

# ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Факултет по ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ Катедра "РАДИОКОМУНИКАЦИИ И ВИДЕОТЕХНОЛОГИИ"

Маг. инж. Саранг Марути Патил

# СПЕЦИАЛИЗИРАНИ АНТЕНИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ЕМС

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

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

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Електродинамика и антенно-фидерни устройства

Научени ръководители:

Доц. д-р Петър Петков

Доц. д-р Бончо Бонев

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Радиокомуникации и видеотехнологии" към Факултет по Телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 03.12.2018 г., протокол №29.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 25.03.2019 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ–5.3-17 / 19.12.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

- 1. Доц. д-р. Петър Петков председател
- 2. Доц. д-р Цветан Мицев научен секретар
- 3. Проф. д-р Александър Бекярски
- 4. Доц. д-р Марио Гачев
- 5. Доц. д-р Александър Сладкаров

Рецензенти:

- 1. Доц. д-р Цветан Мицев
- 2. Доц. д-р Марио Гачев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по Телекомуникации на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1254.

Дисертантът е редовен докторант към катедра "Радиокомуникации и видеотехнологии" на Факултет по Телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Саранг Патил Заглавие: Специализирани антени за измерване на ЕМС Тираж: 30 броя Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

# І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

#### Актуалност на проблема

В днешно време модерните електронни и комуникационни устройства се използват повсеместно, така че търсенето на електро новоиндустриализиращо оборудване се увеличава. Обхватът е от битовите до сателитните комуникации и поради тази причина все посилната електромагнитна среда се оказва замърсена от радиосмущения. Замърсената електромагнитна среда оказва пряко влияние върху работата на електронните и комуникационни устройства. Следователно измерването на електромагнитното поле е от съществено значение за ЕМС както в близката, така в далечната зона на излъчване, особено за преносими домашни уреди и устройства.

# Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване:

#### Основна цел на дисертацията

Да се предложи и да се разработи компактен по размер, с широк честотен диапазон, 3-аксиален високочувствителен и точен сензор за електрическо поле за измерване на ЕМС / ЕМІ.

Това може да бъде реализирано чрез дипол и фрактална геометрия като скалируема референтна диполна антена с шестоъгълен фрактален дипол, за постигане на по-добри производствена продуктивност при тестване и увеличаване на общия процент на преминаване на теста за съответствие с ЕМС.

#### Задачи на дисертацията

- 1. Проектиране и разработване на иновативна антена с проводников дипол с цел подобряване на честотната лента и подобрени параметри като загуби от отражение, VSWR, усилване и т.н. Прилагането на подходяща антена може значително да повиши чувствителността при измерване на електрическото поле.
- 2. Проектиране и реализация на шестоъгълна фрактална диполна антена за осигуряване на по-добра широколентовост, ефективност, усилване и чувствителност на електрическото поле и за да се максимизират експлоатационните параметри.

**3.** Разработване на компактна високочувствителна 3-аксиална антена за полева сонда, за да се подобри скоростта на преминаване за електроника и комуникационен продукт чрез използване на 3-аксиален проводников дипол и шестоъгълната геометрия на фрактална диполна антена.

#### Научна новост

Изведени са формули за подпомагащи аналитичното определяне на размерите на антена за ЕМС измервания. Предложен е иновативен дизайн на фрактална антена за ЕМС измервания.

#### Практическа приложимост

Дисертационната работа притежава значителна практическа приложимост в съвременните микровълнови измервания, тъй като предложените в нея решения са с изцяло индустриален характер и предназначение.

#### Апробация

Представените в дисертацията модели на антени са изработени и измерени в лаборатория "Антени и микровълнова техника" на ТУ-София.

#### Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 7 научни публикации – доклади и статии, от които една самостоятелна. Представени са в списък, приложен в края на автореферата.

#### Структура и обем на дисертационния труд

Дисертацията е представена на английски език и има обем от 145 страници, формат A4 и съдържа пет глави, списък с фигури, списък на таблици, списък на използваните съкращения, списък на публикациите на авторите, списък на използваната литература. В работата са включени 122 фигури, 16 таблици и 39 математически изрази. Използвани са 107 литературни източници, всички от тях на английски език, от които 85% са били издадени през последните десет години. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

# ГЛАВА 1. Въведение

# 1.1. Електромагнитна съвместимост (ЕМС)

Електронните уреди и инструменти са част от всеки аспект от нашето ежедневие, като се започне от кухненските инструменти до сателитната комуникация. Поради широкото разпространение, електромагнитната среда е станала замърсена. Електромагнитната смущения (ЕМИ), както на вътрешно, така и на външно устройство, е известният "замърсител". Поради огромния брой електронни устройства, които предизвикват намеса помежду си, оказва влияние върху резултата на тяхната ефективност.

От първостепенно значение е да се предприемат превантивни действия срещу проблемите, свързани с ЕПИ - просто не можем да си позволим да присъстваме, докато не се изучи въпросът не само поради финансови или икономически причини, но и важни за безопасността на човешкия живот. За да се предотврати проблемът с ЕПИ, е необходимо известно количество основно ноу-хау за електромагнитна съвместимост.

