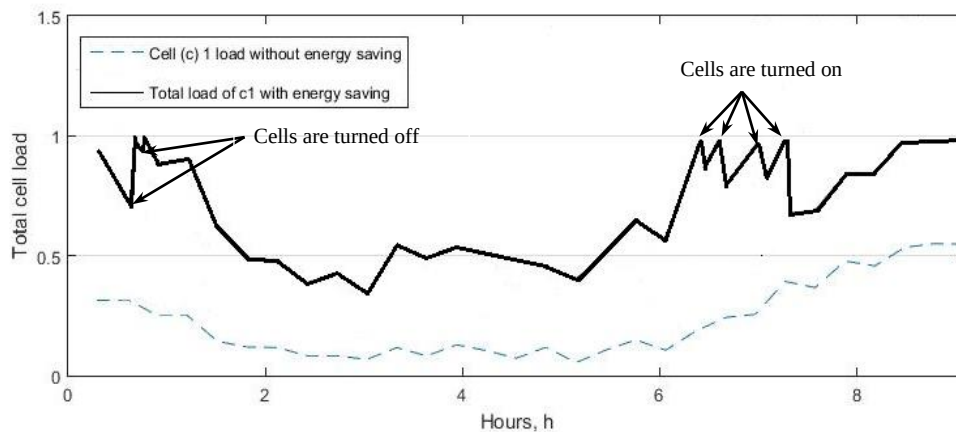


Fig. 4.21 Multi cell energy saving scenario [A5]

4.3. Self-configuration and resource distribution based on a combined approach

In [A34] an algorithm is proposed for self-configuration and self-organization of the allocation of resources in semi-coordinated and uncoordinated HetNet scenarios, combining the knowledge of

UEs location with Q-learning and game theory approaches to improve the dynamic distribution of physical resources during the process of Carrier Aggregation (CA). The approach is based on Markov Decision Processes (MDP), which is used to evaluate the value of the functions $V^\pi(s)$ and $Q^\pi(s, a)$. The value of state s , while performing the policy π , denoted by $V^\pi(s)$, is the expected return on start in s and following π . For MDPs, $V^\pi(s)$ can be formally described as:

$$V^\pi(s) = E_\pi\{R_t|s_t = s\} = E_\pi\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1}|s_t = s\right\} \quad (4.13)$$

where $E_\pi\{\}$ is the expected value in case, that the agent follows the policy π , t is the time step, γ is the discount rate.

Similarly, the value $Q^\pi(s, a)$ of the action a in the state s when applying the policy π is defined as the expected return, which is obtained on start s , taking action a and following policy π e.g.

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi\{R_t|s_t = s, a_t = a\} = E_\pi\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1}|s_t = s, a_t = a\right\} \quad (4.14)$$

By using the probabilities of any possible next state s' ($P''_{ss'}$) and the expected value for the next reward $R''_{ss'}$, the relationship between the value of a given state and the values of the subsequent states can be expressed as shown in equations (4.15) and (4.16):

$$V^\pi(s) = E_\pi\{r_{t+1} + \gamma V^\pi(s')|s_t = s\} = \sum_a \pi(s, a) \sum_{s'} P''_{ss'} [R''_{ss'} + \gamma V^\pi(s')] \quad (4.15)$$

$$Q^\pi(s) = E_\pi\{r_{t+1} + \gamma V^\pi(s')|s_t = s, a_t = a\} \quad (4.16)$$

For a method such as Q-learning, the best policy or optimal policy that will give the maximum reward or the best value for $Q^\pi(s)$ has to be found. This can be expressed as:

$$Q^*(s) = \max_{\pi} Q^\pi(s) = \sum_{s'} P''_{ss'} [R''_{ss'} + \gamma \max_a Q^*(s', a')] \quad (4.17)$$

The update of the function determining the value of the action is:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \delta [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (4.18)$$

where $Q(s_t, a_t)$ is the last updated function of the action; r_{t+1} is the reward for taking action a_t in state s_{t+1} ; $\max_a Q(s_{t+1}, a)$ is the maximum action value that can be obtained in state s_{t+1} ; δ is the rate of renewal; γ is the discount rate. In this case, the learned or updated function $Q(s_t, a_t)$ directly approaches the optimal action-value function $Q^*(s)$, regardless of the policy that follows. This greatly simplifies the analysis of the algorithm and allows proving its early convergence.

