ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА“ТЕОРЕТИЧНА И ИЗМЕРВАТЕЛНА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА”

маг. инж. Вяра Йорданова Василева

ПРОЕКТИРАНЕ НА SMART АНТЕНА ЗА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИИ

А В Т О Р Е ФЕ Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и научна степен “ДОКТОР”

Научна специалност: ”Теоретична електротехника”
шифър: 02.04.01

Научен ръководител: доц. д-р инж. Сава Василев Савов

Рецензенти:

1. .....
2. .....

Варна
2014

Дисертационният труд е обсъден на 29.04.2014 г. в катедра "Теоретична и измервателна електротехника" на разширен катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № 143 / 02.04.2014 г. и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра "Теоретична и измервателна електротехника".

Автор: маг. инж. Вяра Йорданова Василева

Заглавие: Проектиране на smart антена за безжични комуникации

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА“ТЕОРЕТИЧНА И ИЗМЕРВАТЕЛНА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА”

маг. инж. Вяра Йорданова Василева

ПРОЕКТИРАНЕ НА SMART АНТЕНА ЗА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и научна степен “ДОКТОР”

Варна
2014

Дисертационният труд съдържа 160 страници, включително 75 фигури, 33 таблици и 2 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 135 заглавия, от които 135 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... г. от ..... ч. в .....…..... на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № ..... / ..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД "Докторанти", стая 318 НУК

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА: При развитието на безжичните технологии, основна цел е подобряване на обслужването на експоненциално нарастващия брой потребители посредством създаване на нови комуникационни услуги с високо качество на предаване на информация при ниски цени и в наличния честотен обхват. От практическа гледна точка, едно възможно решение е прилагането на smart-антенни системи, анализирани и моделирани на база алгоритми за формиране на лъча (ABF – Adaptive Beamforming) и методи за определяне направлението на пристигане (DOA – Direction of Arrival). Основният параметър, който трябва да бъде постигнат е капацитетът на системата и неговото поддържане. Същият може да се представи като функция на броя предлагани услуги и броя абонати. За реализация на искания капацитет при ограничен брой разпределени честоти и канали, решението е проектиране на подходяща клетъчна структура.

Прилаганите техники (ненасочени системи, деление на клетки, секториране на клетка) не разрешават цялостно проблема с капацитета на системата. Този факт поражда необходимост от изследване и проектиране на системи, които динамично секторират клетката - smart-антени.

Smart-антенните системи са усъвършенстван вариант на техниката секториране на клетка, реализиран посредством антенни решетки с подходяща конфигурация, монтирани в базовите станции. Smart-антената е адаптивна антенна решетка, в която наличният цифров сигнален процесор при използване на алгоритъм за определяне направлението на пристигане и адаптивен алгоритъм за формиране на лъча, изчислява направлението на пристигане на полезния сигнал, коригира го по амплитуда и фаза и изработва подходящи тегловни коефициенти на антенните елементи. В резултат се формира диаграма на насоченост с максимум на главния лист по направление на полезния сигнал, при същевременно нулиране на всеки друг смущаващ сигнал. Предимството е изработване на подходяща диаграма на излъчване за всеки индивидуален потребител на база цифрова обработка на сигнали. В резултат се постига: реализиране на по-голямо покритие от страна на базовата станция, значително намаляване на количеството цифрова грешка, ефикасно използване на честотния спектър (скъп и ограничен ресурс), налагащ ограничение за броя на реализираните радиоканали в честотна лента с определена ширина, намаляване фадинга от многократно разсейване, реално увеличаване на капацитета на системата.

Основните проблеми при проектиране на безжична комуникационна структура (увеличаване на капацитета на системата, многократно разсейване и интерференция в канала) могат да бъдат преодолени при прилагане на адаптивна антенна система. Последната притежава предимства, даващи

необходимото решение на представените проблеми: адаптивност към средата на сигнала, много доброто функциониране в условията на фадинг, на база използваните адаптивни алгоритми и методи при формиране на диаграмата на насоченост на адаптивната решетка, при подходящ подбор на антенни елементи (класически и печатни диполи) и конфигурация на решетката е възможно разрешаване на проблемите, отнасящи се до закъснението от разпространение на радиочестотния сигнал и интерференцията вътре в канала, силна насоченост на антенната решетка. Недостатъците, които се отчитат са: по-сложни трансийвъри в сравнение със стандартните такива при базовата станция, необходимост от прецизна калибровка в реално време за всеки елемент на антенната решетка.

С оглед на посочените факти, изследванията в настоящата дисертация са насочени именно в това направление – проектиране на smart-антена за безжични комуникации. Акцентът е поставен върху избор на оптимални ABF и DOA техники и разработване на програми в програмната среда Matlab за моделиране и симулиране на диаграма на насоченост на smart-антена при различни конфигурации на антенни решетки и видове антенни елементи, за да се докажат съответните им предимства и недостатъци.

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: Конфигурации адаптивни антенни решетки с различни геометрични размери, формирани от елементи класически и печатни диполи. Прилагане на адаптивни техники за определяне направлението на приемания от решетката тесполентов радиочестотен сигнал и насочване на главния лист в посока на полезния сигнал за постигане на оптимална диаграма на насоченост на smart-антената.

ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: Многоелементни адаптивни решетки при избор на антенен компонент и адаптивни методи за формиране на оптимална диаграма на насоченост на smart-антената.

ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: Теоретично да се анализират и изследват конфигурации адаптивни антенни решетки, да се оцени ефективността на работа на същите при отчитане на основните влияещи фактори върху антенните характеристики, да се проектира smart-антена и виртуално да се моделира и симулира антенната диаграма на насоченост при прилагане на избрани оптимални ABF и DOA техники.

ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: За реализиране на поставената цел следва да бъдат решени следните основни изследователски задачи:

1. Теоретичен анализ на основните електрически характеристики на видове излъчватели и изследване механизма на излъчване на същите като

самостоятелен клас антени.

2. Теоретично изследване на основните типове антенни конфигурации за систематизиране на влиящите фактори и анализиране на основните предимства и недостатъци при приложението им в безжичните комуникации.

3. Предлагане на метод за определяне на направлението на приемания полезен теснолентов радиочестотен сигнал и адаптивна техника за формиране на антенната диаграма на насоченост при отчитане спецификата на използваните излъчватели като съставен компонент на антенните решетки.

4. Установяване на влиянието на спецификата на антенните характеристики за видовете излъчватели върху антенните параметри на типовете решетки при постигане на оптимална диаграма на насоченост.

5. Изследване на конфигурации многоелементни антенни решетки при използване на адаптивни техники за формиране на диаграма на насоченост на същите и установяване влиянието на геометричните размери върху електрическите характеристики и параметри за постигане на оптимални конструктивни размери на антенната решетка.

6. Предлагане на теоретичен подход за моделиране работата на избрани конфигурации адаптивни антенни решетки с елементи класически и печатни диполи.

7. Създаване на софтуерен модул на основата на теоретичния модел за симулиране антенната диаграма на насоченост на многоелементни адаптивни антенни решетки.

8. Виртуално изследване на предложен теоретичен модел на smart-антена при отчитане спецификата на характеристиките на антенните елементи, геометричните размери на антенната конфигурация и прилагане на адаптивни техники за формиране на диаграмата на насочест за потвърждаване на оптималността на представения модел.

9. Експериментално изследване на същия за установяване достоверността на проведените теоретични и симулационни изследвания.

МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: Изследванията в дисертационния труд са извършени в *Технически университет* – гр. Варна и в лабораторията за изпитания на *фирма "Ray Sat"* - гр. София.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ: За решаване на поставените в дисертацията изследователски задачи е използван комплексен подход на база теорията на електромагнитното поле и антенната теория при разработени алгоритми за приемания от антената теснолентов радиочестотен сигнал и насочване на главния лист в посока на полезния сигнал за постигане на оптимална диаграма на насоченост на smart-антената. При теоретичния анализ е използван числен метод за решаване на получените уравнения. Задачата за оптимизиране на формираната диаграма на насоченост е решена с използване на 2-D unitary ESPRIT, UCA-ESPRIT и ULMS методи. За валидиране на получените резултати от теоретично и виртуално изследвания е използван експериментален метод за измерване на диаграмата на насоченост на антенна решетка в далечната зона в лабораторията за изпитания на фирма "Ray Sat" - гр. София.

НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: Научната новост на дисертационния труд се състои в следното: **1.** Изследван посредством теоретичен анализ е научно-приложния проблем за вида на изпозваните излъчватели и типове антенни конфигурации при реализиране на адаптивна антенна структура. **2.** Установено е влиянието на характеристиките на различните видове излъчватели и геометрията на конфигурацията върху антенните параметри на решетъчната система за постигане на максимална насоченост. **3.** Предложени са при отчитане спецификата на използваните излъчватели като съставен елемент от антенната решетка оптимални: метод за определяне на направлението на приемания тесноленТов радиочестотен сигнал и адаптивна техника за формиране на диаграмата на насоченост. **4.** Предложен е теоретичен подход за моделиране работата на специфични конфигурации адаптивна антенна решетка с класически елементи и печатни диполи. **5.** Въз основа на теоретичния модел са разработени за симулиране антенната диаграма на насоченост на многоелементни адаптивни антенни решетки с компоненти класически и печатен диполи. **6.** Изследвани са виртуално и експериментално основните антенни характеристики на адаптивни структури при отчитане на геометрията на антенната конфигурация за формиране на подходяща диаграма на насоченост и е предложен оптимален вариант на такава.

ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: Предложените и виртуално изследвани проектирани модели микролентова антена (с правоъгълна и кръгова геометрии) могат да бъдат използвани като основен елемент на адаптивна антенна структура с приложение в радиокомуникационната техника. Установи се факта, че при малки геометрични размери на елемента правоъгълната микролентова антена, взаимната активна проводимост (G_{12}) оказва съществено влияние върху стойността на активното входно съпротивление (R_{in}). Установи се зависимост на стойността на активното входно съпротивление при елемент кръгов печатен дипол от параметъра пълна активна проводимост (G_t) и влияние на неговата съставяща G_{rad} върху насочеността ($D_{пач}$). Посредством числен анализ са получени факти за влиянието на конструктивните размери на антенния елемент и антенната решетка върху нейните основни антенни характеристики. Доказано е влиянието на междуелементното разстояние върху постигнатата насоченост на антенната структура, както и влиянието на многоелементната антенна решетка и използвания брой компоненти върху ширината $(HPBW)$ на формирания главен лист в диаграмата на насоченост. Установи се, че прилагането на адаптивни техники подобрява антенните характеристики и параметри на планарните антенни решетки.

АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО: По темата на дисертационния труд, основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните международни и национални форуми с международно участие и издания:

Рецензирани научни издания в страната:

- *"Годишник на Техническия университет във Варна"*, 2007, 2008.

Международни конференции:

- *International Scientific Conference on Informationq Communication and Energy Systems and Technologies* (ICEST), 2007, 2008, 2009, 2010.
- *2nd European conference on antennas & propagation,* Edinburgh, 2007.

Национални конференции с международно участие:

- Конференция, организирана от РУ "Ангел Кънчев", 2008.
- Конференция, организирана от ШУ "Епископ Константин Преславски", 2009.

Дисертацията е разработена с тематичното и финансово осигуряване от „Договор за научен проект в помощ на докторант" и ФД "Докторанти" на ТУ-Варна.

СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД: Дисертационният труд съдържа 160 страници, включително 75 фигури и 33 таблици, списък на използваната литература от 135 заглавия, от които 135 на латиница и 2 приложения. Основният текст е изложен на 127 страници и се състои от съдържание, списък на използваните съкращения, четири глави, заключение-резюме на получените резултати, библиография и списък на публикациите по темата на дисертационния труд. Използваният базисен математически апарат за анализ и моделиране на електромагнитни процеси в адаптивни антенни решетки и разработените алгоритми в програмна среда Matlab с оглед на удобство при използване, са оформени като две отделни приложения към дисертацията в обем от 33 страници.

В автореферата са приети означения на фигурите и формулите, съответстващи на тези от дисертацията.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

УВОД. Обоснована е необходимостта от провеждане на научното изследване при формулирана същност и актуалност на проблема, представени са обектът и предметът на изследване, формулирани са целта и задачите в дисертационния труд.

ГЛАВА ПЪРВА. **Адаптивна антенна решетка. Видове антенни решетки – основни параметри. Избор на елементи на решетките.**

Формулирани са факторите, оказващи съществено влияние при формирането на диаграмата на насоченост на антената с оглед проектиране на оптимална адаптивна антенна решетка. Анализът е извършен на база следните критерии: вид на елементите на антенната решетка (класически и печатен диполи), брой на антенните компоненти, конфигурация на антенната решетка (линейна и планарна).

При проектиране на smart-антена, съществен момент е правилният избор на елементите на антенната решетка, реализиран при отчитане на факторите, влияещи на точното и прецизно формиране на антенната диаграма на насоченост. Направен е кратък обзор с елементи на анализ на практически приложимите компоненти, с оглед изясняване на съответните предимства и недостатъци при използване на всеки един в конкретната антенна конфигурация. Акцентира се на класически диполи (малък и полувълнов) и печатни диполи (микролентова антена).