# 1.2 Терминология

# 1.2.1 Електромагнитна съвместимост

ЕМС означава да се съвместят хармонично, без взаимни смущения, различни устройства. ЕМС има два основни аспекта:

1. Оборудването да не е чувствително към електромагнитни (EM) сигнали, които други източници излъчват в околната среда.

2. Излъчването на ЕМ сигнали от оборудването да не причинява проблеми в друго оборудване, което работи в непосредствена близост.

# 1.2.2 Електромагнитни смущения (EMI)

В този раздел ще бъде разгледан проблемът с електромагнитните смущения в неговата основна форма. IEC/IEV определя електромагнитната смущения (EMI) като "деградация на работата на

устройство, оборудване или система заради електромагнитни смущения" (IEC, 2008). Това означава, че проблемът с EMI (моделът е показан на фигура 1.2) възниква по три начина:

1. "Обект", излъчващо ЕМ енергия (източник на смущение)

2. "Обект", податливо на тази ЕМ енергия (устройството се смущава)

3. "Път на смущението" между източника и обекта (пътя на свързване)

Във всяка практическа ситуация, един източник може едновременно да наруши няколко части от оборудването и няколко източника могат, разбира се, да смутят една част от оборудването. Основният модел е показан на фигура 1.2.



Фигура 1.2 - Проблем с интерференцията в нейната основна форма

#### 1.3 Значение на теста за предварителна проверка на смущенията

Извършването на тестове за съответствие може да се използва за улавяне на проблемите със съответствието в ранен стадий и значително да подобри вероятността от успешно първо преминаване на пълно изпитване за съответствие с ЕМС, без да бъде преработен отново. Ако тестовете за ранно съответствие са идентифицирали проблемни области, тестовете за предварително съответствие предлагат бърз и евтин метод за оценка на измененията в дизайна. Не е необходима проверка преди спазването на международните стандарти; целта е да се открият потенциални проблеми и да се намали шансът за неуспех на етапа на високото съответствие на изискванията. Използваното оборудване често е несъответстващо и има по-ниска точност и динамичен диапазон от съвместимите приемници, ако се прилага приличен марж, за да разгледате резултатите.

## 1.4. Заключение

Понастоящем употребата на електронни и комуникационни устройства се увеличава навсякъде. Замърсената електромагнитна среда влияе пряко върху производителността на електронните и комуникационни устройства, така че измерването на Е-полето е от съществено значение за ЕМС както за близки, така и за далечни полета, особено за преносими домашни уреди.

#### глава 2. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

# 2.1 Въведение

Електромагнитната съвместимост е дял на електротехниката, който се занимава със свободното разпространение, приемане и генериране на електромагнитна енергия и нежеланата въздействие, която тази енергия може да предизвика. Изпитване за електромагнитна съвместимост на електронно оборудване е измерването на напрегнатостта на полето, излъчвано от устройствата [1]. Радиационната емисия от апаратурата се измерва при калибриране ниво на полето, когато се изпитва устройството на устойчивост. Обикновено, антени с голяма широчина на честотната лента се използват за измерване на емисиите, а диодните сензори на място, се използват широко за калибриране на нивото на полето за изпитване на устойчивост. [2] Определението за ЕМС / ЕМІ съгласно речника IEEE [3]:

EMC: Способността на електронното оборудване или система да се експлоатира по предназначение Експлоатационна електромагнитна среда при проектирано ниво на ефективност.

EMI: Нарушаване на желания електромагнитен сигнал от електромагнитни смущения.

Ако тестването за ЕМС се извършва по време на фазата на проектиране на продукта, той осигурява следните предимства:

• Скоростта на преминаване на окончателния тест за съответствие се увеличава.

• Намалява се вероятността за повторно ЕМС измерване и лабораторната ангажираност.

• Елиминират се проблемите в края проектантския цикъл.

• Потвържаване на извода, че съображенията при дизайна съответсват на резултатите при производството.

# 2.2 Същност на глава 2

При извършения сравнителен анализ, показан в таблица 2.2, са разгледани различни научни статии за микролентови антена, разработени за ЕМІ / ЕМС измервания. Сравнението е направено с различни важни параметри като чувствителност, антенен фактор (AF), размер на антената и т.н., на базата на което е установено, че съществуващата антена има различни недостатъци, така че има достатъчно място за подобряване на ефективността на антената с подобрена форма, размер с добра чувствителност АF.

# 2.3 З-векторна диполна антена за сонда за измерване на ЕМ поле

#### 2.3.1 Основна концепция за 3-векторна антена

Триосовите антени са направени от три отделни елемента за всяка. Триполът се конструира, като се използват три пръстеновидни метални проводника с дължина L и радиус а. За по-голяма простота само един от проводниците е избран за разглеждане. Другите две са ориентирани при  $\pm 120$  ° по отношение на еталонната част [35].