The proposed algorithm is based on Q-learning reinforced by a gaming approach to ensure fairness and cooperation between APs. The algorithm uses the approximate location of UEs to differentiate their actions by areas. The initial results for the efficiency of this algorithm, in terms of the throughput of UEs and APs, are presented in [A35].

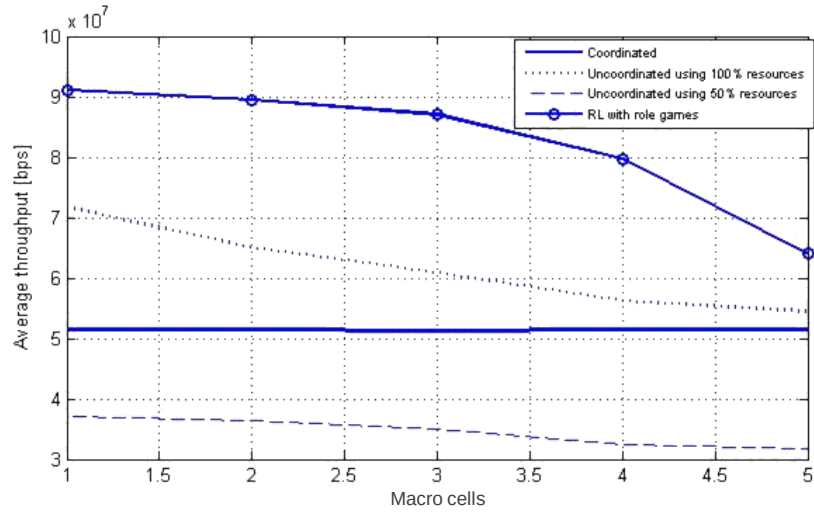


Fig. 4.24 Average throughput of MAP [A34]

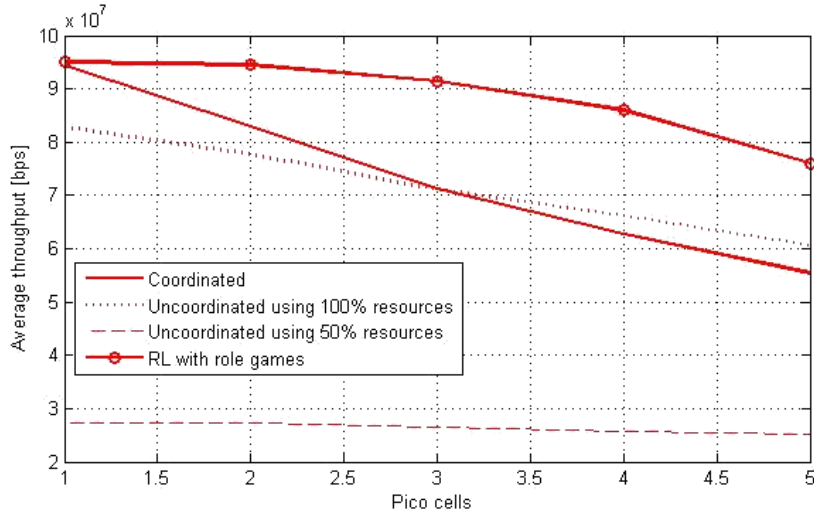


Fig. 4.25 Average throughput of pAPs [A34]

It can be seen from Figure 4.24 that the application of such a combined RL algorithm with role games has a significant effect on the average bandwidth of MAPs. Figure 4.25 shows that the average throughput of pAP using the RL algorithm is greater than the rest but also slows down as when applying a coordinated approach.

4.4. Conclusion

This chapter proposes approaches for efficient resource management and the realization of 3S functionalities in ANOS with low computational complexity with the goal to provide ubiquitous connectivity and the required capacity in CPWAS, i.e. approaches that can contribute to the realization of the concept of hyper-connectivity. The proposed resource management approaches are in the context of the general concept of functioning of AN in SC and its modeling as CPWAS presented in Chapter 1 as well as the schemes described in Chapter 2 and Chapter 3, for grouping of APs, UEs association, data analysis and contextualization of user behavior.