Реализирането на безжични комуникации на големи разстояния налага проектиране на антени с характеристики за постигане на максимално насочване в дадено направление. Диаграмата на излъчване на всеки един от изследваните антенни компоненти като самостоятелен клас антена е относително широка и съответно насочеността е относително ниска. Подобряване на характеристиките на насочване и усилване се постига посредством: увеличаване на електрическия размер на отделния елемент, формиране на антенна решетка - електрическа и геометрична конфигурация от еднотипни излъчватели (изборът се прави с оглед удобство и практичност при проектиране и моделиране). Полето на решетката се формира при сумиране на излъчените от всеки компонент полета, при условие, че токът във всеки елемент от решетката се запазва същия като в изолирания такъв (пренебрегва се взаимното влияние между елементите). За да се осигури силно насочена диаграма в дадено направление е необходимо полетата на елементите на решетката да се усилват (сумират синфазно) в желаната посока и да се изключват взаимно (сумират противофазно) в определени други направления. Целта при практическа реализация е да се постигне максимално приближение с посочения идеален случай. За формиране на цялостна диаграма на излъчване на решетка, състояща се от идентични елементи минимумът условия, които трябва да бъдат изпълнени в процеса на проектиране са: 1. Избор на геометрична конфигурация на антенната решетка – линейна, равнинна (правоъгълна или кръгова). 2. Определяне на относителното разстояние между елементите. 3. Амплитуда на възбуждане на отделните елементи. 4. Фаза на възбуждане на отделните елементи. 5. Диаграма на излъчване на отделните елементи.

Въз основа на направения обзор и анализ на основните характеристики на антенните компоненти и на решетъчните структури, при отчитане на основната цел на процеса проектиране на антенна конфигурация - реализиране на желани излъчвателни характеристики при постигане на оптималност, са формулирани следните изводи:

1. От направения теоретичен анализ на основните електрически характеристики на елементите класически и печатни диполи при изследване механизма на излъчване на същите като самостоятелен клас антени се установява, че излъчвателните характеристики на антенния компонент се обуславят от съответните електрическа и магнитна компоненти на полето в далечната зона. Последните дават възможност да се определи максималната насоченост (D_0), както и входния импеданс (Z_{in}).

2. При теоретично изследване на насочеността (D_0) на елементите класически диполи и сравнение на диаграмата на излъчване на същите,

впечатление прави нарастване на насочеността (намаляване ширината на главния лист) при полувълновия електрически дипол ($D_0 \approx 2{,}15\,dB$) относно малкия електрически дипол ($D_0 \approx 1{,}76\,dB$). Посочените стойности позволяват елементите да се използват като компоненти на антенни решетки при виртуално изследване на такива конфигурации.

3. Установява се пряка зависимост между приетата апроксимация за разпределението на тока в антената и излъчената активна мощност от елемента, съответно се оказва влияние и върху параметрите входно съпротивление и съпротивление на излъчване, стойностите на които са предпоставка за постигане на прецизно съгласуване с предавателната линия.

4. Обзорното представяне на характеристиките на елементите печатни диполи излага основните предимства на същите пред класическите такива при правилен и точен подбор на вида и формата на микролентовата антена. За правоъгълна микролентова антена максималната насоченост има стойност $D_0 \approx 7\,dB$.

5. Представеният кратък обзор на основните видове линейни антенни решетки и анализ на основните им характеристики налагат извода, че изборът на вида разпределение (равномерно, биномиално, на Долф-Чебишев) и междуелементното решетъчно разстояние са определящи критерии при проектиране на антенна решетка от този тип и моделиране на желана диаграма на насоченост на същата.

6. При теоретично изследване на основните параметри, влияещи върху излъчвателните характеристики на планарните (правоъгълни, кръгови) антенни решетки се установява, че излъчвателните им характеристики се управляват на база подбор на фазово и амплитудно разпределение между елементите. Контрол върху вида на антенната диаграма на насоченост се осъществява при промяна на фазовото възбуждане, управление на ширината на главния лист и нивото на страничните листи се реализира посредством избор на амплитудно възбуждане.

7. Направените обобщения на база представените обзор и анализ на основните характеристики на изследваните елементи (класически и печатни диполи) и видове антенни решетки предоставят възможност за отчитане в процеса на моделиране и проектиране на техните основни предимства и недостатъци.

ГЛАВА ВТОРА. **Адаптивни алгоритми за определяне на посоката на източниците. Формиране на диаграмата на насоченост.**

Извършен е преглед и анализ на известните методи за теоретично и експериментално изследване на адаптивни антенни решетки при отчитане на главното предимство на същите пред стандартните такива, което се състои в оценяване в реално време посредством цифров сигнален процесор на направлението на пристигане за всички приемани радиочестотни сигнали и осъществяване на идеално насочване на антенната диаграма към максимум на излъчване по посока на полезния сигнал и определяне на нулите към нежеланите сигнали на база алгоритми за определяне направлението на пристигане на сигналите (DOA) и адаптивно формиране на лъча (ABF).

Разгледани са използваните методи за определяне посоката на източниците (DOA), анализирани са относно приемане на теснолентови сигнали

от източници, разположени в далечната зона спрямо решетка, състояща се от еднотипни елементи и е установено, че изборът на оптимален алгоритъм зависи от следните фактори: геометрия на антенната решетка, брой на източниците на сигнали, наличие на интерференция и шум, резолюция, сходимост, ефикасност и точност на алгоритъма. В резултат на анализ и сравнение на работата на различни методи за DOA оценка на база следните критерии: отклонение, резолюция, чувствителност, вариация е избран алгоритъмът ESPRIT (2-D Unitary ESPRIT, UCA-ESPRIT) като оптимален в този клас методи поради следните основни предимства: ниска изчислителна сложност, изискване за малка оперативна памет, оценяване на посоките на приеманите сигнали без необходимост от определяне на всички възможни насочващи вектори, не изисква калибровка на решетката и получаване на прецизна оценка в реално време за направлението на приемания тесноленто сигнал при изследване на линейна и планарна еквидистантни решетки.

Обзорният преглед и анализ на методите от клас ABF относно точност на получената оценка е извършен с оглед на приложимостта им при проектиране на smart-антена. След сравнителен анализ на използваните методи за формиране на диаграмата на насоченост при формулиране на критериите относно точност на получената оценка на градиента, скорост на сходимост, ковариация на градиента и отчитане на основните предимства и недостатъци на адаптивните техники за формиране на антенната диаграма на насоченост е избран алгоритъмът ULMS за оптимален от този клас методи за приложение при експерименталното изследване поради следните предимства: прецизна оценка на градиента, ниска чувствителност към направлението на наблюдение на сигнала, изчислително ефективен в шумова среда и постигане на добра скорост на сходимост при използване на стъпка с променлив размер.

ГЛАВА ТРЕТА. **Модели и симулационен анализ на адаптивни антенни решетки на база ESPRIT метод и ULMS алгоритъм.**

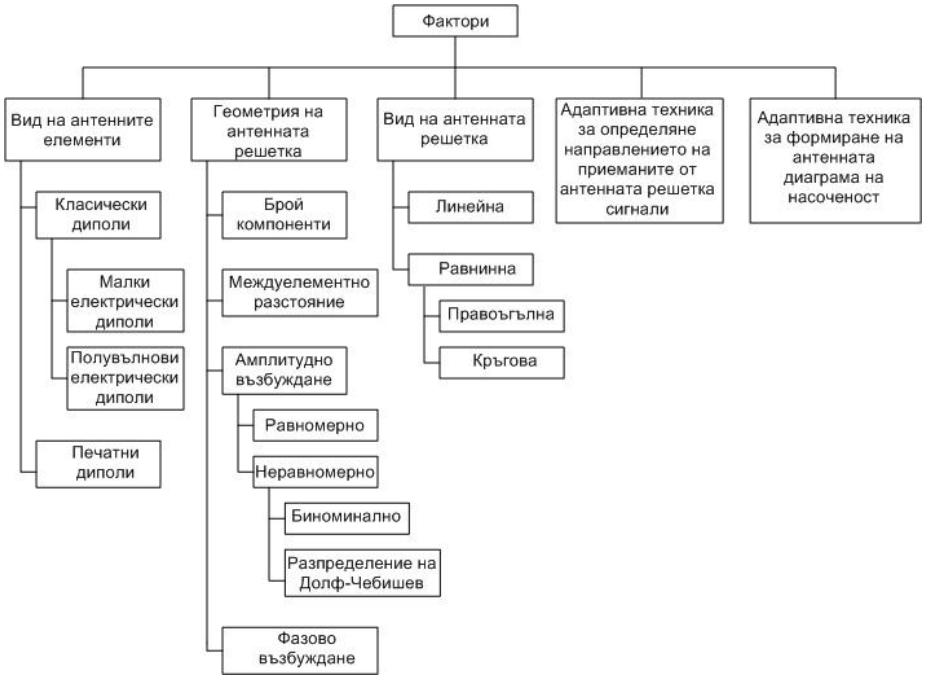
В тази глава са представени и изследвани конфигурации на два типа антенни решетки: линейна (с равномерно и неравномерно амплитудно разпределение) и равнинна (правоъгълна, кръгова) и са анализирани резултатите, получени при трансформиране на същите в адаптивна антенна система посредством прилагане на адаптивни техники относно формиране на диаграма на насоченост на реализирана антенна решетка при оценяване посоките приетите сигнали и формиране на главен лист по направление на полезния сигнал (θ_0, ϕ_0) при игнориране на смущаващите сигнали.

3.1. Систематизиране на факторите, оказващи влияние при избор на конфигурация адаптивна антенна решетка. Създаване на модели, описващи процеса на проектиране на антенна решетка и работата на smart-антена.

В тази точка с оглед установяване оптималността на конкретна smart-антена относно приложение в безжичните комуникационни системи са систематизирани факторите, влияещи при избора на адаптивна антенна решетка (фиг.3.1). Представена е процедурата, отразяваща последователността от действия по проектиране на антенна решетка (фиг.3.2). В блок-схема, описваща

модела на работата на smart-антена (фиг.3.3) е систематизиран принципът на действие на адаптивната антенна система.

При проектиране, за опростяване на анализа на база използвания математически апарат се приема, че елементите на smart-антената са изолирани един от друг. За постигане на оценка с висока точност за работата на системата е отчетен фактът, че между излъчвателите в реалните антенни решетки съществува ефект на взаимно влияние. Оценяването на адаптивното формиране на лъча дава некоректни резултати при неговото пренебрегване. Компенсирането е реализирано посредством определяне на новите тегла на антенната решетка на база на матричното уравнение (3.1).



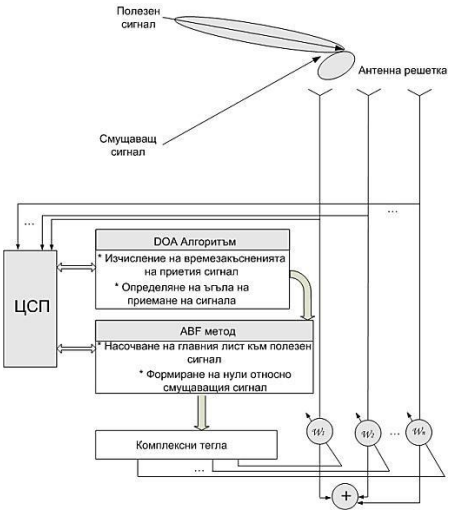
Фиг. 3.1. Фактори, оказващи влияние на избора на адаптивна антенна решетка.

Представените модели с достоверна точност отчитат особеностите при проектиране на адаптивна антенна решетка при отчитане на основните фактори, оказващи влияние при осъществяване на този процес. Приложени са при изследване на конкретни конфигурации линейни и равнинни антенни решетки.

3.2. Изследване възможностите за приложение на линейна еквидистантна решетка с елементи малки електрически диполи при равномерно и неравномерно амплитудни разпределения.

Изследвани са основните антенни характеристики на линейна еквидистантна антенна решетка с равномерно амплитудно разпределение (решетка със странично излъчване и решетка с максимално излъчване по нейната

Фиг. 3.2. Модел на процеса проектиране на адаптивна антенна решетка.



Фиг. 3.3. Блок – схема на smart-антена.

ос) и линейна еквидистантна антенна решетка с неравномерно амплитудно разпределение (биномиална и решетка на Долф-Чебишев). При анализ на резултатите, получени на база извършени изчисления и симулации при използване на програмната среда Matlab относно изследваните решетки с елементи малки електрически диполи се установи:

- От получените антенни характеристики на изследваните линейни решетки се установява, че от трите вида разпределения (равномерно, биномиално, на Чебишев), решетката със странично излъчване (равномерно амплитудно разпределение) има най-малка стойност на параметъра HPBW, следвана в този ред от решетката на Долф-Чебишев, биномиалната решетка и най-голяма стойност се отчита при решетката с максимално излъчване по нейната ос (равномерно амплитудно разпределение). При биномиалната решетка не се формират в диаграмата на насоченост странични листи, при тази на Долф-Чебишев се формират по-малък брой странични листи в сравнение с тези при двата вида равномерни решетки. Относно насочеността се установява, че този показател има най-висока стойност при равномерните решетки, следван в този

ред от решетката на Долф-Чебишев и биномиалната решетка.

- При сравнение на получените изчислителни резултати с тези от симулациите е отчетено постигане на достоверна точност при виртуално изследване на основните антенни характеристики на линейните антенни решетки.
- От направеното изследване се налага извода, че при проектиране на линейна решетка с желани антенни характеристики е необходим компромис при избора на нейния тип относно ниво на странични листи и ширина на главен лист. Съществен недостатък на същата е невъзможността за сканиране на главния лъч в триизмерното пространството, което не позволява определяне посоката на приемания тесноленто радиочестотен сигнал в направление на θ (елевация) и ϕ (азимут). Следователно, линейните антенни решетки не са подходящ избор като тип решетка при проектиране на smart-антена.

3.3. Изследване възможностите за приложение на адаптивна правоъгълна еквидистантна антенна решетка в безжичните комуникации.

Изследвани са основните антенни характеристики на четири конфигурации правоъгълна еквидистантна решетка, състояща се от ($M \times N$) на брой отстоящи един от друг на разстояние $d_x = d_y = 0{,}5\lambda$ идентични компоненти при зададена посока на приемания полезен сигнал ($\theta_0 = 20^0$, $\phi_0 = 170^0$). Решетката е с равномерно амплитудно разпределение поради използване на елементи с еднакви амплитуди и всеки с увеличаваща се фаза (β) относно предходния.