3-осната антена използва три диполни елементи, ориентирани както е показано на фиг. 2.24 (а), в три кръстосано поляризирани ортогонални диполи, диполната реакция е по-скоро за линейно поляризираните сигнали, които съответстват на оста на антенния елемент и които са разположени под прав ъгъл спрямо равнината, в която е разположена антената. Чрез свързването на трите антенни елемента към синхронна, триканална измервателна система, като цифров осцилоскоп, сензор или спектрален анализатор, както е показано в [35] и синхронни данни за времето, пропорционални на триизмерната структура на полето.



Фигура 2.24 (а) Ориентация на три диполни елемента

# 2.3.2 Резюме на състоянието на проблема

В края на литературния анализ предложените варианти на антените от различни изследователи в [6-12] са сравнени по най-важните параметри. Представени са подходящи приложения за сонди с антени.

# 2.4 Дефиниране на проблема

ЕМС (Електромагнитна съвместимост) тестване се извършва, за да се гарантира, че вашето електронно или електрическо устройство не излъчва голямо количество електромагнитни смущения (известни като излъчвани емисии) и че вашето устройство продължава да функционира както е предвидено в присъствието на няколко електромагнитни явления.

Така че се предвижда строго ограничение на производителите на електроника и комуникационни устройства,които трябва да отговарят на изискването за тестване за съответствие в стандартната ЕМС тестова лаборатория, за да премине съответствие преди стартирането на електронно устройство като краен продукт за продажба.

Но според данните от лабораторията за изпитване за съответствие с EMC, повече от 50% от продуктите са неуспешни при първия опит, затова производителите трябва да преработят продукта и да го подадат отново за проверка на съответствието, така че това е загуба на време и увеличаване на производствените разходи.

# 2.5 Същност на дисертацията

Като се има предвид изследването, направено в глава 2, заедно с предпоставките и предизвикателствата при проектирането на измерване на ЕМС в открити условия, изследователските цели на тезата могат да бъдат представени синтезирано, както е показано на фиг.2.35. Те са свързани с проектирането на антенно устройство, работещо в широк честотен диапазон, висока чувствителност, компактен размер и предназначени за измервания в далечината зона.

# ГЛАВА 3. СКАЛИРУЕМА РЕФЕРЕНТНА ДИПОЛНА АНТЕНА ЗА 3-АКСИАЛНО ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНОТО ПОЛЕ

Както беше изложено в проучването в глава 2, направен е изводът че диполната антена е подходяща за точно измерване на електрическото поле, но един от проблемите при нея е много малката честотна лента спрямо нуждите на измерването. За да се реши проблема с диполната антена, са въведени два подхода и е предложен 3-аксиален дизайн на сондата

- 1. При първия, т. нар. скалируема референтна диполна антена за широколентово приложение, е създадена за покриване на широка честотна лента с отлично усилване на антената и чувствителност.
- Вторият се основава на скалируемата референтна диполна антена; и се състои от три ортогонални кръстосани дипола, представляващи 3-осен сензор за електромагнитно поле.

# 3.1 Диполна антенна структура и дизайн. Методология:

Фигура 3.2 показва основната структура на диполната антена с коаксиален кабел, общата дължина на дипола е определена с буква L и радиус г. Изображенията в фигура 3.2 са широколентова изчислима диполна антена с хибриден балун [АЗ]. Сигналът представлява извод за антена, използващ два коаксиални кабела с еднаква дължина чрез CL чрез хибриден балун, както е показано на фигура 3.2. Вътрешният проводник на коаксиалния кабел е свързан както към рамото на балансиран дипол, така и към външния проводник на двете коаксиални в електрически късо съединение един от друг е показан на фигура 3.1.

Две симетрични диполни рамена се поставят на ос Y и пролуката между две диполи е  $G_L$  в милиметър, дължината на коаксиалната външна е  $C_L$ , а общата дължина на коаксиалната вътрешна е  $C_L + C_h$ , Вътрешният конектор е запоен на диполно рамо по дължина Ch над външния проводник. Ваlun – трансформатора е задължителен за точно измерване на сложни S-параметри, два полу-твърди коаксиални кабели с дължина  $C_L$  се използват за balun и свързани към балансирано диполно рамо и 50 $\Omega$  натоварване е свързан към сумарния порт и съчетани характеристики импеданс измервателното устройство е свързано към друг порт ( $\Delta$ ) чрез коаксиалното е точно симетрична един на друг, така че подобен

потенциал съществува и при двете струни, но фазовото отместване е 180 о . Проектната стойност на дипол с балун е посочена в таблица 3.1.



Фигура 3.2 Предложен широколентов скалируем балун

	Параметри на антената				
Sr.No	Символи на параметрите	описание	стойност		
1	L	Обща дължина на дипола	10.3см		
2	ДЛ	Единична дължина на диполния прът	4,8 см		
3	R	Радиус на диполния прът	деветмм		
4	GL	Разстояние между два симетрични пръта	7 mm		
5	Ch	Височина на дипола от коаксиален горен край външен	1,2 см		
6	CL	Дължина на коаксиален кабел	17см		

Таблица 3.1 Спецификации на конструктивната референтна диполна антена

# 3.1.2 Методика за разработване на антената

## I. Предпоставки за развитие на дизайна.

• Определяне на формата и изчисление на приблизителната дължина на дипола и балуна.