4.5. Contributions to Chapter 4

1. An approach to dynamic resource management in CPWAS is proposed, based on a role-game approach with maximizing the reward. In CPWAS scenarios, the reward is the total capacity of APs that can be increased by achieving a "balance" between the SINRs that APs can provide to UEs on the one hand, and on the other, providing the required throughput and ubiquitous connectivity. To implement effective power management and reduce the dependence of the SINR on the APs load and easier CPWAS administration, it is suggested the roles in the game approach to be defined using a neuron classifier, taking into account the distribution, location and required throughput of UEs in the APs coverage area.
2. In CPWAS, the nature of the interference environment is constantly changing, depending on the distribution, location and dynamics of UEs, with respect to the set of heterogeneous and densely spaced APs. Based on the fact that under such a scenario there are conditions under which SINR may deteriorate unacceptably, an approach to dynamic and effective resource management based on risk analysis and risk modeling is proposed. In its core is the implementation of a proactive interference management mechanism based on a general procedure for adjusting the transmit power and/or operating mode of the APs, depending on the mutual interferences that UEs can cause each other.
3. A method of the realization of 3S and autonomic functionalities in CPWAS is proposed in which the autonomy logic is placed in a single cognitive plane in ANOS, which has to interact with and control the various communication technologies and devices. The basis of the proposed method is the application of a ML scheme based on abstraction, modularity and hierarchy, as well as adaptation by training from pre-processed data generated by the network.
4. A method for self-configuration and self-organization of the resource allocation in CPWAS based on a combined algorithm including Q-learning enhanced by a role-playing approach is proposed. The work of the algorithm uses a semi-coordinated principle to ensure fairness and cooperation between APs in order to free resources and increase average throughput. The knowledge of the distributions and dynamics of UEs is used to predict their location and to divide the APs service area into sectors while taking into consideration what resources each AP uses and the interferences it receives. Different roles are assigned to the sectors to achieve the optimal level of satisfaction (or predefined QoS) of the UEs in each sector. Each role is a function of the used resources, the possibility of releasing resources for use by other APs, and the interferences that each of the sectors generate.

III. CONCLUSION AND MAJOR CONTRIBUTIONS

The topic of this dissertation is related to proposing approaches for provision of ubiquitous connectivity and efficient resource management in user-centric, ultra-dense unified wireless ANs. Such ANs scenarios are expected to arise in future SCs for which the main characteristics will be the heterogeneity of UEs and APs, their dense location and high dynamics. The dissertation proposes new approaches, the implementation of which will provide ubiquitous access and connectivity to UEs as well as the utilization and management of the limited communication resources in the wireless access through which the sense of an "endless capacity" will be provided to the users irrespective of their type, number of unit area and their movement.

Summing up the findings of the dissertation, it can be assumed that the stated goal is realized through the fulfillment of the assigned tasks, as a result of which the following significant scientific and applied results have been achieved:

1. An analysis of the development of the ANs has been made based on which reasoned conclusions are drawn about the impossibility of the NGA based on HetNets and 5G wireless networks to meet the requirements imposed by a hyperlinked, diverse, and dynamic access scenario such as is the one in a SC of the future.
2. The major characteristics of the AN in future SCs are defined, based on which the concept of the structure and functionality of the AN and its evolution towards the so-called cell-less Unified Wireless Access (UWA) is introduced.
3. Based on a comparative assessment of the characteristics and functionality of the UWA with those of a large scale CPS, a new approach to modeling and analyzing the performance of such access architecture, called CPWAS, is proposed. The approach follows the concepts of building and operation of large scale CPS.
4. A model for proactive dynamic association of users and grouping of APs with low computational complexity based on the theory of graphs was developed by defining two basic properties of APs: *Attraction rate and Saturation rate*. An objective function for dynamic association and grouping is defined, based on static and dynamic components, and an optimization task for dynamic user association and AP grouping is formulated. To solve the optimization task, a heuristic algorithm for association and grouping has been proposed and developed, combining the advantages of *Heuristic Concentration, Linear Programming and Graph Theory*. The performance of the developed algorithm is illustrated by a simulation experiment for dynamically associating users for service to certain APs and/or APGs.
5. A method using a heuristic approach based on a partnership model, that can be applied to detect and connect communication nodes in large-scale, unstructured and resource-constrained environments with a view to collectively utilize the available resources is proposed. The method is used in connection with the need to solve a complex optimization task in an exponentially growing search space, such as the space of CPWAS. In such a complex AN, the number and parameters of users are changing very dynamically with respect to the densely distributed APs, thus the association node search space is changing extremely fast and can grow. The partnership model is based on finding a communication node that has the required set of desired resource attributes in accordance with the requests by another node for the delivery of a service or application. The performance of the model is illustrated by a simulated algorithm. The main advantage of using such a heuristic approach is that it allows the definition of different performance indicators or metrics to facilitate the process of user association and providing connectivity in a dynamic system such as CPWAS.
6. An approach is proposed for the association of one user to more than one AP or to a group of cooperating APs that can provide optimal and effective CPWAS functionality as a user-centric unified cell-less access network in which the density of APs is comparable to user density. The application of such an approach will allow a user to be associated and connected to a group of several cooperating APs to provide the requested throughput or QoS. The approach is analytical and is based on the capabilities of implementing a cooperative strategy to provide a higher probability of coverage of APs and the realization of optimal and ubiquitous connectivity of users through a dynamic organization of APG. The advantage of the proposed approach is that it

uses criteria based on both the connectivity and coverage that each AP can provide and ensure, as well as its impact on the overall spectral and energy efficiency of the system.