- При изпълнение на поставеното изискване максимумът в диаграмата на AF да е насочен в направление (θ_0, ϕ_0), от изрази (1.61-2) ÷ (1.61-4) се определя факторът на решетката.
- Изчисление на насочеността на правоъгълна антенна решетка. Процедурата се базира на данните за определяне насочеността на линейна равномерна решетка със странично излъчване (1.66-2).

➢ Случай 3: Определяне насочеността на 32-елементна ($M = 4$, $N = 8$) решетка:

$$D_{0(4\times8)} = \pi \cos\theta_0 D_x D_y = \pi \cos\theta_0 D_{0(4)} D_{0(8)} = 94{,}45 \qquad (3.11\text{-}3)$$

$$D_0[dB] = 10\log_{10}\left(D_{0(4\times8)}\right) = 10\log_{10}(94{,}45) = 19{,}75\,dB \qquad (3.11\text{-}4)$$

➢ Случай 4: Определяне насочеността на 64-елементна ($M = 8$, $N = 8$) решетка:

$$D_{0(8\times8)} = \pi \cos\theta_0 D_x D_y = \pi \cos\theta_0 D_{0(8)}^2 = 188{,}94 \qquad (3.12\text{-}1)$$

$$D_0[dB] = 10\log_{10}\left(D_{0(8\times8)}\right) = 10\log_{10}(188{,}94) = 22{,}76\,dB \qquad (3.12\text{-}2)$$

- Ширината на главния лист на диаграмата на ниво ½ мощност (Θ_h) за правоъгълна еквидистантна решетка се изчислява от израз (1.64-1) при определяне на ширината на главния лист на ниво ½ мощност (Θ_{x0}, Θ_{y0}) за

линейна равномерна решетка със странично излъчване, състояща се съответно от M и от N на брой елемента (3.4-4):

➢ Случай 3: За определяне Θ_h (HPBW) на 32-елементна решетка се използват стойностите на параметъра, изчислени за линейни решетки съответно с M и N на брой елемента (3.4-4):

$$\Theta_{x0(4)} = \Theta_{y0(4)} = 25{,}58^\circ \tag{3.15-1}$$

$$\Theta_{x0(8)} = \Theta_{y0(8)} = 12{,}72^\circ \tag{3.15-2}$$

$$\Theta_h \approx \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_0\left[\Theta_{x0(4)}^{-2}\cos^2\phi_0 + \Theta_{y0(8)}^{-2}\sin^2\phi_0\right]}} = 26{,}08^\circ \tag{3.15-3}$$

➢ Случай 4: Определяне Θ_h (HPBW) на 64-елементна решетка. За квадратна решетка $\Theta_{x0} = \Theta_{y0}$, при което ширината на главния лист с достоверна точност се изчислява от израза:

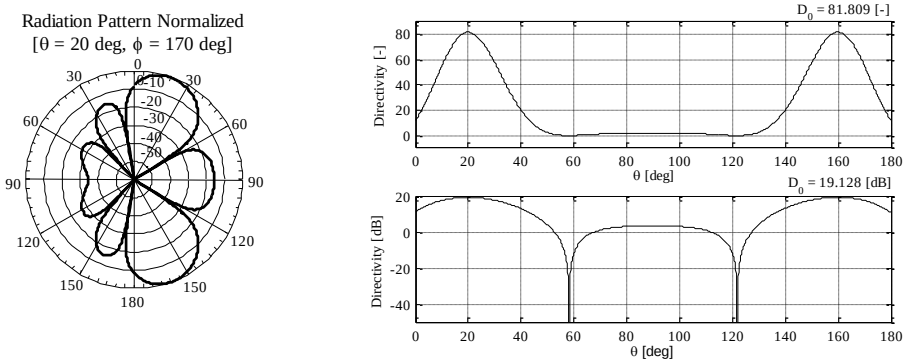
$$\Theta_h = \Theta_{x0(8)}\sec\theta_0 = \Theta_{x0(8)}\sqrt{\tan^2\theta_0 + 1} = 13{,}48^\circ \tag{3.16}$$

Антенните характеристики на проектираните 32-елементна (Случай 3) и 64-елементна (Случай 4) решетки, получени на база симулации при разработен алгоритъм въз основа на използвания математически апарат в програмната среда Matlab са представени съответно на фиг.3.11 и фиг.3.12.

Представените четири конфигурации правоъгълна антенна решетка с основен елемент малък електрически дипол са изследвани при използване на 2-D unitary ESPRIT метода за оценяване направлението на приеманите сигнали и ULMS алгоритъма за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост (ABF Pattern) на решетката. Избраният DOA метод се базира на използване на представения математически апарат (2.7-1)÷(2.11-2) за получаване на действителна оценка относно посоките на приеманите сигнали. Избраният ABF алгоритъм се основава на математически апарат (2.16)÷(2.19-4) за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на антенната решетка. За постигане на оценка с висока точност относно работата на адаптивната система е отчетен ефектът на взаимно влияние между антенните компоненти и неговото компенсиране посредством определяне на новите решетъчни тегла на база израз (3.1).

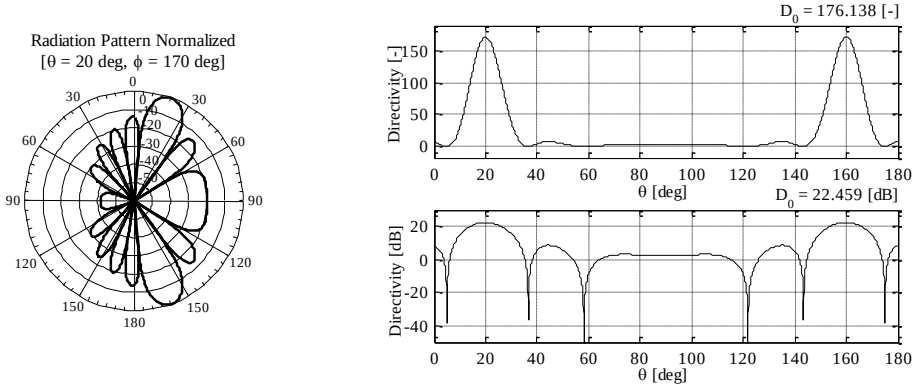
Изследването на точността на работа на четирите конфигурации адаптивни решетки е извършено на база разработени алгоритми в програмната среда Matlab при използване на математическия апарат на посочените методи и осъществени симулации за следната постановка: зададено направление на приемания полезен сигнал SOI ($\theta_0 = 20^0$, $\phi_0 = 170^0$), наличие на два смущаващи сигнала, съответно от направления SNOI 1 ($\theta_1 = 25^0$, $\phi_1 = 165^0$) и SNOI 2 ($\theta_2 = 22^0$, $\phi_2 = 172^0$) и в средата на адитивен бял гаусов шум със средна стойност нула и вариация 0.1. При използване на ULMS метода е избран размер на стъпката на алгоритъма $\mu = 0{,}001$.

Резултатите от проведените симулации (двумерни диаграми на насоченост) са представени съответно на фиг.3.15 (Случай 3) и фиг.3.16 (Случай 4).



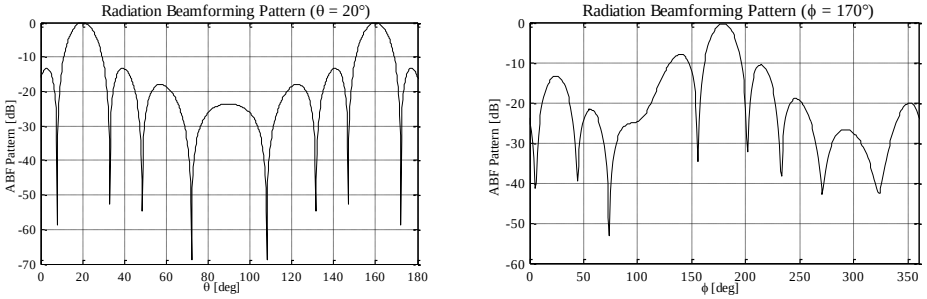
б) в)

Фиг. 3.11. Правоъгълна 32-елементна решетка: б) двумерна нормирана диаграма; в) насоченост.

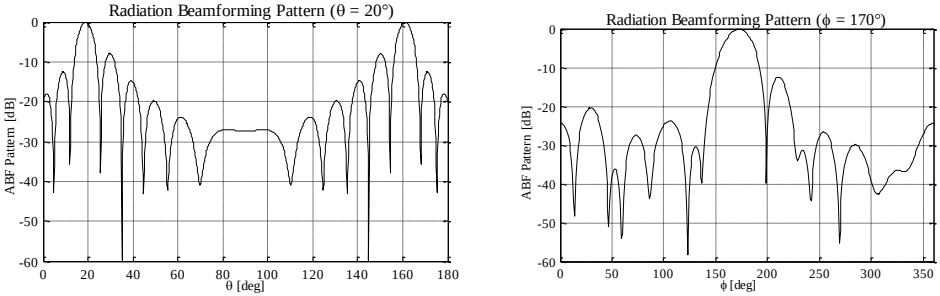


б) в)

Фиг. 3.12. Правоъгълна 64-елементна решетка: б) двумерна нормирана диаграма; в) насоченост.



Фиг. 3.15. Двумерна диаграма на насоченост на 32-елементна правоъгълна адаптивна решетка (основен елемент – малък електрически дипол).

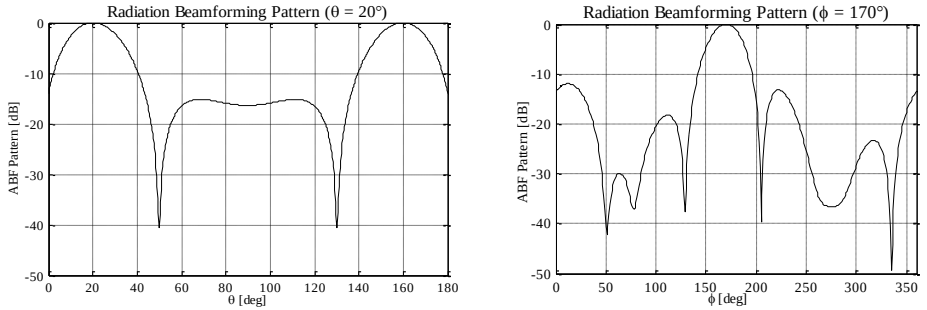


Фиг. 3.16. Двумерна диаграма на насоченост на 64-елементна правоъгълна адаптивна решетка (основен елемент – малък електрически дипол).

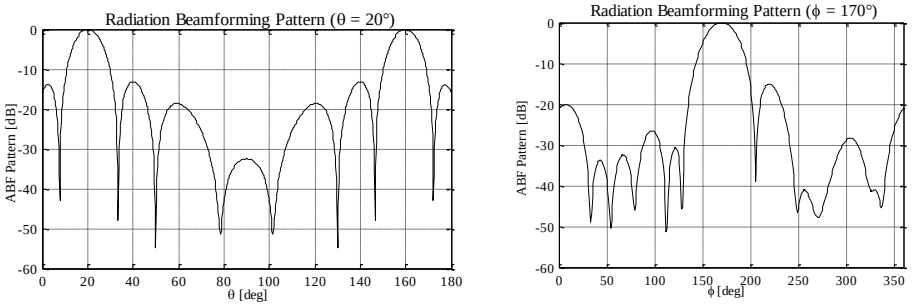
Резултатите от проведените симулации доказват способността на използваните методи за реализиране на оценка с висока точност в реално време относно направленията на приеманите от антенната решетка сигнали и формиране на адаптивна диаграма на насоченост. При прилагане на 2-D unitary ESPRIT метода се наблюдават минимални отклонения в получените оценки за посоката на SOI при наличие на смущаващи сигнали и в шумова среда. При формиране на адаптивна диаграма на насоченост с максимум на главния лист относно зададеното направление на полезния сигнал, точността нараства при увеличаване броя на антенните компоненти, което се обяснява със зависимостта на работа на антенната система от броя решетъчни елементи.

При прилагане на 2-D unitary ESPRIT метод и ULMS алгоритъм са изследвани четирите конфигурации правоъгълна антенна решетка, като за основен елемент на антенната структура в този случай е използван полувълнов електрически дипол при запазване на представената постановка. Резултатите от проведените симулации (двумерни диаграми на насоченост) са представени съответно на фиг.3.20 (Случай 3) и фиг.3.21 (Случай 4).

За изследваните правоъгълни еквидистантни smart-антени с елементи класически диполи (малък електрически дипол, полувълнов дипол), при анализ на получените симулационни резултати при прилагане на адаптивни техники (2-D unitary ESPRIT метод, ULMS алгоритъм) се установи:



Фиг. 3.20. Двумерна диаграма на насоченост на 32-елементна правоъгълна адаптивна решетка (основен елемент – полувълнов дипол).



Фиг. 3.21. Двумерна диаграма на насоченост на 64-елементна правоъгълна адаптивна решетка (основен елемент – полувълнов дипол).

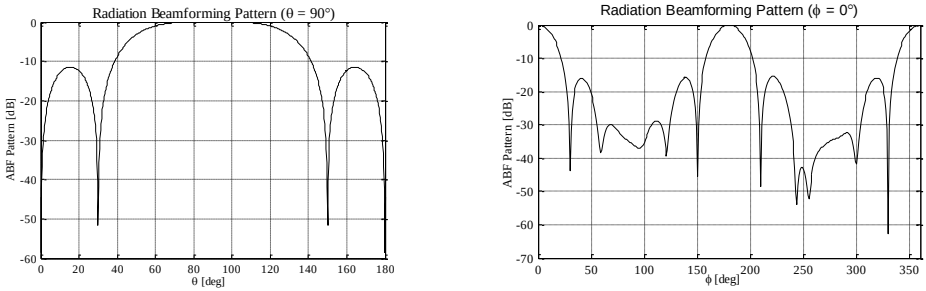
- Постигната е висока точност на резултатите от проведените симулации при използване на 2-D unitary ESPRIT метода за определяне посоката на приетите теснолентови сигнали.
- При прилагане на техника (ULMS алгоритъм) за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на правоъгълни адаптивни решетки и отчитане точността на получените резултати относно двата фактора: полезен сигнал (максимум) и смущаващи сигнали (формиране на нули) се установява, че при антенен елемент полувълнов електрически дипол точността и прецизността на формираната диаграма е по-висока в сравнение с тази при антенен компонент малък електрически дипол. Изследването на ефекта на взаимно влияние между антенните елементи и неговото последващо компенсиране показва, че при избор на междуелементно разстояние същият трябва да бъде отчетен.
- При отчитане на факта, че изборът на оптимален вариант при проектиране на адаптивна антенна решетка трябва да е съобразен и със себестойността на реализираната конфигурацията, решение относно геометричния размер на същата при отчитане на поставени изисквания и получени резултати се търси при брой решетъчни елементи тридесет и два или шестдесет и четири и вид на елемента класически полувълнов дипол или печатен дипол.