Размерът на антената зависи от резонансната честота. Като референтна резонансна честота е избрана 1.35GHz. Като се вземе това предвид, са изчислени няколко размера на антената:

Обща дължина ан дипола (L) =  $\frac{\lambda}{2}$  (3.4)

$$L = 11.1cm \tag{3.5}$$

Чрез симулационен анализ бе доказано, че по-добри резултати се получават при дължина различна от теоретично очакваната. Точната формула е предложена от автора по долу:

$$L = \frac{143}{F} \tag{3.6}$$

Така модифицираната дължина на дипола за по-добра точност е, L=10.5 cm. (3.8)

Друг важен параметър е разстояниет между двете рамена, така че стандартната формула е предложена, за да фиксира размерът на междината Gl

$$Gl = \frac{\lambda}{200}$$
(3.9)

Последната и най-важна част е проектиране на хибридни балун, докато проектирането на балун се използва два полутвърди коаксиални кабела, тяхната дължина Cl оказва пряко влияние върху резонатната честота и честотната лента на антена, Така че тук в предложената работна се използва нов подход и е разработена формула за дължина на коаксиална линия за захранване на диполното рамо с балунтрансформатор, както е показано по-долу

Coaxial length (*CL*) 
$$\ge 1.5 L$$
 (3.12)

#### **II.** Софтуерна симулация

Софтуерните симулации включени в глава II представляват:

- Проектиране на 3D модел на антена, използвайки Ansys HFSS
- Дизайн и симулиране на загубите от отражение, VSWR, ДНД
- Оптимизирайте размера и формата на структурата, за да се получи подходящ желан резултат

• Повторение на етапи I и II, докато се получат желаните характеристики на антената

# III. Развитие на хардуера

• Мапировка (конверсия) на 3D Дизайна в 2D дизайн, използвайки Dip Trace / CORAL DRAW.

• Разработете фото маска

• Изработка на антена с използване на фотолитографски процес

# **IV.** Тестване на хардуера

- Потвържде резултатите чрез VNA и безехова камера
- Симулирани и тествани резултати са в близко сходство, следователно разработената антена е проектирана коректно.

• В случай на несъответствие между симулационни и практически резултати, възможно е да се направят корекции в дизайна.

# 3.1.3 Резултати и изводи

# 3.1.3.1 Резултати от окончателно настроената антена

Фигура 3.3 показва загубите на отражение на изчислителна референтна антена с симетрирана с балун, Както е показано по-горе, маркер1 започва от 900MHz и завършва на честота 3.2GHz и за този честотен обхват 0.9-3.2GHz загубите от отражение S11 имат стойност по-малка от -10dB – честотната лента на антената. Отрицателният пик се наблюдава при честота 1.3GHz и неговата стойност е -39.96dB



Фигура.3.3 Симулирана загуби на отражение за диполна антена

# 3.1.3.3 Диаграма на насочено действие

Моделът на 3D излъчване е показан на фиг. 3.6; този модел е абсолютно глоба, според теоретичното очакване. Този дизайн осигурява висока печалба, Моделът е парцел на референтна честота 1.3GHz



Фигура 3.6 3D Диаграма на насочено действие на антената при 1.3GHz

## 3.1.3.4 Антенен Фактор (Коефициент на преобразуване)

В електромагнетизма, антенния фактор се определя като съотношението на силата на електрическото поле Е към напрежението V (единици: V или  $\mu$ V), възбудено на клемите на антената. Типичен резултат за проектираната антена е показан на фигура 3.14.



Фигура 3.14 Фактор на антената в една от равнинте ( $\varphi$ =0deg)

# 3.2 Ортогонална триосна система с кръстосана диполна конструкция, съставена от скалируемата референтна диполна антена за измерване на ЕМС в 3-те оси.

# 3.2.2 3-осна антенна структура

Триосната антена е съставена от три отделни елемента за всяка ос, представляваща трипол. Триполът се конструира, като се използват три идентични метални дипола с дължина h и радиус а. Двата дипола са ориентирани на  $\pm 120^{\circ}$  по отношение на третия, взет за референтен. Зосната антена използва три диполни елемента , ориентирани както е показано на фиг. 3.14 (а)



Фигура 3.14 (а) Ориентация на три диполни елемента

Диполната антена е проектирана за централна честота 1.3GHz, за да покрие обхвата на честотите от 900MHz до 3.2GHz. Единична геометрия на антената заедно с коаксиален кабел с посочена по-горе дължина, разположени перпендикулярно една на друга (Фиг. 3.14b)



Фигура 3.14 (b) 3-Axial дизайн модулелиран в на HFSS

# 3.2.3 Резултати

Загубите от отражение S11 на проектираната триосна антена на дипола в равнината XY е показана на фигура 3.16. Вижда се, че отражението е

под -10dB и диапазона на честотата лента приблизително от 900MHz до 3GHz, а също така и S11 на диполите в равнините xz и yz са показани съответно на фигури 3.17 и 3.18



Фигура 3.16 Симулиран S11 в ХҮ равнина







Фигура 3.18 Симулиран S33 в равнината YZ



Фиг.3.20 3D ДНД на антената.