7. A model has been developed and a platform for collecting "Big RF Data" has been implemented in practice allowing for the use of different types of analytics. The concept of "*RF analytics*" is introduced, reflecting the processing, analysis and extraction of knowledge from large RF data for different purposes. Examples of descriptive, predictive, and prescriptive RF analytics are given related to the determination of the possibilities for using different frequency bands, the efficient use of radio frequency spectrum, the identification of specific interferences, the prediction of the state of the RF environment and the estimation of the utilization of the radio frequency spectrum.
8. A spectrum sensing algorithm offering an optimal compromise between speed and accuracy based on a hybrid approach using simultaneously energy detection and fuzzy logic is proposed. An optimization task has been formulated and solved for balancing the measurement time with the detection accuracy, enabling the efficiency of the energy and cyclo-stationary detectors to be improved. The algorithm has been implemented on a platform for real-time CR experiments and the results obtained are compared with those of relevant analytical or simulation models.
9. An approach to dynamic and proactive optimization of CPWAS performance and capacity is proposed based on the ability to predict user behavior. The approach takes into account the distribution, mobility and activity of users and is based on building UHM at successive time intervals for a given area and predicting the map condition in the next time interval. To avoid storage of big data, to reduce computational complexity and provide real-time performance, the prediction is performed by a NN using UHM data. The approach is demonstrated by a scenario to optimize the total throughput of the cell by controlling the electrical tilt of the antenna of the servicing AP.
10. An approach to dynamic resource management in CPWAS is proposed, based on a role-game approach with maximizing the reward. In CPWAS scenarios, the reward is the total capacity of APs that can be increased by achieving a "balance" between the SINRs that APs can provide to UEs on the one hand, and on the other, providing the required throughput and ubiquitous connectivity. To implement effective power management and reduce the dependence of the SINR on the APs load and easier CPWAS administration, it is suggested the roles in the game approach to be defined using a neuron classifier, taking into account the distribution, location and required throughput of UEs in the APs coverage area.
11. In CPWAS, the nature of the interference environment is constantly changing, depending on the distribution, location and dynamics of UEs, with respect to the set of heterogeneous and densely spaced APs. Based on the fact that under such a scenario there are conditions under which SINR may deteriorate unacceptably, an approach to dynamic and effective resource management based on risk analysis and risk modeling is proposed. In its core is the implementation of a proactive interference management mechanism based on a general procedure for adjusting the transmit power and/or operating mode of the APs, depending on the mutual interferences that UEs can cause each other.
12. A method of the realization of 3S and autonomic functionalities in CPWAS is proposed in which the autonomy logic is placed in a single cognitive plane in ANOS, which has to interact with and control the various communication technologies and devices. The basis of the

proposed method is the application of a ML scheme based on abstraction, modularity and hierarchy, as well as adaptation by training from pre-processed data generated by the network.

13. A method for self-configuration and self-organization of the resource allocation in CPWAS based on a combined algorithm including Q-learning enhanced by a role-playing approach is proposed. The work of the algorithm uses a semi-coordinated principle to ensure fairness and cooperation between APs in order to free resources and increase average throughput. The knowledge of the distributions and dynamics of UEs is used to predict their location and to divide the APs service area into sectors while taking into consideration what resources each AP uses and the interferences it receives. Different roles are assigned to the sectors to achieve the optimal level of satisfaction (or predefined QoS) of the UEs in each sector. Each role is a function of the used resources, the possibility of releasing resources for use by other APs, and the interferences that each of the sectors generate.