3.4. Изследване възможностите за приложение на адаптивна кръгова антенна решетка в безжичните комуникации.

В тази точка са представени изследванията за две конфигурации на кръгова еквидистантна антенна решетка с радиус a, състояща се от N на брой идентични, равноотдалечени един от друг компоненти (малък и полувълнов електрически диполи) при използване на UCA-ESPRIT метод за оценяване направлението на приеманите сигнали и ULMS алгоритъм за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на решетката. При прилагане на UCA-ESPRIT метода, посоката на приет от кръговата еквидистантна решетка сигнал се определя при изчисление на неговото закъснение във времето при $n^{-тия}$ елемент относно координатното начало (2.1-3). Избраният DOA метод се базира на определяне собствените стойности на корелационната матрица на решетката (2.12) за получаване на действителна оценка относно посоките на приеманите

сигнали. Избраният ABF алгоритъм се основава на математически апарат (2.16)÷(2.19-4) за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на антенната решетка.

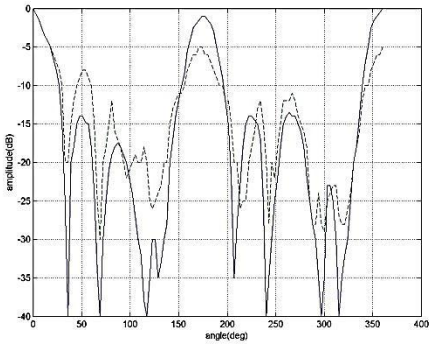
Изследването на точността на работа на 8-елементна и 12-елементна адаптивни решетки е осъществено на база разработени алгоритми в програмната среда Matlab при използване на математическия апарат на посочените методи и осъществени симулации за следната постановка: зададено направление на приемания полезен сигнал SOI ($\theta_0 = 90^0$, $\phi_0 = 0^0$), наличие на два смущаващи сигнала, съответно от направления SNOI 1 ($\theta_1 = 90^0$, $\phi_1 = 120^0$) и SNOI 2 ($\theta_2 = 90^0$, $\phi_2 = 300^0$) и в средата на адитивен бял гаусов шум със средна стойност нула и вариация 0.1. При използване на ULMS метода е избран размер на стъпката на алгоритъма $\mu = 0{,}001$. С оглед опростяване на анализа и използвания математически апарат се приема, че елементите на smart-антената са изолирани един от друг. Резултат от проведените симулации е представен на фиг.3.24 (Случай 2).



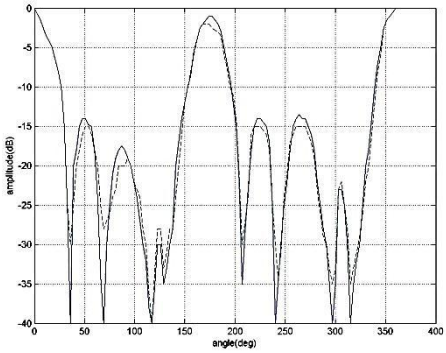
Фиг. 3.24. Двумерна диаграма на насоченост на 12-елементна кръгова решетка (основен елемент – малък електрически дипол).

Двете конфигурации кръгова антенна решетка с основен елемент на антенната структура в този случай полувълнов електрически дипол са изследвани при прилагане на UCA-ESPRIT метод и ULMS алгоритъм при запазване на представената постановка. За 8-елементната адаптивна кръгова решетка (Случай 1) при прилагане на ULMS метода е изследван ефекта на взаимно влияние между антенните елементи и последващото компенсиране на същия. Резултатите са представени съответно на фиг.3.25 и фиг.3.26. Фиг.3.25 отразява решетъчната диаграма на насоченост при отсъствие на взаимно влияние между елементите и при наличие на такова без неговото компенсиране. Фиг.3.26 отразява резултата след компенсиране на посочения ефект, при което се установява почти пълно съвпадение с диаграмата на насоченост при отсъствие на взаимно влияние между антенните елементи.

За изследваните в тази глава конфигурации на два типа антенни еквидистантни решетки: линейна (с равномерно и неравномерно амплитудно разпределение) и планарна (правоъгълна, кръгова) с елементи класически диполи (малък електрически дипол, полувълнов дипол), при анализ на получените изчислителни и симулационни резултати се установи:



Фиг. 3.25. Диаграма на насоченост при: отсъствие на взаимно влияние (плътна линия); наличие на взаимно влияние (прекъсната линия).



Фиг. 3.26. Диаграма на насоченост при: отсъствие на взаимно влияние (плътна линия); компенсиране на ефекта (прекъсната линия).

- При сравнение на получените резултати от изчисления и проведени симулации в програмната среда Matlab относно основните атненни характеристики на същите се отчита постигане на достоверна точност при прилагане на виртуално изследване. Установи се, че поради присъщите на линейната структура недостатъци, благоприятен вариант при проектиране на smart-антена е избор на планарна решетъчна система.
- При изследване на получените резултати относно влиянието на вида използван антенен компонент – класически дипол се установява, че по-висока точност и прецизност на резултатите се постига при използване като елемент полувълнов електрически дипол в сравнение с тези при прилагане на малък електрически дипол.
- При съпоставителен анализ на симулационните резултати на база използване на 2-D unitary ESPRIT и UCA-ESPRIT методи за определяне посоката на приетите теснолентови сигнали и изчисление на получената абсолютна грешка спрямо реално зададените направления се наблюдава наличие на минимално отклонение на получените оценки.
- При прилагане на ULMS алгоритъм за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на правоъгълни и кръгови адаптивни решетки и отчитане точността на получените резултати относно двата фактора: полезен сигнал (максимум) и смущаващи сигнали (формиране на нули) се установява, че при антенен елемент полувълнов електрически дипол точността и прецизността на формираната диаграма е по-висока в сравнение с тази при антенен компонент малък електрически дипол. Изследването на ефекта на взаимно влияние между антенните елементи и неговото последващо компенсиране доказва, че при проектиране на адаптивна антенна система същият трябва да бъде отчетен и избора на междуелементно решетъчно разстояние да е съобразен с неговото наличие.
- При проектиране на оптимален вариант адаптивна антенна система, решение се търси относно постигане на покритие на заложени критерии и

получени резултати. От изследваните антенни конфигурации, правоъгълната равнинна решетка при избор на геометричен размер на същата удовлетворява поставените изисквания. Определяне на вида използван антенен елемент е важен момент от процедурата на проектиране, като при отчитане предимствата на печатния дипол относно електрически и механични характеристики в сравнение с представените тук класически диполи се предлага приложение на същия при проектиране и виртуално изследване на адаптивна антенна структура.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА. **Проектиране и виртуално изследване на многоелементна адаптивна антенна решетка при използване на микролентови антени.**

В тази глава са представени основните резултати от изследванията на две конфигурации проектирани многоелементни адаптивни правоъгълни антенни решетки с основен компонент печатен дипол (с правоъгълна и кръгова геометрия).

4.1. Систематизиране и моделиране на процеса проектиране на многоелементна smart-антена с печатни диполи.

Проектирането на многоелементна антенна структура при отчитане на комуникационно-мрежовите изисквания се базира на проектиране на основния елемент (вид, геометрия, размери) и проектиране на антенната решетка (конфигурация, брой компоненти, междуелементно разстояние). Следва избор на адаптивни DOA и ABF техники при контрол на характеристиките на излъчване (форма на диаграмата на насоченост, ширина на главен лист, нивото на страничните листи, сканираща способност). Последен етап е виртуално изследване на проектираната адаптивна антенна система. Моделът, описващ етапите на процеса проектиране на smart-антена при използване на печатни диполи (фиг.4.1) систематизира последователността при осъществяване на тази сложна и обхватна процедура.

4.2. Проектиране на основен елемент на антенната система - микролентова антена с правоъгълна и кръгова геометрия.

В тази точка след специфициране на вида използвана диелектрична подложка и избрани: метод на захранване на микролентовия излъчвател и метод за анализ на микролентовия елемент са проектирани модели на печатен дипол с правоъгълна и кръгова геометрии.

Процедурата по проектиране на модели правоъгълна микролентова антена е реализирана с оглед проектиране на три модела печатен дипол с правоъгълна геометрия и избор на един от тях като компонент на антенната решетка.

При зададени: работна (резонансна) честота $f_r = 3{,}2\ GHz$ (използвана при WLAN) и параметри на използваните диелектрични подложки: *Модел 1* [$\varepsilon_r = 4{,}5;\ h = 0{,}51\ mm$], *Модел 2* [$\varepsilon_r = 7{,}8;\ \ h = 0{,}15\,mm$], *Модел 3* [$\varepsilon_r = 9{,}1;$ $h = 0{,}25\,mm$] се определят изходните параметри:

- Геометричните размери на проектираната правоъгълна микролентова антена (*W, L* - геометрични ширина и дължина на елемента, ε_{reff} - относителна диелектрична ефективна проницаемост на материала, ΔL - увеличение на

физическата дължина на компонента, L_{eff} - електрическа дължина на печатния дипол) се определят при използване в посочената последователност на изрази (1.37), (1.36), (1.39) и (1.40). За получаване на реална представа относно геометричните размери на проектираните елементи, преобразуванията при изчисления са направени с оглед получаване на резултатите в единица [cm]. Резултатите от изчисления за трите модела относно посочените параметри с оглед унифициране на процеса проектиране са обобщени в табличен вид.

- Определяне на входното активно съпротивление на микролентовата антена (R_{in}) и координатите на точката на захранване при съгласуване ($R_{in} = 50\Omega$).
- Изчисление на насоченостите на излъчващата повърхнина (D_0), на AF (D_{AF}) и на правоъгълната микролентова антена ($D_{нач}$) се осъществява на база изрази (1.45) и (1.46).

Фиг. 4.1. Модел на процеса проектиране на smart-антена с печатни диполи.

За проектираните при работна честота $f_r = 3{,}2\ GHz$ модели правоъгълен печатен дипол: *Модел 1* (фиг.4.4), *Модел 2* (фиг.4.5) и *Модел 3* (фиг.4.6) са представени съответните диаграми на насоченост в *E*-равнина и *H*-равнина. Направено е сравнение в табличен вид на получените резултати при изчисление

и проведени симулации на база разработен алгоритъм в програмната среда Matlab. Установява се постигане на достоверна точност при виртуално моделиране на елемента на база зададени входни параметри: f_r , ε_r и h .

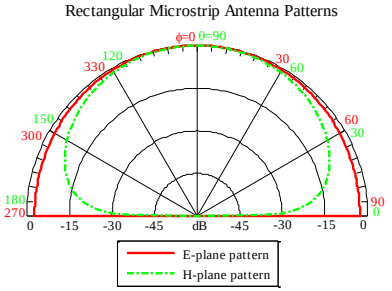


Табл. 4.4.

Параметри Модел 1	Математическо изчисление	Резултат от Matlab симулация
W [cm]	2,814	2,827
L [cm]	2,204	2,204
L_{eff} [cm]	2,25	2,25
R_{in} [Ω]	327,317	326,795
$D_{пач}$ [-]	3,93	3,954
$D_{пач}$ [dB]	5,943	5,97

Фиг. 4.4. Диаграма на насоченост и сравнение на получените резултати за *Модел 1* [$\varepsilon_r = 4{,}5;\ h = 0{,}51\ mm$].

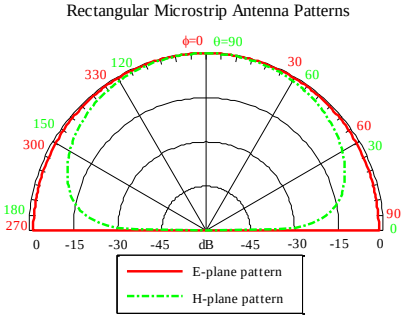


Табл. 4.5.

Параметри Модел 2	Математическо изчисление	Резултат от Matlab симулация
W [cm]	2,25	2,235
L [cm]	1,68	1,679
L_{eff} [cm]	1,693	1,693
R_{in} [Ω]	463,646	446,658
$D_{пач}$ [-]	3,56	3,503
$D_{пач}$ [dB]	5,513	5,448

Фиг. 4.5. Диаграма на насоченост и сравнение на получените резултати за *Модел 2* [$\varepsilon_r = 7{,}8;\ \ h = 0{,}15\,mm$].

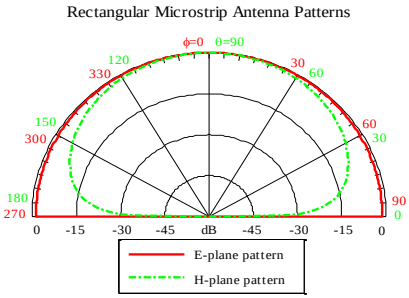


Табл. 4.6.