# 3.2.3.3 Фактор на антената

Frequency	Theta [deg]	Wavelength	Gain	AF
1.50E+09	0	0.20	1.20	44.43
1.50E+09	30	0.20	0.85	52.74
1.50E+09	60	0.20	0.83	53.36
1.50E+09	90	0.20	0.59	63.30
1.50E+09	120	0.20	0.31	87.08
1.50E+09	150	0.20	0.24	98.50
1.50E+09	180	0.20	0.84	53.16
1.50E+09	-30	0.20	2.19	32.90
1.50E+09	-60	0.20	2.94	28.39
1.50E+09	-90	0.20	3.02	28.02
1.50E+09	-120	0.20	2.73	29.44
1.50E+09	-150	0.20	1.86	35.73
1.50E+09	-180	0.20	0.83	53.15

Антенният фактор за един от диполите е представен в табл. на фиг. 3.22

Табл. 3.3 Изчисление на антенния фактор (dBm<sup>-1</sup>)



Fig.3.22 Антенен фактор спрямо азимутния ъгъл

# 3.3 Сравнение на текущото индустриално решение със предлаганата система.

За валидиране на предложената конструкция на диполна антена, предложените резултати от антената се сравняват с професионалните електромагнитни измерители на пазара. Фиг.3.24 е търговски EMF метър, широко използван и с промишленото приложение.

Приборът за измерване на силата на радиочестотното поле измерва радиочестотното (RF) излъчване (включително микровълните) от честоти в диапазон от 50 MHz до 3,5 GHz. Това включва радио честоти от повечето клетъчни кули, мобилни телефони, безжични телефони, Wi-Fi, безжичен компютърен хардуер и рутери, микровълнови печки, FM радио и цифрово телевизионно излъчване. Този измервателен уред е особено полезен за откриване на кратки, инцидентни пикови нива от цифрови микровълнови сигнали, както и за общи аналогови сигнали.



Тази поддръжка за 38mv до 11v / тизмервателни диапазони. В тази сонда се използва печатана диполна антена заедно с диоден детектор, показан на фиг.2.25



Фиг.3.25 Антената, използвана в измервателя на поле

Загубите от отражение  $S_{11}$  на антената, използвани в професионални електромери, показани на фиг.3.26, тази антена има компактни размери, но загубите от отражение не са достатъчно добри - антената осигурява максимален  $S_{11}$  -1.7 dB само. Така че са необходими различни допълнителни системи за свързване за по-добряване на този показател.



Фиг.3.26 S11 на професионален измерител на поле

За подобряване на параметрите на антената за директно използване в EMF-метър се предлага нова антена и тази предложена антена се сравнява със съществуващия индустриален измерител на поле като двата коефициента антена S11 са сравнени на фиг.3.27. Предлаганият скалируем дипол с хибриден балун работи много добре за диапазона от 0.9 до 3.2GHz без диоден детектор. За диапазон от честоти между 0.9 и 3.2 GHz стойността загубите от отражение винаги е под -10dB . Предлаганата антена има небалансиран изход, който съответства на входа на чип AD 8312, докато индустриалното решение (професионален измерител използва не добре балансирана антена към лошо съгласуван чип. Вижда се, че предложената конструкция на антената работи по-добре от съществуващата антена, използвана в индустриалния EMF измерител.



Фиг.3.27 Сравнение на професионална антена за измерване на ЕМП спрямо предложения дизайн

# 3.4 Методология, използвана за изчисляване на осреднена напрегнатост на полето от триосната геометрия на антената

За измерване на точната стойност на ЕМП, излъчвана от заобикалящите електронни устройства, 3-аксиалната ЕМП сонда е съставена от три дипола, поставени в X, Y и Z направления. В устройство със завършен вид, предлага се използването на RF детектор AD 8312, чийто вход е естествено съгласуван и симетриран с изхода на триосната антена.



Фиг.3.27 функционална блокова схема на AD8312

#### 3.5 Заключение

Проектирана е една компактна диполна антена предназначена за честотния обхват от 900 MHz до 3,2 GHz. Хибридният комбайнер се използва заедно с балун, който е реализиран чрез коаксиални линии. Резултатите показват, че се получава подобрение (разширяване) на честотната лента. В случая с централно захранван дипол, коаксиален балун подобрява работата на антената.

На базата на вече проектираната диполна антена е създадена триосна антена с централна честота 1.3GHz за измерване на електрическото поле в трите направления.Тази триосна сонда има работен честотен диапазон от 900 MHz до 3.2 GHz. Поради триосната си същност, може да служи като основен градивен компонент на професионален измерватен уред на EM-поле.

# ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРАНЕ НА 3-ОСНА СОНДА ЗА Е-ПОЛЕ, С ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ФРАКТАЛНА УЛТРАШИРОКОЛЕНТОВА ДИПОПОЛНА АНТЕНА

#### 4.1.1 Въведение

Основната цел на тази глава е да проектира диполна антена за приложения с ултраширок честотен обхват с нов тип фрактални форми. В предложената хексагонална диполна антена, площта и обема на активния част се миниатюризират чрез итеративен процес, като размерите на предложената антена са 44x30x1,6 mm, работната лента се получава от 2 до 12GHz. Загубите от отражение (S11) са под

-10dB за споменатия обхват. Предложената ултра-широка честотна лента фрактална диполна антена е проектирана и симулирана на HFSS

# 4.1.2 Методология, използвана за определяне на резонансната честота и изчисляване на HMSA

В този проект се използва прост метод за изчисляване на резонансната честота на HRMSA. По подобие на ARMSA (фиг.4.2), при дизайна, състоящ се от два диелектрични слоя (въздушен и стъкло-епоксиден субстрат с дебелина и височина В и h съответно), се използва обикновена окачена конфигурация, като с цел опростяване на анализа, двойният слой може да бъде заменен с един хомогенен, с дебелина (h +  $\Delta_B$ ) и еквивалентна диелектрична константа q<sub>eq</sub>, определена от (4.19), където  $\Delta_B$  е въздушната междина между пача и заземена повърхност



Фиг.4.2 Схематична диаграма на HRMSA

Ефективните стойности на вътрешния и външния радиус (a<sub>eff</sub> & b<sub>eff</sub> могат да бъдат изчислени от (4.23) и (4.24).

$$\mathbf{a}_{eff} = \mathbf{a} + \mathbf{6}\mathbf{L} \tag{4.23}$$

$$\mathbf{b}_{eff} = \mathbf{b} - \mathbf{6L} \tag{4.24}$$

Периметърът на ARMSA е изчислен с използването на (4.25) и (4.26), като са изведени стойностите на вътрешния и външен радиуси ( $r_1$  и  $r_2$ ). С използване на тези стойности на радиусите, се изчислява новата ефективна ширина ( $W_{eff}$ ) и ефективния вътрешен радиус ( $b_{actual}$ ) поради краевия ефект на полето (4.27) и (4.28) Тези стойности след това се използват за изчисляване на резонансната честота на HRMSA, като се използва (4.29).

$$\sigma_{aeff} = 2nr_1 \tag{4.25}$$

$$\sigma_{beff} = 2nr_2 \tag{4.26}$$

$$W_{eff} = (r_{1-}r_2)$$
 (4.27)

$$b_{actual} = b_{eff} + \sigma L \tag{4.28}$$

$$f_o = \frac{k_{nm}c}{2\pi b_{actual}\sqrt{\varepsilon_{reff}}}$$
(4.29)

#### 4.1.3 Структура на хексагонална фрактална диполна антена

Геометрията на фракталната структура на антената с различен брой на итерации е показана на фигура 4.5. Антената е проектирана с използване на субстрат FR-4 с дебелина t=1.6mm и относителна диелектрична проницаемост  $\varepsilon_r = 4.4$ , и тангенс на загубите 0.02.



Фиг.4.5 Хексагонална диполна антенна структура

Шестоъгълната форма с фрактална геометрия и итерация от трети ред е реализирана като излъчваща антенна структура. Шестоъгълната фрактална геометрия се ецва от двете страни на FR-4 субстрата и притежава ултра-широка честотна лента с отлични радиационни характеристики. За минимизиране на активната област на пача се въвежда фрактален подход, осигуряващ като резултат намаляване на общите размери и също намалява активния пач при моделиране на 3-осната фрактална геометрия. В долната страна на антената се използва ивица с правоъгълна форма като основа, така че се осъществява плавен трансформиращ преход между захранващата линия и излъчващия дипол.

Sr.No	Antenna design parameters				
	Parameter Symbols	Description	Value		
1	L	Total length of Substrate	135mm		
2	W	Total width of Substrate	125mm		
3	Т	Thickness of Substrate	1.6mm		
4	GL	Gap between two symmetrical Patch	7mm		
5	Ch	Height of dipole from coaxial top end outer	19.8mm		
6	Cro	Inner radius of connector	0.68mm		
7	Cri	Outer radius of connector	2.5mm		

Табл. 4.1 Конструктивни размери на хексагоналната фрактална антена

#### 4.1.4 Симулация, резултати и анализ на резултатите

#### 4.1.4.1 Коефициент на отражение

Структурата на шестоъгълната фрактална диполна антена с итерация от трети ред е показана на фиг. 4.10. За третата итерация резонансът на антената започва от честота от 0,89 GHz и стига до 3,67 GHz, както е показано на фигура 4.12. Първата и втората итерация не дават добра честотна лента, но при трета итерация честотните характеристики на резонанс –  $S_{11}$  и VSWR се подобряват.



Фиг.4.12 Коефициент на отражение на антената при итерация 3

#### 4.1.4.2 Диаграма на насочено действие

Полярната ДНД за честота 3 GHz е показана на фигура 4.13 (a), като антената осигурява правилна, слабонасочена форма, с максимално усилване 3.58 dBi за phi = 310deg (една типична диаграма).