IV. LIST OF ABBREVIATIONS

3C	Computation, Communications and Control	LTE-A	Long Term Evolution Advanced
3S	Self-configuration, Self-organization and Self-optimization	LV	Lotka-Volterra
5G	5th Generation	M2M	Machine-to-Machine
AER	Active Extended Range	MAP	Macro Access Point
AI	Artificial Intelligence	mAP	micro Access Point
AN	Access Network	MDP	Markov Decision Processes
ANOS	Access Network Operating System	MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
ANR	Active Normal Range	ML	Machine Learning
AP	Access Point	NGA	Next Generation Access
APG	Access Point Group	NG-PON	Next-Generation Passive Optical Network
BD	Big Data	NN	Neural Network
BS	Base Station	OAM	Operation, Administration & Maintenance
CA	Carrier Aggregation	OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access	OLPC	Open Loop Power Control
CPS	Cyber Physical System	OPL	Optimum Level of Performance
CPWAS	Cyber Physical Wireless Access System	pAP	pico Access Point
CR	Cognitive Radio	QoE	Quality of Experience
C-RAN	Centralized, Collaborative, Cloud and Clean Radio Access Network	QoS	Quality of Service
DCI	Dynamic Control Impact	RF	Radio Frequency
DSSS	Direct Spread Spectrum Signals	RL	Reinforcement Learning
EE	Energy Efficiency	SC	Smart City
eNB	evolved Node Base	SDR	Software Defined Radio
FL	Fuzzy Logic	SE	Spectral Efficiency
GSM	Global System for Mobile communication	SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
HetNet	Heterogeneous Network	SNR	Signal to Noise Ratio
IoT	Internet of Things	SON	Self Organizing Networks
IQ	In-phase Quadrature	UCN	User-Centric Network
KPI	Key Performance Indicator	UDH	Ultra Dense Heterogeneous
		UE	User Equipment
		UHM	User Heat Map

UMTS Universal Mobile Telecommunications
 System
UPC Uplink Power Control

UWA Unified Wireless Architecture
UWAN Unified Wireless Access Network
VNC Virtual Network Core

V. LIST OF AUTHOR PUBLICATIONS

- [A1] T. Kyoseva, V. Poulkov, M. Mihaylov, A. Mihovska, “Disruptive innovations as a driving force for the change of wireless telecommunication infrastructures”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 78, no. 3, pp. 1683-1697, 2014, DOI: 10.1007/s11277-014-1902-0.
- [A2] O. Asenov, V. Poulkov, “Multimedia and Network Quality of Service”, in *Communications, Navigation, Sensing and Services*, L. P. Ligthart, R. Prasad (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2013, pp. 115-139, ISBN: 978-87-92982-39-1.
- [A3] O. Asenov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, “An Approach to Resource Management in Future Internet”, in *Resource Management in Future Internet*, R. Prasad (Ed.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2015, pp. 185-209, ISBN: 978-87-93102-45-3.
- [A4] P. Koleva, V. Poulkov, O. Asenov, “Resource Management Based on Dynamic Users Association for Future Heterogeneous Telecommunication Access Infrastructures”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 78, no. 3, pp. 1595-1611, 2014, DOI: 10.1007/s11277-014-1911-z.
- [A5] P. Semov, H. Al-Shatri, K. Tonchev, V. Poulkov, A. Klein, “Implementation of Machine Learning for Autonomic Capabilities in Self-Organizing Heterogeneous Networks”, *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 149-168, 2017, DOI: 10.1007/s11277-016-3843-2.
- [A6] V. Poulkov, “The Wireless Access for Future Smart Cities as a Large Scale Complex Cyber Physical System”, *Springer, Wireless Personal Communications*, pp. 1-15 (First Online: 03 April 2019), 2019, DOI: 10.1007/s11277-019-06343-9.
- [A7] V. Poulkov, “Beyond the Next Generation Access”, in *Wireless World in 2050 and Beyond: A Window into the Future!*, R. Prasad, S. Dixit (Eds.), Springer Series in Wireless Technology, Springer, 2016, pp. 17-39, DOI: 10.1007/978-3-319-42141-4_3.
- [A8] V. Poulkov, “The Unified Wireless Smart Access for Smart Cities in the Context of a Cyber Physical System”, in *Proceedings of Global Wireless Summit (GWS)*, Cape Town, South Africa, 15-18 October 2017, pp. 12-16, DOI: 10.1109/GWS.2017.8300499.
- [A9] A. Manolova, V. Poulkov, K. Tonchev, “Challenges in the Design of Smart Vehicular Cyber Physical Systems with Human in the Loop”, in *Breakthroughs in Smart City Implementation*, L. P. Ligthart, R. Prasad (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2017, pp. 165-186, ISBN: 978-87-99932-72-4.
- [A10] O. Asenov, P. Koleva, V. Poulkov, “Quality Improvement of Generic Services by Applying a Heuristic Approach”, in *Convergence of Communications, Navigation, Sensing and Services*, L. Ligthart, R. Prasad (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2014, pp. 91-125, ISBN: 978-87-93102-76-7.
- [A11] V. Poulkov, “Dynamic Access Points Grouping for Mobility Driven User-Centric Wireless Networks”, in *Proceedings of Global Wireless Summit (GWS)*, 25-28 November 2018, Chiang Rai, Thailand, Thailand, pp. 110-113, DOI: 10.1109/GWS.2018.8686595.
- [A12] M. Gechev, S. Kasabova, A. Mihovska, V. Poulkov, R. Prasad, “Node Discovery and Interpretation in Unstructured Resource-Constrained Environments”, in *Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (Wireless VITAE)*, 11-14 May 2014, Aalborg, Denmark, pp. 1-5, DOI: 10.1109/VITAE.2014.6934457.