Параметри Модел 3	Математическо изчисление	Резултат от Matlab симулация
W [cm]	2,087	2,086
L [cm]	1,554	1,555
L_{eff} [cm]	1,576	1,577
R_{in} [Ω]	522,395	523,488
$D_{пач}$ [-]	3,45	3,428
$D_{пач}$ [dB]	5,378	5,35

Фиг. 4.6. Диаграма на насоченост и сравнение на получените резултати за *Модел 3* [$\varepsilon_r = 9{,}1;\ \ h = 0{,}25\,mm$].

Процедурата по проектиране на модели кръгова микролентова антена е реализирана с оглед проектиране на три модела печатен дипол с кръгова геометрия и избор на един от тях като компонент на антенната решетка.

При зададени: резонансна честота $f_r = 12{,}2\ GHz$ (Ku-лента, използвана при сателитни комуникации) и параметри на използваните диелектрични подложки: *Модел 4* [$\varepsilon_r = 2{,}6;\ h = 1{,}524\ mm$], *Модел 5* [$\varepsilon_r = 4{,}3;\ \ h = 3{,}175\,mm$] и *Модел 6* [$\varepsilon_r = 7{,}8;\ \ h = 0{,}15\,mm$] се определят изходните параметри:

- Геометричен размер (a - геометричен и a_{eff} - електрически радиус на печатния дипол), активно входно съпротивление (R_{in}) на кръговата микролентовата антена и местоположение точката на съгласуване при свързване със захранващата линия ($R_{in} = 50\Omega$) се изчисляват при извършени преобразувания относно получаване на резултатите в единица [cm] за придобиване на реална представа геометрията на проектирания елемент. Представена е последователността на изчисления, като получените резултати по посочените параметри относно трите модела са обобщени в табличен вид.
- Изчисление на насочеността на кръговата пач антена ($D_{пач}$) на база изрази (4.6) и (4.5-3).

За проектираните при работна честота $f_r = 12{,}2\ GHz$ модели печатен дипол с кръгова геометрия: *Модел 4* (фиг.4.8), *Модел 5* (фиг.4.9) и *Модел 6* (фиг.4.10) са представени съответните диаграми на насоченост в *E*-равнина и *H*-равнина. В табличен вид е направено сравнение на получените резултати при изчисление и проведени симулации на база разработен алгоритъм при прилагане на основния математически апарат при числено интегриране в програмната среда Matlab. Установява се постигане на висока точност на резултатите при виртуално моделиране на елемента на база зададени входни параметри: f_r , ε_r , $\tan\delta$ и h .

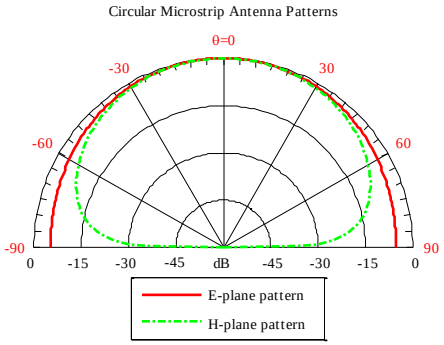


Табл. 4.9.

Параметри Модел 4	Математическо изчисление	Резултат от Matlab симулация
a_{eff} [cm]	0,447	0,451
a [cm]	0.396	0,396
R_{in} [Ω]	448,53	444,13
ρ_0 [cm]	0,096	0,097
$D_{пач}$ [-]	5,027	5,039
$D_{пач}$ [dB]	7,013	7,024

Фиг. 4.8. Диаграма на насоченост и сравнение на получените резултати за *Модел 4* [$\varepsilon_r = 2{,}6$; $h = 1{,}524\ mm$; $\tan\delta = 0{,}0017$].

За проектираните модели правоъгълна и кръгова микролентови антени при анализ на получените изчислителни и симулационни резултати се установи:

- Формираната в *E*-равнина диаграма на насоченост е почти изотропна, при тази в *H*-равнина се наблюдава отсъствие на странични листи.
- Изборът на вида диелектрична подложка оказва съществено влияние върху определянето на геометричните размери на проектирания елемент и

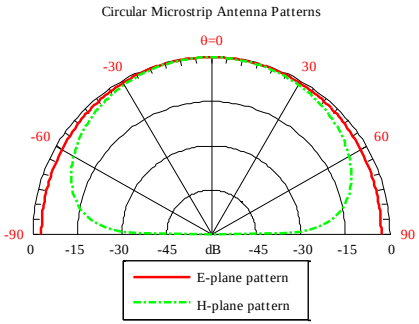


Табл. 4.10.

Параметри Модел 5	Математическо изчисление	Резултат от Matlab симулация
a_{eff} $[cm]$	0,348	0,351
a $[cm]$	0,303	0,303
R_{in} [Ω]	614,97	607,03
ρ_0 $[cm]$	0,064	0,064
$D_{пач}$ [-]	4,13	4,1
$D_{пач}$ $[dB]$	6,163	6,126

Фиг. 4.9. Диаграма на насоченост и сравнение на получените резултати за *Модел 5* [$\varepsilon_r = 4{,}3$; $h = 3{,}175\,mm$; $\tan\delta = 0{,}0018$].

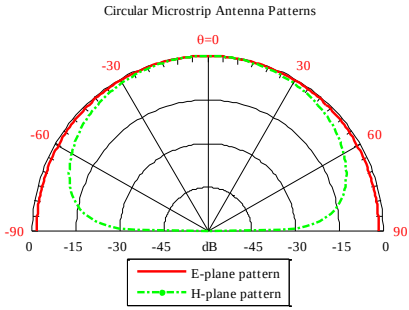


Табл. 4.11.

Параметри Модел 6	Математическо изчисление	Резултат от Matlab симулация
a_{eff} $[cm]$	0,258	0,258
a $[cm]$	0,254	0,255
R_{in} [Ω]	251,45	251,32
ρ_0 $[cm]$	0,075	0,075
$D_{пач}$ [-]	3,635	3,536
$D_{пач}$ $[dB]$	5,605	5,486

Фиг. 4.10. Диаграма на насоченост и сравнение на получените резултати за *Модел 6* [$\varepsilon_r = 7{,}8$; $h = 0{,}15\,mm$; $\tan\delta = 0{,}0018$].

съответно рефлектира върху неговата диаграма на насоченост. При отчитане на съотношение размер на компонента към реализирана насоченост за представените модели на печатен дипол се счита, че при *Модел 1* и при *Модел 4* се постига висока насоченост при малък конструктивен размер.

- При малки геометрични размери на елемента, взаимната активна проводимост (G_{12}) оказва съществено влияние върху стойността на активното входно съпротивление на правоъгълната микролентова антена. Поради получена висока стойност по посочения показател (R_{in}) е необходимо при свързване на печатния дипол със захранващата линия да се дефинират кординатите на точката на свързване с оглед реализиране на идеално съгласуване. При анализ на съответстващите данни от изчисление и симулация за трите модела се счита, че при *Модел 1* е постигната оптималност относно посочените критерии.
- Стойността на активното входно съпротивление на кръговия печатен дипол е функция на параметъра пълна активна проводимост (G_t) и респективно неговата съставяща G_{rad} влияе върху насочеността на елемента ($D_{пач}$). При сравнение на получените резултати за трите модела микролентова антена

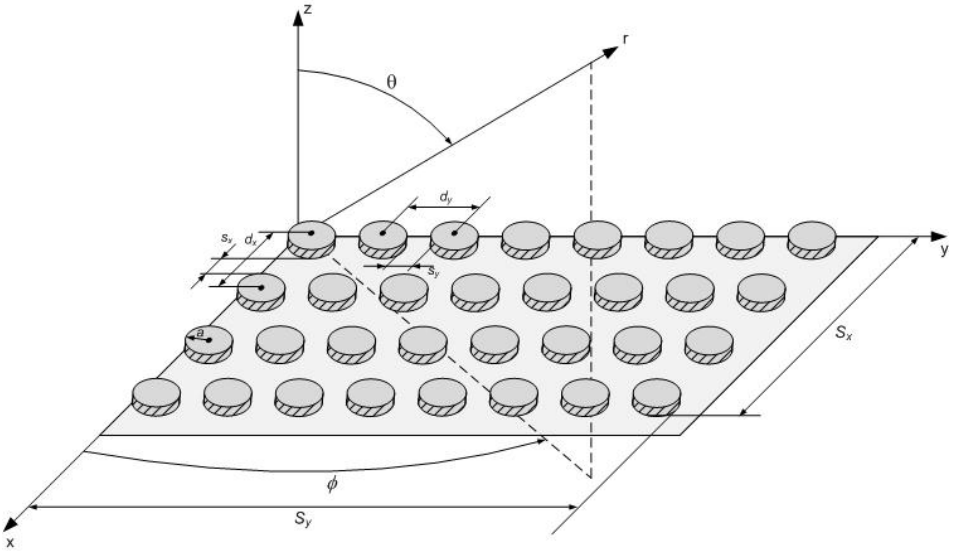
относно посочените показатели се установява, че *Модел 4* е най-подходящ за приложение при проектиране на антенна решетка.

- Относно проектираните шест модела микролентови антени се установява, че при $k_0 a < k_0 W$ и $k_0 a < k_0 L$ се постига по-висока насоченост при кръгов печатен дипол в сравнение с тази при правоъгълен такъв. На база анализ и сравнение на получените антенни характеристики при отчитане на основните предимства и недостатъци относно прилагане на всеки един от моделите като компонент на решетъчна структура се счита, че при следващата стъпка от процеса проектиране на smart-антена целесъобразен избор е използване на *Модел 1* (правоъгълна геометрия) и *Модел 4* (кръгова геометрия) като основни елементи.

4.3. Формиране на специфична конфигурация антенна решетка при използване на основен елемент печатен дипол (правоъгълна и кръгова геометрии).

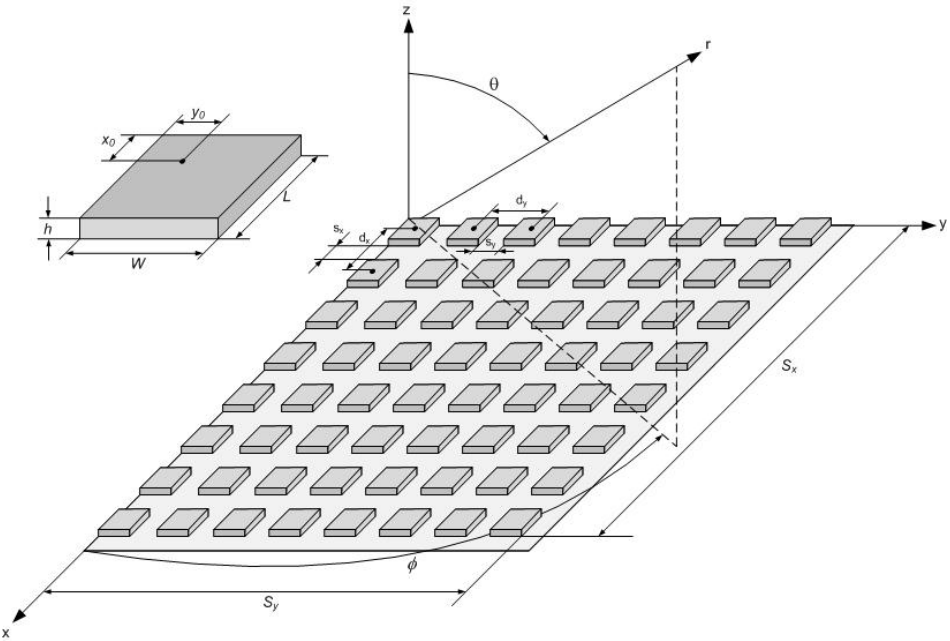
В тази точка при отчитане на факторите, оказващи съществено влияние при формирането на антенната диаграма на насоченост (вид на антенните компоненти, брой на антенните компоненти и междуелементно разстояние), които са и водещ критерий при специфициране на подходяща конфигурация антенна решетка са формирани две конфигурации правоъгълна еквидистантна антенна решетка с основен елемент печатен дипол (правоъгълна и кръгова геометрии):

- *Модел 1*: Равнинна антенна решетка (фиг.4.11), състояща се от тридесет и два идентични елемента (*Модел 4* на кръгов печатен дипол) с конструктивни параметри, систематизирани в табличен вид.



Фиг. 4.11. Геометрия на 32-елементна правоъгълна еквидистантна решетка с основен антенен елемент кръгова микролентова антена.

➢ *Модел 2*: Планарна антенна решетка (фиг.4.12) с шестдесет и четири идентични компонента на решетъчната структура (*Модел 1* на правоъгълна микролентова антена) с основни параметри относно геометрията на антенния елемент и на проектираната антенна система, систематизирани в табличен вид.



Фиг. 4.12. Геометрия на 64-елементна правоъгълна еквидистантна решетка с основен антенен елемент правоъгълна микролентова антена.

При проектиране на антенна система, основен момент е избор на конкретен модел, отговарящ на спецификата на първоначално дефинирани изисквания (работна честота, антенни характеристики) с оглед постигане на оптималност относно конструктивни размери и излъчвателни характеристики. При конкренизиране на работната честота на антенната структура са формирани представените два модела със съответна конфигурация и геометрия. Основните антенни характеристики на избраните модели са изследвани и анализирани за установяване степентта на постигната точност при синтезиране на пълна диаграма на насоченост, формирана като резултантна от съответните диаграми на фактора на решетката и на антенния елемент.

Основните антенни характеристики на избраните две конфигурации правоъгълна еквидистантна антенна решетка (*Модел 1* и *Модел 2*) са изследвани и анализирани при зададена посока на приемания полезен сигнал ($\theta_0 = 0^0$, $\phi_0 = 22^0$):

- Факторът на решетката при изпълнение на поставеното изискване в диаграмата на насоченост да се формира максимум в направление (θ_0, ϕ_0) се

дефинира на база изрази (1.61-2) ÷ (1.61-4).

- Процедурата за изчисление на максималната насоченост на правоъгълна антенна решетка се базира на данните за определяне насочеността на линейна равномерна решетка със странично излъчване (1.66-2).