Фиг.4.13 (а) Диаграма на насочено действие при Phi =  $310^{0}$ 

#### 4.1.4.3 Фактор на антената

Различните изчисления за AF са направени с различни ъгли (theta) при честота 1GHz и показани в таблица 4.5. За по-голяма нагледност AF се представя в графичен вид. Типичен участък е показан на фигура 4.16. Тези данни се въвеждат в софтуера за емисии на EMC, така че той може да добави фактора на антената към въведената загуба на кабел и т.н. при извършваните изчисления за напрегнатостта на полето.



Фиг.4.16 Антенен фактор-типичен случай (1GHz)

# 4.1.5 Резултати от измерванията на хардуерния модел

#### 4.1.5.1 Изработване на печатен модел на антената

Изработен е физически модел на фракталната антена HMSFA в съответствие с моделирания дизайн в HFSS, за диапазона от 0,89 до 3,67 GHz. Въз основа на получените резултати се стига до заключението, че

така проектираната антена отговаря на изискването за честотна лента, а също и че поведението на физическия модел съответства на този моделиран в симулатора, както е показано на фиг. 4.19 - 4.21



Фиг.4.19 Изработване на 3 🛲 повторената геометрия на HMSFA



Фиг.4.20 Измерена загуби от отражение с VNA



Фиг.4.22 Сравнение на измерения и симулиран резултат S11

4.2 Три ортогонални кръстосани диполни структури, използващи шестоъгълна форма фрактална диполна антена за измерване на ЕМС в 3-аксиална.

#### 4.2.2 З-осната структура на антената

Антената се състои от система от три ортогонално разположени диполни елемента, всеки захранен поотделно, както е показано на фиг.4.22. Всеки фрактален дипол е проектирана за референтна честота 1GHz и покриващ обхвата от честоти от 0.89 GHz до 3.67 GHz. Резултатът на работа на тази геометрия е представен в следващия раздел



Fig.4.25 Предложен HFSS модул на 3-осен ортогонален фрактален дипол

#### 4.2.3 Резултати

#### 4.2.3.1 Загуби от отражение

В случаите на точно и пълно измерване на напрегнатостта на електрическото поле, дизайн с три ортогонални дипола е задължителен.

Загубите от отражение (S<sub>11</sub>) са показани на фиг. 4.24; Графиката на S<sub>22</sub> и S<sub>33</sub> е показана на фигури 4.25 и 4.26 (в дисертацията), а комбинираната ДНД е представена на фиг. 4.32.



Фиг.4.26 Симулирани загуби на отражение S<sub>11</sub>



Фиг.4.32 Комбинирана ДНД за честота 3GHz

#### Заключение и научни и научно-приложни приноси:

Компактна шестоъгълна диполна антена с форма на фрактал е проектирана за приложения с изключително широка честотна лента; обхваща честотите от 0.89 GHz до 3.67 GHz. В този дизайн се използва

микролентова захранваща линия, заедно с линейно заостряне, поради което се прави правилно импедансно съгласуване и се постига широколентовост на импедансната характеристика. Този дизайн също така осигурява висок максимален коефициент на усилване и многопосочнен модел. Съществената характеристика по отношение на този модел е, че с увеличаването на броя на повторенията, честотната лента на антената се увеличава заради подобряването на VSWR и загубите от отражение S<sub>11</sub>.

- I. В Глава 2 е разгледано значението на тестовите процедури за предварително съответствие и разглежданите антенни системи са анализирани при вариране на различни антенни параметри. Представен е анализ на съществуващите методи за измерване (стр. 21) и е направен сравнителен анализ на известните антенни системи (табл. 2.1, стр. 24)
- II. Въз основа на съвременното състояние на техниката са дефинирани основните предпоставки за прецизни измервания на елекроматнитното поле при открит полигон са дефинирани – фиг. 2.35, стр. 49. Като резултат на този анализ са формулирани целта и задачите на настоящата дисертация.
- III. При анализа на състоянието на техниката и анализа на различните вече известни антенни конструкции, бяха установени ограниченията и недостатъците на тези антени. За преодоляването им е проектирана скалируема диполна антена за честотния обхват 0.9-3.2GHz

Научният принос е установяването на зависимост за дължината на дипола L=143/F, mm (6), стр. 59

Друга важна зависимост е определянето на дължината на съгласуващия балун-трансформатор, получена по емпиричен начин чрез множество симулационни опити. Новата формула (12) е представена на стр. 59 и има вида CL >= 1.5L, mm

IV. Триосна диполна концепция, представена на фиг. 3.14(а) е реализирана като електричен модел с проектирания в предишната глава дипол, в симулатора HFSS. След получаването на електрическите параметри на единичния модел, е осъществена конструкцията на триосна сонда за измерване на ЕМС (фиг. 3.14(b)).