- [A13] S. Kasabova, M. Gechev, V. Vasilev, A. Mihovska, V. Poulkov, R. Prasad, "On Modeling the Psychology of Wireless Node Interactions in the Context of Internet of Things", *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 85, no. 1, pp. 101-136, 2015, DOI: 10.1007/s11277-015-2730-6.
- [A14] V. Vasilev, G. Iliev, V. Poulkov, A. Mihovska, "Optimization of Wireless Node Discovery in an IoT Network", in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (Workshop on Optimizing Heterogeneous Networking Technologies for the Internet of Things)*, 6-10 December 2015, pp. 1-5. San Diego, California, USA, DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414153.
- [A15] S. Samal, S. Bandopadhyaya, S. Dora, V. Poulkov, "Coverage Analysis of Heterogeneous Wireless Network with n-Interacted Transmission Nodes", *IGI Global, International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*, vol. 9, no. 4, pp. 49-58, 2017, DOI: 10.4018/IJITN.2017100106.
- [A16] S. Bandopadhyaya, S. Samal, S. Dora, V. Poulkov, "Base Station Transmission Power Optimization in Interference-Limited Cellular Networks for Maximum Energy Efficiency", in *Proceedings of International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, October 2017, Nish, Serbia, pp. 228-231, DOI: 10.1109/TELSKS.2017.8246269.
- [A17] T. Cooklev, V. Poulkov, I. Iliev, D. Bennett, K. Tonchev, "Enabling RF Data Analytics Services and Applications via Cloudification", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, no. 5-6, pp. 44-55, 2018, DOI: 10.1109/MAES.2018.170108.
- [A18] I. Iliev, B. Bonev, K. Angelov, P. Petkov, V. Poulkov, "Interference Identification based on Long Term Spectrum Monitoring and Cluster Analysis", in *Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Varna, Bulgaria, 6-9 June 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2016.7901562.
- [A19] P. Baltiiski, I. Iliev, B. Kehaiov, V. Poulkov, T. Cooklev, "Long-Term Spectrum Monitoring with Big Data Analysis and Machine Learning for Cloud-Based Radio Access Networks", *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 87, no. 3, pp. 815-835, 2016, DOI: 10.1007/s11277-015-2631-8.
- [A20] A. Ivanov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, "Hybrid Accuracy-Time Trade-off Solution for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks", *Inderscience Enterprises Ltd., International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, 2019, DOI: 10.1504/IJMNDI.2019.098223.
- [A21] A. Ivanov, A. Mihovska, K. Tonchev, V. Poulkov, "Real-Time Adaptive Spectrum Sensing for Cyclostationary and Energy Detectors", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, no. 5-6, pp. 20-33, May-June 2018, DOI: 10.1109/MAES.2018.170098.
- [A22] P. Koleva, V. Poulkov, O. Asenov, P. Semov, "Improved Open Loop Power Control for LTE Uplink", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Berlin, Germany, 9-11 July 2015, pp. 1-5, DOI: 10.1109/TSP.2015.7296456.
- [A23] P. Semov, P. Koleva, N. Dandanov, V. Poulkov, O. Asenov, "Performance Optimization in Heterogeneous Wireless Access Networks Based on User Heat Maps", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Athens, Greece, 4-6 July 2018, pp. 732-736, DOI: 10.1109/TSP.2018.8441319.
- [A24] N. Dandanov, H. Al-Shatri, H., A. Klein, V. Poulkov, "Dynamic self-optimization of the antenna tilt for best trade-off between coverage and capacity in mobile networks", *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 251-278, January 2017, DOI: 10.1007/s11277-016-3849-9.
- [A25] V. Poulkov, "Wireless Access Networks in Future Smart Cities and Data Driven Business Opportunities", in *Towards Future Technologies for Business Ecosystem Innovation*, R. Prasad, L. P. Ligthart (Eds.), Aalborg, Denmark: River Publishers, 2018, pp. 21-40, ISBN: 978-87-93609-77-8.