➢ *Модел 1*: За определяне насочеността на 32-елементната решетка се използват стойностите на насоченост ($D_{0(4)}, D_{0(8)}$) на линейни решетки съответно с брой елементи $M = 4$ и $N = 8$:

$$D_{0(4)} = \frac{2Md_x}{\lambda_0} = 7{,}16 \tag{4.7-1}$$

$$D_{0(8)} = \frac{2Nd_y}{\lambda_0} = 11.71 \tag{4.7-2}$$

$$D_{0(4\times8)} = \pi \cos\theta_0 D_{0(4)} D_{0(8)} = 263{,}45 \tag{4.7-3}$$

$$D_0[dB] = 10\log_{10}\left(D_{0(4\times8)}\right) = 24{,}21\,dB \tag{4.7-4}$$

➢ *Модел* 2: Определяне насочеността на 64-елементна решетка:

$$D_{0(8)} = \frac{2Nd_y}{\lambda_0} = 8 \tag{4.8-1}$$

$$D_{0(8\times8)} = \pi \cos\theta_0 D_{0(8)}^2 = 201{,}06 \tag{4.8-2}$$

$$D_0[dB] = 10\log_{10}\left(D_{0(8\times8)}\right) = 23{,}03\,dB \tag{4.8-3}$$

- Ширината на главния лист на диаграмата на ниво ½ мощност (Θ_h) се изчислява от израз (1.64-1) при определяне на ширината на главния лист на ниво ½ мощност (Θ_{x0}, Θ_{y0}) за линейна равномерна решетка със странично излъчване, състояща се съответно от M и от N на брой елемента (3.4-4):

➢ *Модел* 1: Определяне Θ_h (HPBW) на 32-елементна решетка:

$$\Theta_{x0(4)} = 2\left[\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{1{,}391\lambda_0}{\pi Md_x}\right)\right] = 14{,}2^\circ \tag{4.9-1}$$

$$\Theta_{y0(8)} = 2\left[\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{1{,}391\lambda_0}{\pi Nd_y}\right)\right] = 8{,}68^\circ \tag{4.9-2}$$

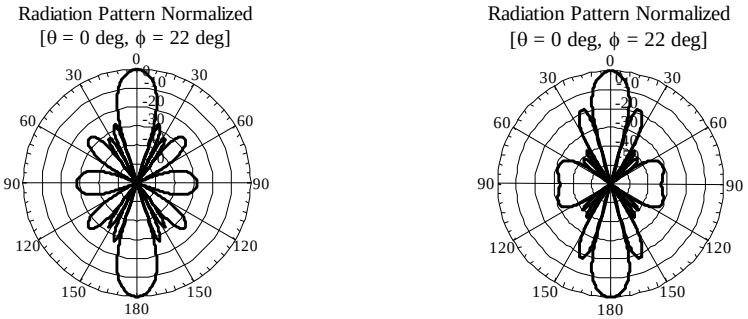
$$\Theta_h(HPBW) \approx \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_0\left[\Theta_{x0(4)}^{-2}\cos^2\phi_0 + \Theta_{y0(8)}^{-2}\sin^2\phi_0\right]}} = 13{,}13^\circ \tag{4.9-3}$$

➢ *Модел* 2: Изчисление на Θ_h (HPBW) на 64-елементна решетка:

$$\Theta_{x0(8)} = \Theta_{y0(8)} = 2\left[\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{1{,}391\lambda_0}{\pi Nd}\right)\right] = 12{,}72^\circ \tag{4.10-1}$$

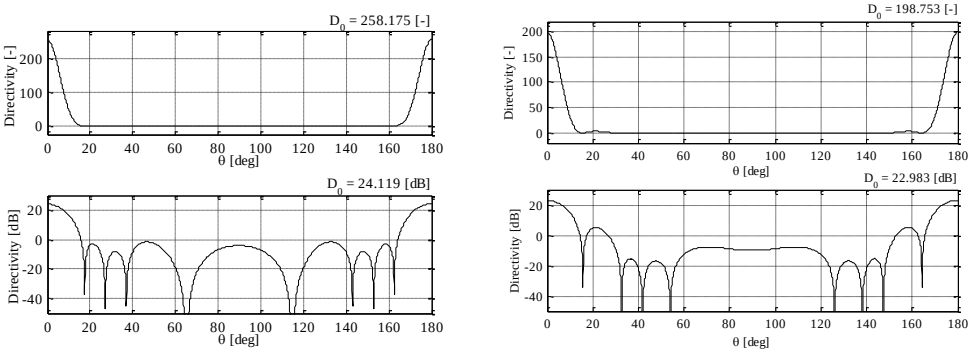
$$\Theta_h(HPBW) = \Theta_{x0(8)} \sec\theta_0 = 12{,}72^\circ \qquad (4.10\text{-}2)$$

Антенните характеристики на проектираните два модела антенни решетки, получени на база симулации при разработен алгоритъм при използване на съответния математически апарат в програмната среда Matlab са представени съответно на фиг.4.13 и фиг.4.15. Фиг.4.13 илюстрира получените диаграми на насоченост за двата модела в равнината на елевация при нормиране относно максимума при ($\theta_0 = 0^0, \phi_0 = 22^0$). Отчита се формиране на странични листи, като при *Модел 1* нивото на първи страничен лист е ($-28\ dB$) под нивото на максимума на главен лист, при *Модел 2* съответно ($-19\,dB$), което се обяснява с по-малкото междуелементно разстояние при посочения модел. Диаграма на реализираната насоченост за двете решетки е представена на фиг.4.15. Получените резултати при изчисление и проведени симулации относно двата модела са обобщени в табличен вид и е изчислена относителната грешка, получена при симулационните резултати на база изчислените такива.



а) б)

Фиг. 4.13. Двумерна нормирана диаграма на насоченост на правоъгълна антенна решетка: а) *Модел 1* (32-елементна решетка); б) *Модел 2* (64-елементна решетка).



а) б)

Фиг. 4.15. Диаграма на максималната насоченост на правоъгълна антенна решетка: а) *Модел 1* (32-елементна решетка); б) *Модел 2* (64-елементна решетка).

При анализ на данните от получените изчислителни и симулационни резултати относно проектираните два модела антенни решетки с правоъгълна геометрия се установи:

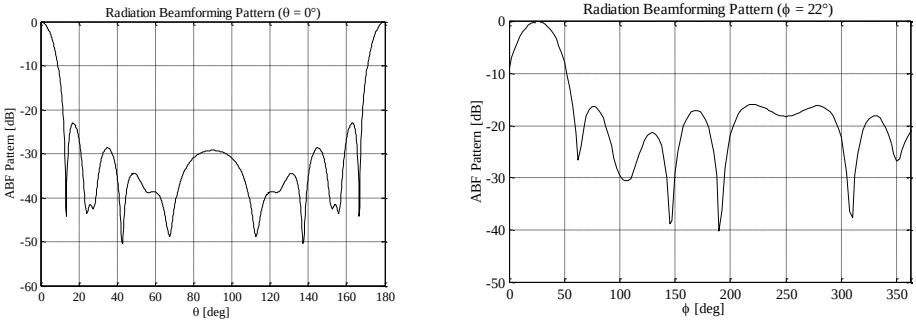
- Постигане на по-добра насоченост при *Модел 1* (фиг.4.15) при по-малък брой антенни компоненти, поради по-голямото отстояние помежду им, повлияващо съответните стойности на насоченост на линейните равномерни решетки със странично излъчване, на база на които се изчислява максималната насоченост на планарната антенна решетка (4.7-1), (4.7-2), (4.8-1) и (4.8-2).
- По-тесен главен лист в диаграмата на насоченост на ниво ½ мощност ($\Theta_h(HPBW)$) при *Модел 2* поради използван по-голям брой антенни елементи и квадратна геометрия на антенната структура.

При прилагане на адаптивни техники относно оценяване посоките на приетите сигнали и формиране на диаграма на насоченост към проектираните два модела правоъгълни антенни структури: *Модел 1* (решетка от тридесет и два идентични елемента тип кръгова микролентова антена) и *Модел 2* (решетка от шестдесет и четири идентични елемента тип правоъгълна микролентова антена) същите се трансформират в адаптивна антенна система (smart-антена). Изследването относно постигнатата точност при определяне посоките на приеманите теснолентови радиочестотни сигнали и прецизността на формираната диаграма на насоченост е проведено при използване на избраната DOA техника (2-D unitary ESPRIT метод) – действителна оценка за направлението на приемания сигнал се формира на база математически апарат (2.7-1)÷(2.11-2) и прилагане на избраната ABF техника (ULMS алгоритъм) - основава се на математически апарат (2.16)÷(2.19-4) за адаптивно формиране на антенната диаграма на насоченост. Оценка на точността и прецизността при работа на двата модела адаптивни антенни решетки е осъществена посредством прилагане на разработени алгоритми в програмната среда Matlab на база математическия апарат на избраните методи и осъществени симулации при следната постановка:

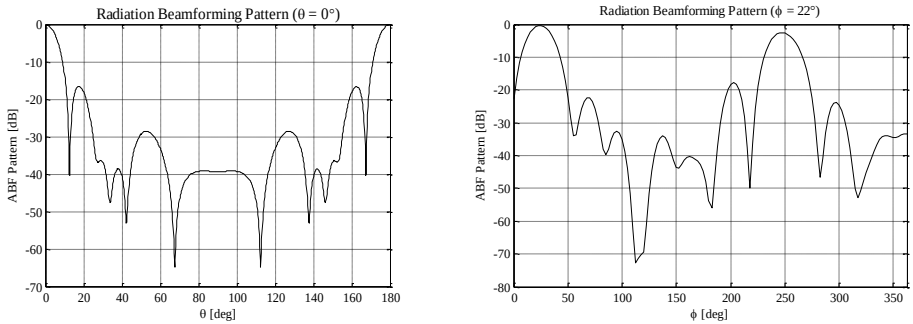
- Определяне направлението на приеманите от антенната система сигнали (2-D unitary ESPRIT метод) при зададени посоки на: полезен сигнал SOI (θ_0, ϕ_0) и два смущаващи сигнала, съответно SNOI 1 (θ_1, ϕ_1), SNOI 2 (θ_2, ϕ_2) в средата на адитивен бял гаусов шум (AWGN) със средна стойност нула и вариация 0.1. Резултатите относно получените DOA оценки за двата модела са обобщени в табличен вид. При проведените симулации се установява наличие на минимални отклонения в получените в реално време оценки относно посоката на SOI в среда на шум и смущаващи сигнали при използване на 2-D unitary ESPRIT метод. Устойчивост относно точността на получените резултати се наблюдава при *Модел 2*, което може да бъде обяснено с размерността на антенната решетка и работната честота на системата, отчитани от алгоритъма в изчислителната процедура при формиране на матрицата на решетката (2.7-1) и нейната реална оценка (2.9-1).
- Адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на двата модела антенна решетка (ULMS метод) при наличие на смущаващ сигнал SNOI 1 и

адитивен бял гаусов шум (AWGN) със средна стойност нула и вариация 0.1. Избран е размер на стъпката за приложения алгоритъм $\mu = 0{,}001$. Резултатите от проведените симулации са представени във вид на двумерни диаграми на насоченост в съответните равнини на елевация и азимут. В равнината на елевация е посочен ъгъл θ, при който настъпва максимум за съответния ъгъл ϕ, аналогично означение е прието и за равнината на азимут – ъгъл ϕ, при който се отчита максимум за съотвен ъгъл на елевация θ.

На фиг.4.16 и фиг.4.20 са представени двумерните диаграми на насоченост, формирани при прилагане на адаптивния ULMS метод съответно за *Модел 1* и *Модел 2*.



Фиг. 4.16. Двумерна диаграма на насоченост за *Модел 1* при направление на приемания сигнал ($\theta_0 = 0^0$, $\phi_0 = 22^0$).



Фиг. 4.20. Двумерна диаграма на насоченост за *Модел 2* при направление на приемания сигнал ($\theta_0 = 0^0$, $\phi_0 = 22^0$).

За изследваните два модела правоъгълни еквидистантни smart-антени: *Модел 1* (адаптивна решетка от тридесет и два идентични елемента тип кръгова микролентова антена) и *Модел 2* (адаптивна решетка от шестдесет и четири идентични елемента тип правоъгълна микролентова антена), при анализ на получените симулационни резултати при прилагане на адаптивни техники (2-D unitary ESPRIT метод, ULMS алгоритъм) се установи:

- Относно получените симулационни резултати при използване на 2-D unitary ESPRIT метода за определяне посоката на приетите теснолентови

сигнали се отчита достоверна точност на получените оценки при регистриране на минимална абсолютна грешка, което доказва прецизността на приложения алгоритъм.

- При прилагане на техника (ULMS алгоритъм) за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на правоъгълни адаптивни решетки и отчитане точността на получените резултати относно двата фактора: полезен сигнал (максимум) и смущаващи сигнали (формиране на нули) се установи, че при *Модел 1* точността и прецизността при формиране на диаграмата е по-висока в сравнение с точността на формираната диаграма при *Модел 2*, което се обяснява с по-добрата насоченост на антенния елемент, използван при първия модел и по-голямото отстояние между антенните компоненти, при което отсъства ефекта на взаимно влияние в този случай. При използване на посочената адаптивна техника и при двата модела се отчита достоверно формиране на антенната диаграма на насоченост.

4.4. Сравнителен анализ на получените резултати при виртуално изследване на адаптивна антенна решетка *Модел 1* с експериментални данни.