- V. С цел по-нататъчното увеличаване на работната честотна лента на сондата, проектирана е фрактална антена с хексагонална форма за честотен обхват 0.8-3.67GHz. Принципната схема на антената е представена на фиг. 4.2 и фиг. 4.5 съответно. Изведените конструктивни размери са представени в табл. 4.1. Резултатът от измерванията на честотната лента е изложен на фиг. 4.12 и доказва, че антената работи в супершироколентов обхват от 0.8 до 3.67 GHz, като симулирания модел в HFSS и изработения прототип имат идентично поведение, показано на фиг. 4.20 и 4.22
- VI. След получаването на удовлетворителни резултати, като КСВ, ДНД, усилване от единичен дипол реализиран с хексагонален фрактал, проектирана е конструкцията на триосна сонда за измерване на ЕМ поле. Бе установено, че триосната сонда работи в честотната лента от 0.89-3.67GHz и удовлетворява изискванията на тестовете за предварително съответствие (фиг. 4.33-4.36)

#### СПИСЪК НА АВТОРСКИТЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [A1 Sarang M. Patil,Peter Z. Petkov, and Boncho G. Bonev, "A review on recent antenna designing techniques For electromagnetic compatibility(emc) test, "International Scientific Conference on Engineering, Technologies and Systems TECHSYS 2017, Technical University – Sofia, Plovdiv branch, May 2017.
- [A2] Sarang M Patil, Ravinder Kumar, Hitesh Singh, Peter Zhelev Petkov and Boncho GeorgievBonev, "Review On Design Techniques Of 3-Vector Antenna For Electric Field Measurement", International Journal of Current Advanced Research, Volume 6; Issue 7; July 2017; Page No. 4946-4950.
- [A3] Mr.Sarang M. Patil, Prof.Peter Z. Petkov, Prof.Boncho G. Bonev and Hitesh Singh," The Design and Modeling of Wideband Calculable Standard Rod-Dipole reference antenna for Broad Bandwidth Applications,"IEEE International Conference 3a Infocom Technologies and Unmanned Systems (ICTUS'2017)", Amity Directorate of Engineering & Technology (ADET), Dubai during 18th-20th December 2017.
- [A4] Mr.Sarang M. Patil, Prof.Peter Z. Petkov, and prof.Boncho G. Bonev and Hitesh Singh "A Prototype Model Design of Wide Band Standard Reference Rod-Dipole antenna for 3-Axis EMC Measurement with hybrid Balun for 0.9 to 3.2GHz", International Journal of Advanced Electromagnetic, Volume 7, No.1, February. 2018, pp74-78.
- [A5] Mr.Sarang M. Patil, Prof.Peter Z. Petkov, Prof.Boncho G. Bonev and Hitesh Singh, "
  A Novel Design of Enhanced Ultra-wide Bandwidth Fractal Dipole Antenna for Wireless Applications", IEEE 5 h International Conference on "Computing for Sustainable Global

Development," Bharati Vidyapeeth's Institute of Computer Applications and Management (BVICAM), New Delhi (INDIA) 14 <sup>th</sup> - 16 <sup>th</sup> March 2018, pp 2468-2473, ISSN 0973-7529; ISBN 978-93-80544-28-1.

[A6]

Mr.Sarang M. Patil, Prof.Peter Z. Petkov, и prof.Boncho G. Bonevand и Hitesh Singh "3-Axial EMC Field Probe Design using Ultra Wide- Bandwidth Hexagonal Shape Fractal Dipole Antenna for the Range of 0.5 GHz to 12 GHz", IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe(EEEIC), Palermo, Italy during 12 <sup>th</sup> -15 <sup>th</sup> June 2018.

[A7] Mr. Sarang M. Patil "Two New Types Of Compact Ultra-Wide Bandwidth Antennas For 3-Axis Rf Field Strength Measurement, "International Scientific Conference on Engineering, Technologies and Systems TECHSYS 2018, Technical University – Sofia, Plovdiv branch, 17 <sup>th</sup> -19 <sup>th</sup> May 2018.

# **SUMMARY**

#### SARANG MARUTI PATIL

#### SPECIALIZED ANTENNAS FOR EMC MEASUREMENTS

The topic of this thesis is related to efficient antenna design of field probe for EMC testing, with the goal "To propose and develop compact size, wide Frequency range and 3-axial highly sensible and accurate electric field sensor for measurement of EMC/EMI testing. That could be implemented in dipole and fractal geometry such as calculable reference dipole antenna and hexagonal fractal dipole for achieving better performance and increasing the overall passing rate of EMC compliance test.

Finally, it has come to know that, Pre-compliance testing may be used to catch compliance problems early and significantly improve the probability of successful first pass of full EMC compliance testing without new re-design. If early compliance testing has identified problem areas, pre-compliance testing offers a fast, low-cost method for evaluating modifications to your design. Pre-compliance testing is not required to conform to international standards; the goal is to uncover potential problems and reduce the risk of failure at the high compliance test stage. As per the observed results of both the antennas, i.e., Rod-dipole and fractal dipole is the perfect solution for 3–axial field strength measurement for the pre-compliance test.

The thesis consists of 148 pages, 5 Chapters, 126 Figures, 14 Tables, and 47 Formulas. The number of references is 107 with more than 80 % from the last ten years. The analysis, proposed methods, and results are presented through 7 author publications, 2 of which in Journals and five presented at international conferences.