- [A26] H. Gochev, V. Poulkov, G. Iliev, "Improving cell edge throughput for LTE using combined uplink power control", *Springer, Telecommunication Systems*, vol. 52, no. 3, pp. 1541-1547, March 2013, DOI: 10.1007/s11235-011-9521-5.
- [A27] O. Asenov, P. Koleva, V. Poulkov, "Heuristic Approach to Dynamic Uplink Power Control in LTE", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2-4 July 2013, Rome, Italy, pp. 235-238, DOI: 10.1109/TSP.2013.6613927.
- [A28] V. Poulkov, „Game Approach to Power Control and Interference Coordination in Next Generation Telecommunication Networks“, *Monography, Publishing House of TU-Sofia*, 2011, ISBN: 978-954-438-918-5 (in Bulgarian).
- [A29] V. Poulkov, P. Koleva, O. Asenov, G. Iliev, "Combined power and inter-cell interference control for LTE based on role game approach", *Springer, Telecommunication Systems*, vol. 55, no. 4, pp. 481-489, April 2014, DOI: 10.1007/s11235-013-9803-1.
- [A30] P. Koleva, O. Asenov, G. Iliev, V. Poulkov, "Interference Limited Uplink Power Control Based on a Cognitive Approach", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic, 3-4 July 2012, pp. 242-246, DOI: 10.1109/TSP.2012.6256290.
- [A31] P. Koleva, P. Semov, O. Asenov, V. Poulkov, "Risk Assessment Based LTE HetNet Uplink Power and Interference Control", in *Proceedings of International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic, 9-11 July 2015, pp. 210-214, DOI: 10.1109/TSP.2015.7296254.
- [A32] P. Semov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, "Increasing Throughput and Fairness for Users in Heterogeneous Semi Coordinated Deployments", in *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Istanbul, Turkey, 6-9 April 2014, pp. 40-45, DOI: 10.1109/WCNCW.2014.6934858.
- [A33] P. Semov, P. Koleva, K. Tonchev, V. Poulkov, A. Mihovska, "Autonomous learning model for achieving multi cell load balancing capabilities in HetNet", in *Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Varna, Bulgaria, 6-9 June 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2016.7901602.
- [A34] P. Semov, V. Poulkov, A. Mihovska, R. Prasad, "Self-Resource Allocation and Scheduling Challenges for Heterogeneous Networks Deployment", *Springer, Wireless Personal Communications*, vol. 87, no. 3, pp. 759-777, April 2016, DOI: 10.1007/s11277-015-2640-7.
- [A35] P. Semov, A. Mihovska, R. Prasad, V. Poulkov, "Use of positioning information for performance enhancement of uncoordinated heterogeneous network deployment", in *Proceedings of Wireless VITAE*, Atlantic City, NJ, USA, 24-27 June 2013, pp. 1-6, DOI: 10.1109/VITAE.2013.6617069.

VI. REFERENCES

- [1] Thomson Reuters, "The World in 2025: 10 Predictions of Innovation", Technical Report, 2014. [Online]. <https://www.slideshare.net/sustainablebrands/the-world-in-2025-10-predictions-of-innovation>
- [7] M. Maier, "Fiber-Wireless (FiWi) Broadband Access Networks in an Age of Convergence: Past, Present, and Future", *Hindawi Journal, Advances in Optics*, Article ID 945364, June 2014, DOI: 10.1155/2014/945364.
- [8] N. Ghazisaidi and M. Maier, "Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities", *IEEE Network*, vol. 25, no. 1, pp. 36-42, January-February 2011, DOI: 10.1109/MNET.2011.5687951.
- [24] T. Han, G. Mao, Q. Li, L. Wang, and J. Zhang, "Interference Minimization in 5G Heterogeneous Networks", *Springer Journal, Mobile Networks and Applications*, vol. 20, no. 6, pp. 756-762, December 2015, DOI: 10.1007/s11036-014-0564-1.
- [27] T. Han, Y. Yang, X. Ge, and G. Mao, "Mobile converged networks: framework, optimization, and challenges", *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 34-40, December 2014, DOI: 10.1109/MWC.2014.7000969.