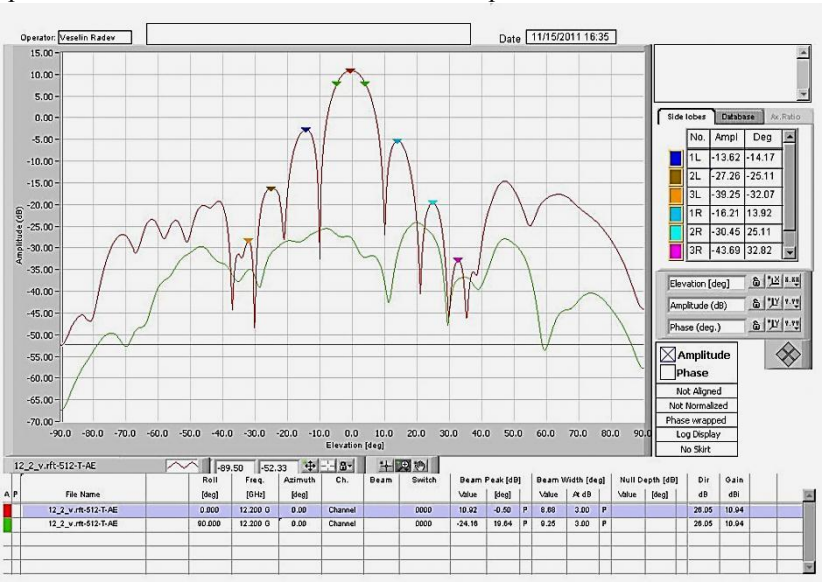
Антенна решетка със съответстващи на *Модел 1* конструктивни параметри при работна честота $12{,}2\ GHz$ е изработена от фирма “Ray Sat” - гр. София. В лабораторията на фирмата са извършени експериментални измервания на амплитудните диаграми на насоченост в равнината на елевация при направление на сканиране на сигнала (θ_0, ϕ_0) и са предоставени съответните данни. Съответстващите амплитудни диаграми на насоченост за формираната адаптивна решетка *Модел 1* са симулирани на база разработени алгоритми при използване на програмна среда Matlab, осигуряваща възможност за пространствена визуализация в графична форма на получените резултати за изследваните величини:

- Амплитудна диаграма на насоченост в равнината на елевация при направление на сигнала ($\theta_0 = 0^\circ, \phi_0 = 0^\circ$). На фиг.4.24 е представен резултатът от експерименталното изследване на формираната диаграма на антенната решетка при отчитане на основните показатели, които са критерий за постигната точност и прецизност: насоченост на главен лист – максимална стойност и местоположение (*Beam Value* $[dB]$), *SLL* (ниво и местоположение на първите три формирани странични листи от лява (*1L, 2L, 3L*) и дясна (*1R, 2R, 3R*) страни относно главен лист), ширина на главен лист на диаграмата на ниво ½ мощност (HPBW). На фиг.4.25 е представена симулираната съответстваща диаграма в среда на адитивен бял гаусов шум (AWGN) със средна стойност нула и вариация 0.1 и са отчетени стойностите на посочените показатели.

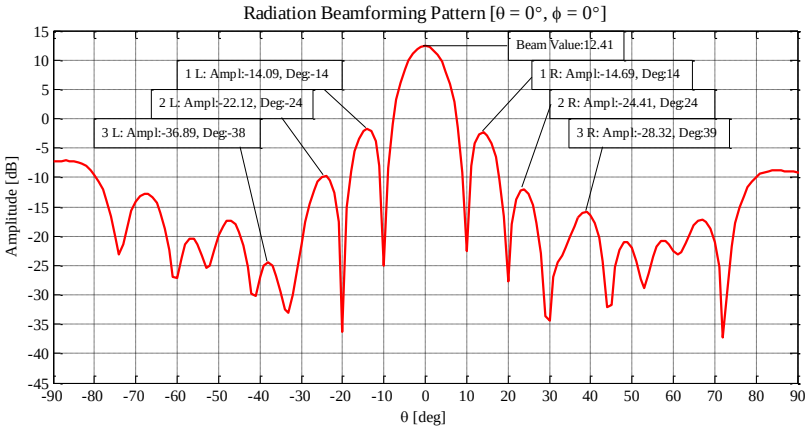
При сравнителен анализ на получените резултати се установява по-високо ниво по амплитудна стойност на главен лист в симулираната диаграма на адаптивната решетка с $1{,}49dB$ при съвпадащо местоположение $\theta = 0^\circ$ (направление на приетия сигнал). При едно и също ниво на отчитане на

HPBW, ширината на главния лист е с $0{,}06^\circ$ по-тясна от измерената $\Theta_h(HPBW) = 8{,}62^\circ$. Първа нула се регистрира при $\theta = -10^\circ$ и при двете диаграми, с ниво относно максимума на главен лист съответно $-43{,}2dB$ и $-37{,}4dB$ от измерване и симулация. За формираните странични листи в амплитудните диаграми на насоченост, при сравнение на нивото на съответните такива се наблюдава по-ниско *SLL* при измерване. Отчита се разлика и в местоположението, при което настъпва максимум за съответните странични листи, като в получената диаграма на база симулации същите са разположени спрямо главния лист при ясно изразена симетрия. Констатираните несъответствия се счита, че са в резултат на прилагането на адаптивна техника за формиране на решетъчната диаграма на насоченост – изчисление и оценяване на оптималните тегла на антенната решетка при съответно избрани амплитудно и фазово разпределения, както и на процедурата по изпълнение на алгоритъма (размер на избраната стъпка и брой итерации). При използване на същия се установява достоверна точност при формиране на максимум в направление на приемания тесполентов радиочестотен сигнал ($\theta = 0^\circ$) при относително ниско ниво на формираните странични листи, съответно от дясна страна на главен лист в граници $[-28{,}32dB;\ -14{,}69dB]$ и от лява страна – в интервала $[-36{,}89dB;\ -14{,}09dB]$.

По описания модел на сравнителен анализ са отчетени констатираните разлики в предоставени резултати и получени такива при виртуалното изследване за всички разгледани случаи относно формираната амплитудна диаграма на насоченост на адаптивна антенна решетка *Модел 1*.

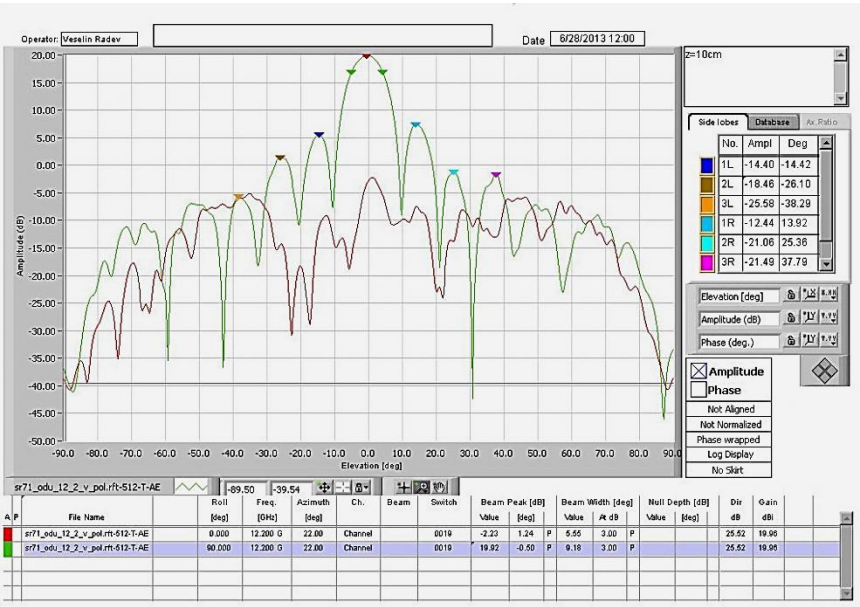


Фиг. 4.24. Измерена амплитудна диаграма на насоченост при направление ($\theta_0 = 0^\circ, \phi_0 = 0^\circ$).

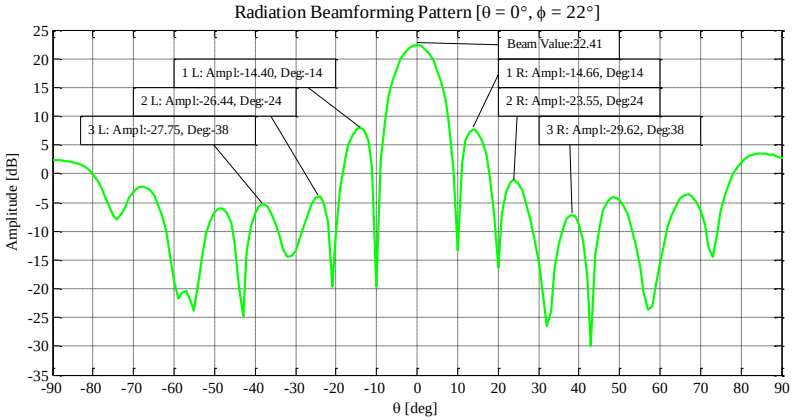


Фиг. 4.25. Амплитудна диаграма на насоченост от симулация при $(\theta_0 = 0^\circ, \phi_0 = 0^\circ)$.

- Амплитудна диаграма на насоченост в равнината на елевация при направление на сигнала $(\theta_0 = 0^\circ,\ \phi_0 = 22^\circ)$. На фиг.4.26 и фиг.4.27 са представени съответно резултатите от експериментално и виртуално изследвания.



Фиг. 4.26. Измерена амплитудна диаграма на насоченост при направление $(\theta_0 = 0^\circ,\ \phi_0 = 22^\circ)$.

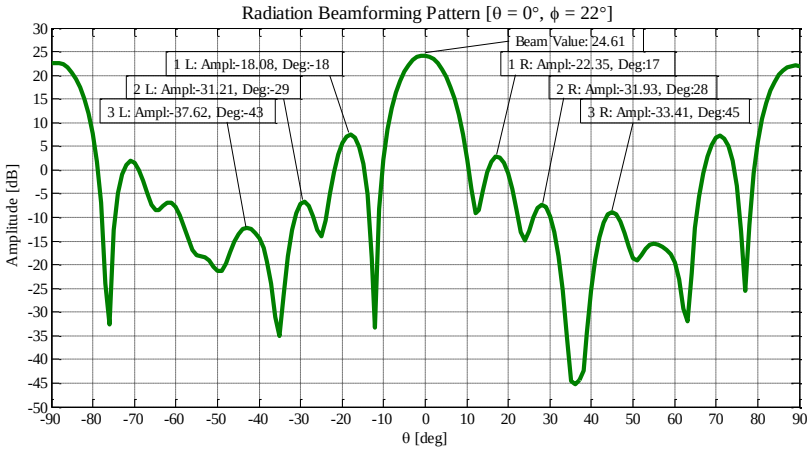


Фиг. 4.27. Амплитудна диаграма на насоченост от симулация при ($\theta_0 = 0^\circ$, $\phi_0 = 22^\circ$).

При сравнителен анализ се установява по-високо ниво по амплитудна стойност на главен лист в симулираната диаграма на адаптивната решетка с $2{,}49dB$ при съвпадащо местоположение $\theta = 0^\circ$. При едно и също ниво на отчитане на HPBW, ширината на главния лист е с $0{,}14^\circ$ по-широка от измерената $\Theta_h(HPBW) = 9{,}32^\circ$. Първа нула при $\theta = -10^\circ$ за двете диаграми е с ниво относно максимума на главен лист съответно $-27{,}42dB$ и $-42{,}22dB$ от измерване и симулация. За формираните странични листи в амплитудните диаграми на насоченост, при сравнение на нивото на съответните такива се наблюдава по-ниско *SLL* при симулация. Отчита се относително малка разлика в местоположението, при което настъпва максимум за съответните странични листи, като и при двете диаграми същите са разположени симетрично относно главен лист. При използване на адаптивния алгоритъм се установява достоверна точност при формиране на максимум в направление на приемания радиочестотен сигнал ($\theta = 0^\circ$) при ниско ниво на формираните странични листи, съответно от дясна страна на главен лист в граници $[-29{,}62dB;\ -14{,}66dB]$ и от лява страна – в интервала $[-27{,}75dB;\ -14{,}40dB]$.

На база на сравнителен анализ на получените резултати при експериментално и виртуално изследвания на антенна решетка *Модел 1* относно основните показатели, оказващи съществено влияние върху точността и прецизността на формираната амплитудна диаграма на насоченост и отчетена достоверност на същата при използване на адаптивна техника са представена амплитудната диаграма на насоченост в равнината на елевация при направление на сканиране на сигнала ($\theta_0 = 0^\circ$, $\phi_0 = 22^\circ$) за адаптивна антенна решетка *Модел 2* при работна честота $3{,}2\ GHz$. На фиг.4.34 е представена формираната адаптивна диаграма на насоченост на антенна решетка при наличие на адитивен бял гаусов шум (AWGN) със средна

стойност нула и вариация 0.1. Отчетени са основните показатели, които са критерий за постигната точност и прецизност: ниво на главен лист по амплитудна стойност $24{,}61dB$ при съвпадащо местоположение $\theta = 0^\circ$ с направлението на приетия сигнал. Ширината на главния лист е $\Theta_h(HPBW) = 8{,}56^\circ$. Първа нула се регистрира при $\theta = -11^\circ$ и е с ниво относно максимума на главен лист $-58{,}36dB$. Относно формираните странични листи в диаграмата на насоченост се наблюдава относително ниско ниво, съответно за разположени от дясна страна на главен лист в граници $[-33{,}41dB;\ -22{,}35dB]$ и от лява страна – в интервала $[-37{,}62dB;\ -18{,}08dB]$.



Фиг. 4.34. Амплитудна диаграма на насоченост (*Модел 2*) от симулация при направление на сигнала ($\theta_0 = 0^\circ$, $\phi_0 = 22^\circ$).