- [28] P. Lynggaard and K. E. Skouby, "Deploying 5G-Technologies in Smart City and Smart Home Wireless Sensor Networks with Interferences", *Springer Journal, Wireless Personal Communications*, vol. 81, no. 4, pp. 1399-1413, April 2015, DOI: 10.1007/s11277-015-2480-5.
- [29] A. Cimmino, T. Pecorella, R. Fantacci, F. Granelli, T. F. Rahman, C. Sacchi, C. Carlini, and P. Harsh, "The role of small cell technology in future Smart City applications", *John Wiley & Sons, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 11-20, January 2014, DOI: 10.1002/ett.2766.
- [30] F. Giust, L. Cominardi, and C. J. Bernardos, "Distributed mobility management for future 5G networks: overview and analysis of existing approaches", *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 142-149, January 2015, DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010527.
- [31] X. Ge, J. Ye, Y. Yang, and Q. Li, "User Mobility Evaluation for 5G Small Cell Networks Based on Individual Mobility Model", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 528-541, March 2016, DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525439.
- [32] T. Han, X. Ge, L. Wang, K. S. Kwak, Y. Han, and X. Liu, "5G Converged Cell-Less Communications in Smart Cities", *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 44-50, March 2017, DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600256CM.
- [35] X. Wang, X. Li, and V. C. M. Leung, "Artificial Intelligence-Based Techniques for Emerging Heterogeneous Network: State of the Arts, Opportunities, and Challenges", *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1379-1391, 2015, DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2467174.
- [36] R. Prasad, "Future networks and technologies supporting Innovative communications", in *Proceedings of IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC)*, Beijing, China, 21-23 September 2012, pp. 4-6, DOI: 10.1109/ICNIDC.2012.6418846.
- [37] M. K. Weldon, *The Future X Network: A Bell Labs Perspective*. CRC Press, March 2016, ISBN: 9781498779142.
- [38] H. Gill, "A Continuing Vision: Cyber-Physical Systems", in *Proceedings of Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry*, Pittsburgh, PA, USA, 10-11 March 2008.
- [39] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems", *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, January 2017, DOI: 10.1109/JAS.2017.7510349.
- [40] S. Engell, "Cyber-physical Systems of Systems - Definition and core research and innovation areas", Working Paper of the Support Action CPSoS, October 2014. [Online]. <http://www.cpsos.eu/wp-content/uploads/2015/07/CPSoS-Scope-paper-vOct-26-2014.pdf>
- [75] M. J. Varnamkhasti, "Overview of the Algorithms for Solving the P-Median Facility Location Problems", *Hikari Journal, Advanced Studies in Biology*, vol. 4, no. 2, pp. 49-55, 2012.
- [77] J. E. Beasley, "A note on solving large p-median problems", *Elsevier, European Journal of Operational Research*, vol. 21, no. 2, pp. 270-273, August 1985, DOI: 10.1016/0377-2217(85)90040-2.
- [93] J. M. Gottman, J. D. Murray, C. C. Swanson, R. Tyson, and K. R. Swanson, *The Mathematics of Marriage: Dynamic Nonlinear Models*. A Bradford Book, MIT Press, January 2005, ISBN: 9780262572309.
- [105] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, G. d. l. Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek, and J. Zhang, "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 22-30, June 2011, DOI: 10.1109/MWC.2011.5876497.
- [129] H. Hu, Y. Wen, T.-S. Chua, and X. Li, "Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial", *IEEE Access*, vol. 2, pp. 652-687, June 2014, DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2332453.
- [193] S. Deb and P. Monogioudis, "Learning-Based Uplink Interference Management in 4G LTE Cellular Systems", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, no. 2, pp. 398-411, April 2015, DOI: 10.1109/TNET.2014.2300448.
- [194] M. Bennis and D. Niyato, "A Q-learning based approach to interference avoidance in self-organized femtocell networks", in *Proceedings of IEEE Globecom Workshops*, Miami, FL, USA, 6-10 December 2010, pp. 706-710, DOI: 10.1109/GLOCOMW.2010.5700414.
- [195] A. Alsarhan and A. Agarwal, "Spectrum sharing in multi-service cognitive network using reinforcement learning", in *Proceedings of First UK-India International Workshop on Cognitive Wireless Systems (UKIWCWS)*, New Delhi, India, 10-12 December 2009, pp. 1-5, DOI: 10.1109/UKIWCWS.2009.5749427.