От извършения сравнителен анализ на данните от експериментално и виртуално изследвания на антенна решетка *Модел 1* и представените данни на база симулации за адаптивна антенна решетка *Модел 2* се установи:

- При използване на адаптивна техника (ULMS алгоритъм) за формиране на антенната диаграма на насоченост се отчита достоверна точност и прецизност на същата и се наблюдава по-високо ниво по амплитудна стойност на максимума на главния лист при относително еднаква ширина HPBW в сравнение с отчетените експериментални данни за стандартната антенна решетка. Направените заключения се отнасят особено за интервала около главния максимум $-45^\circ < \theta < 45^\circ$.
- При сравнение на получените симулационни резултати при *Модел 1* и *Модел* 2 относно формираната адаптивна диаграма на насоченост може да се счита, че при наличие на експериментални данни за *Модел 2* би следвало да се наблюдават принципно същите отклонения в показателите, дължащи се на приложения адаптивен метод и постигане на достоверна точност и прецизност на формираната диаграма и в този случай.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставената цел в дисертационния труд е изпълнена чрез използване на аналитични методи, базирани на теорията електромагнитното поле и антенната теория. Моделирането е извършено на база разработени алгоритми при използване на програмна среда Matlab. Експерименталните изследвания са проведени в лабораторията за изпитания на фирма “Ray Sat” - гр. София.

Обобщавайки резултатите, изложени във всяка глава от дисертационния труд могат да се формулират следните основни резултати от извършените изследвания:

1. Теоретичен анализ и теоретично изследване на различни видове излъчватели и типове антенни конфигурации. Систематизиране на влияещите фактори и анализиране на основните предимства и недостатъци при приложението им в безжичните комуникации.

2. Предложен е метод за определяне на направлението на приемания теснолентов радиочестотен сигнал посредством адаптивна техника за формиране на диаграмата на насоченост при отчитане спецификата на използваните излъчватели като съставен елемент от антенната решетка. Въз основа на съпоставителен анализ на критериите – отклонение, резолюция, вариация и чувствителност е избран оптимален DOA алгоритъм за оценяване направлението на приеманите теснолентови радиочестотни сигнали от източници, разположени в далечната зона спрямо антенната решетка. Избраният оптимален ABF метод за експерименталните изследвания позволява да се отчитат предимствата и недостатъците при прилагане на адаптивни техники за формиране на антенната диаграма на насоченост.

3. Предложен е теоретичен подход за моделиране работата на избраните конфигурации адаптивни антенни решетки с класически елементи и печатни диполи. Въз основа на теоретичния модел е създаден софтуерен модел за симулиране антенната диаграма на насоченост на многоелементни адаптивни антенни решетки с компоненти класически дипол.

4. Теоретично са изследвани различни конфигурации на многоелементни антенни решетки, като е установено влиянието на геометричните размери и вида на елемента върху формиращата се диаграма на насоченост с цел постигане на оптимални конструктивни размери на антенната решетка. При сравняване на получените резултати от изчисленията и проведените симулации в програмната среда Matlab за конфигурации на два типа антенни решетки: линейна (равномерно и неравномерно амплитудни разпределения) и равнинна (правоъгълна, кръгова) се отчита постигане на достоверна точност на виртуалното изследване. Получените симулационни резултати са сравнени на база 2-D unitary ESPRIT и UCA-ESPRIT методи относно приетите теснолентови сигнали и е установено, че в получената абсолютна грешка спрямо реално зададените направления се наблюдава минимално отклонение във формираните оценки.

5. Посредством разработения теоретичен модел и създадения софтуерен модел виртуално са изследвани основните антенни характеристики на адаптивни структури при отчитане на геометрията на антенната конфигурация за формиране на подходяща диаграма на насоченост и е

предложен оптимален вариант на такава. При прилагане на ULMS алгоритъм за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на правоъгълни и кръгови адаптивни решетки и отчитане точността на получените резултати относно двата фактора: полезен сигнал (максимум) и смущаващи сигнали (формиране на нули) се установи, че при антенен елемент полувълнов електрически дипол точността и прецизността на формираната диаграма е по-висока в сравнение с тази при антенен компонент малък електрически дипол. Изследването на ефекта на взаимно влияние между антенните елементи и неговото последващо компенсиране доказа, че при проектиране на адаптивна антенна система същият трябва да бъде отчетен и избора на междуелементно решетъчно разстояние да е съобразен с неговото наличие.

6. Предложен е модел, систематизиращ основните етапи при проектиране на многоелементна адаптивна антенна система с компонент печатен дипол. Проектирани са шест модела микролентови антени, съответно с правоъгълна геометрия (*Модел 1*, *Модел 2* и *Модел 3*) и кръгова геометрия (*Модел 4*, *Модел 5* и *Модел 6*) с оглед избор на оптимален такъв като елемент на антенната структура. На база анализ и сравнение на получените антенни характеристики за проектираните модели микролентови антени при отчетени предимства и недостатъци от приложение на всеки като компонент на решетъчна структура е направен избор в следващата стъпка от процеса проектиране на smart-антена за използване на основни елементи *Модел 1* (правоъгълна геометрия) и *Модел 4* (кръгова геометрия).

7. Предложени са две конфигурации правоъгълна планарна решетка: решетка, състояща се от тридесет и два идентични елемента (*Модел 4* на кръгов печатен дипол) при работна честота $12{,}2\ GHz$ и решетка, състояща се от шестдесет и четири идентични елемента (*Модел 1* на правоъгълен печатен дипол) при работна честота $3{,}2\ GHz$. Извършен е числен анализ за влиянието на конструктивните размери на антенния елемент и антенната решетка върху нейните основни антенни характеристики. Доказано е влиянието на междуелементното разстояние върху постигнатата насоченост на антенната структура, както и влиянието на многоелементната антенна решетка и използвания брой компоненти върху ширината $(HPBW)$ на формирания главен лист в диаграмата на насоченост.

8. Предложените два модела правоъгълни еквидистантни smart-антени са изследвани при прилагане на адаптивни техники (2-D unitary ESPRIT метод, ULMS алгоритъм), като при анализ на получените симулационни резултати се установи, че използването на адаптивни техники подобрява антенните характеристики и параметри на формираните решетки.

9. При направен сравнителен анализ на данните от експериментално и виртуално изследвания на антенна решетка *Модел 1* се установи, че при използваната адаптивна техника за формиране на антенната диаграма на насоченост е постигната достоверна точност и прецизност на същата при отчетено по-високо ниво по амплитудна стойност на максимума на главния лист при относително еднаква ширина HPBW в сравнение с експерименталните данни за стандартната антенна решетка. Фактът, че

проектирането на адаптивна антенна система е сложен и обхватен процес, при който е необходимо постигане на компромис относно поставени конструктивни изисквания и реализиране на желани антенни характеристики дава основание да се счита, че представената методика за проектиране на предложените два модела може да се прилага при избор и реализация на оптимална антенна адаптивна структура.

Възможности за приложение на изследваните многоелементни smart-антени:

- В безжични комуникационни системи като елемент на оборудването на базовите станции с оглед ефикасно използване на наличния радиочестотен спектър и увеличаване капацитета на системата.
- В радиотехнически системи като модел при проектиране на многоелементни адаптивни антенни решетки при различна работна честота (в частност, използващи MIMO антенна технология).
- В радиотехнически системи като градивен компонент на антенни структури при изискване за компактност, механична устойчивост и технологична ефективност на конструкцията.

Основни насоки за бъдещи изследвания:

1. Приложение на получените резултати като база при изследване и проектиране на многоелементни адаптивни антенни системи с кръгова геометрия.
2. Изследване на специфични конфигурации кръгова планарна антенна решетка с основен компонент печатен дипол с кръгова геометрия с оглед постигане на оптимални конструктивни параметри и антенни характеристики.
3. Подобряване на разработените в програмна среда Matlab алгоритми за оптимизиране на използвания математически апарат и изследване на допълнителни антенни параметри на проектираните антенни структури.

Благодарности

Изказвам благодарност към своя научен ръководител доц. д-р инж. Сава В. Савов за оказаната помощ и внимание, ползотворните идеи и насоки, на колегите от катедрата за препоръките и съдействието при разработването на настоящия дисертационен труд и на фирма “Ray Sat” - гр. София за оказаното съдействие и предоставени експериментални данни.

Научно-приложни и приложни приноси

В резултат на проведените изследвания и получените резултати в дисертационния труд, според автора могат да се формулират следните основни научно-приложни и приложни приноси:

Научно-приложни приноси:

1. Доказано е, че за увеличаване на честотния ресурс и на капацитета на безжичните комуникационни мрежи е необходимо да се използва нов подход за проектиране на адаптивни антенни структури.
2. Предложен е адекватен модел, отразяващ основните моменти на процеса проектиране на smart-антена.
3. Доказани са предимствата от приложение на печатния дипол (с правоъгълна и кръгова геометрии) като конструктивен елемент при проектиране на адаптивна антенна система.
4. Доказано е, че от изследваните антенни структури, най-подходяща за приложение в безжичните комуникационни мрежи е адаптивната антенна решетка с правоъгълна планарна геометрия.
5. Предложени са две адаптивни техники за подобряване на основните антенни характеристики на многоелементните антенни системи. Предложени са и две специфични конфигурации на smart-антена с повишена точност и прецизност при формиране на адаптивната антенна диаграма на насоченост.
6. Експериментално са потвърдени резултатите от теоретичното и виртуално изследвания на предложените адаптивни антенни структури с подобрени характеристики.

Приложни приноси:

1. На база предложените адаптивни методи са разработени алгоритми в програмната среда Matlab за виртуално изследване на специфични конфигурации на антенни решетки при различна работна честота.
2. Определен е минималният брой входни данни във вид на индикатори при проектиране на smart-антена, необходим за оценка на постигнатите антенни параметри и оптималност на моделираната структура.
3. Установено е, че концептуалният модел за проектиране на smart-антена е приложим като базисен инструментариум при инженерна разработка на адекватен и прецизен модел адаптивна решетъчна система, осигуряващ желани антенни характеристики и параметри при реализиране на икономия от време и средства.

Списък на публикациите по темата на дисертационния труд:

[1] Savov S., Vasileva V., Novel methods for analysis of smart antennas for wireless communications, ICEST 2007, Proceedings of papers, vol. 1, ISBN: 9989-786-06-2, pp. 69-73, Ohrid, Macedonia, June, 2007.

[2] Savov S., Vasileva V., Doneva M., Novel smart antenna based on half-wavelength dipoles, 2nd European conference on antennas & propagation, Edinburgh IET UK poster, November, 2007.

[3] Vasileva V., Doneva M., Savov S., Analysis of uniform rectangular smart antennas with omnidirectional elements, part 1: DOA methods, Годишник на ТУ-Варна, ISSN: 1311-896X, стр. 44-49, 2007.

[4] Doneva M., Vasileva V., Savov S., Analysis of uniform rectangular smart antennas with omnidirectional elements, part 2: ABF algorithms, Годишник на ТУ-Варна, ISSN: 1311-896X, стр. 50-54, 2007.

[5] Vasileva V., Savov S., Doneva M., Analysis of smart antennas with URA based on half-wavelength dipoles - simple DOA and ABF methods, ICEST 2008, Proceedings of papers, vol. 2, ISBN: 978-86-85195-60-0, pp. 388-391, Nic, Serbia, June, 2008.

[6] Василева В., Савов С., Донева М., Правоъгълна еквидистантна смарт антена с изотропни елементи – методи за адаптивно формиране на лъча, компенсиране на взаимното влияние, Сборник научни трудове на РУ "Ангел Кънчев", том 47, серия 3.2, ISSN: 1311-3321, стр. 57-61, 2008.

[7] Василева В., Донева М., Василев Р., Неделчев И., Анализ на смарт антени – адаптивни линейни еквидистантни решетки с равномерно и неравномерно амплитудно разпределение на решетката и диаграма на насоченост, Сборник научни трудове на ШУ "Епископ Константин Преславски", том 2, ISSN: 978-954-577-540-6, стр. 170-176, 2009.

[8] Savov S., Vasileva V., Doneva M., Smart antenna configurations – analysis based on ESPRIT methods, ICEST 2009, Proceedings of papers, vol. 1, ISBN: 978-954-438-796-9, pp. 49-52, V. Tarnovo, Bulgaria, June, 2009.

[9] Vasileva V., Smart antennas with patch elements. Modeling with Matlab, ICEST 2010, Proceedings of papers, vol. 2, ISBN: 978-9989-786-58-7, pp. 559-562, Ohrid, Macedonia, June, 2010.

[10] Василева В., Савов С., Стоилов Т., Проектиране на смарт антена за мобилни комуникации, Сборник доклади научна конференция "Младите в науката 2010", ISDN: 978-954-20-0492-9, ТУ-Варна, стр. 53-56, 2010.

[11] Vasileva V., Uniform Rectangular Smart Antenna – Microstrip Element Modeling and Signal Direction Estimation. "CEMA 2010", 7-9 October, 2010, Athens, Greece. Proc. of Papers, ISSN: 1314-2100, pp. 9-12, Sofia, 2010.

Smart Antenna Design for Wireless Communications

by Vyara Y. Vasileva

(ABSTRACT)

The problem of increasing number of users and increasing demands for wireless services is essential for development of the wireless communications. The subject of the thesis is the smart antenna modeling and design. The aim of thesis is the study, analyses the basic electrical characteristics and choosing the appropriate antenna structure for design – smart antenna system.

The main idea of smart antenna (adaptive array) is using the adaptive techniques for direction of arrival estimation on narrowband radio-frequency signals and the appropriate antenna pattern creation.

The array configuration that is well suited for wireless communication is a planar array because it has to scan the main beam in any direction of elevation and azimuth. In smart antenna via a digital signal processor are estimated the direction of arrival of all received signals and are generated the appropriate weights to ideally steer the main lobe of antenna paterrn toward the signal of interest and to place nulls toward the signal not of interest.

A few configurations of linear and rectangular antenna arrays composed of a number of uniformly distributed identical elements (small electrical dipole, half-lenght dipole and microstrip antenna) were investigated and analysed their antenna characteristics. The utilities of direction of arrival and adaptive beamforming techniques in adaptive antenna modeling and design were depicted and accompanied by suitable simulation results. Numerical results were presented for the dependence of the radiation patterns of smart antennas on the properties of the methods estimation.