

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Кауа Карим Абдула

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА
КРЪГОВОПОЛЯРИЗИРАНИ
МИКРОЛЕНТОВИ КЪСИ АНТЕНИ С
ОБРАТНО ИЗЛЪЧВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “ДОКТОР”

Варна, 2019г.

Дисертационният труд съдържа 199 страници (основна част от 148 страници и приложения в обем от 51 страници), включително 116 фигури и 38 таблици, оформени в 6 глави, заключение, приноси на дисертационния труд, списък на публикациите на автора по темата на дисертацията, списък на използваната литература от 175 заглавия, от които 20 на кирилица и 155 на латиница и 7 приложения.

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:

Последните десетилетия се отличават с изключително бурно развитие на комуникационната техника, която намира широко приложение във всички области в живота на съвременното общество. Преобладаващата част от използваната комуникационна техника включва безжичните наземни и спътникови мобилни и фиксирани комуникационни мрежи. Антенните устройства задължително участват в тези мрежи и в значителна степен определят техните характеристики. Към тях се предявяват изисквания за минимални размери и компактна конструкция, както и за високи механични и електрически характеристики. Късата антена с обратно излъчване (КАОИ) удовлетворява тези изисквания и намира широко приложение в наземните и спътникови мобилни и фиксирани комуникации. Микролентовата технология предоставя допълнителни възможности за намаляване на размерите и теглото на антените, включително и на КАОИ. Може да се отбележи, че микролентовите антени (МЛА) и линии (МЛЛ) представляват най-динамично развиващата се област в антенната техника през последните няколко десетилетия. Използването на кръгова поляризация (КП), вместо линейна поляризация (ЛП), в микролентовите КАОИ (МЛКАОИ) осигурява високо качество на пренасяната информация и надеждност на комуникациите, особено при разпространение на електромагнитните вълни над силно пресечени местности и при мобилните комуникации. От гореканазаното може да се заключи, че кръговополяризираните МЛКАОИ (КП МЛКАОИ), обект на изследванията в дисертационния труд, ще намерят перспективни приложения в съвременните комуникации, което свидетелства за актуалността на изследванията в тази област.

ПРОБЛЕМ:

Проблемът, който се решава в дисертационния труд, е създаване и изследване на нови високоефективни КП МЛКАОИ.

ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Създаване, анализ, практическа реализация и експериментални изследвания на нови конструкции на КП МЛКАОИ с минимални размери, високи механични качества и подобрени електрически характеристики.

ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Поставената цел на изследването се постига чрез решаване на следните основни изследователски задачи:

1. Предлагање на нови конструкции на КП МЛКАОИ с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик с минимални размери, високи механични качества и подобрени електрически характеристики.

2. Извършване на параметричен анализ на базата на числени изследвания на предложените нови конструкции на КП МЛКАОИ. Изследване на влиянието на антенните размери и конструктивни параметри върху електрическите характеристики на антените. Сравнение на основните характеристики на симулационно изследваните антени.

3. Практическа реализация на няколко от предложените и анализирани КП МЛКАОИ и експериментално изследване на основните им електрически характеристики. Сравнение на експериментално получените резултати с предварително определените резултати от симулационните изследвания.

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Нови конструкции на КП МЛКАОИ.

ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

Нови конструкции на КП МЛКАОИ с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик с различни цилиндрични периферни екрани.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ:

При изследването на КП МЛКАОИ са използвани следните методи:

1. Електродинамично моделиране на изследваните антени е извършено с два софтуерни продукта (MWS 2010 и HFSS v.13), използващи числените методи, съответно метода на крайните разлики във времевата област FDTD и метода на крайния брой елементи FEM, за пълновълнов анализ на 3D електродинамични структури.
2. При оптимизацията на симулационно изследваните антени са използвани методът на Гаус - Зайдел и квазинютонови методи.
3. Експерименталното измерване на модула на коефициента на отражение $|S_{11}|$ на антените е извършено със скаларен еднопортов рефлектометърен метод за измерване на коефициента на отражение.
4. При измерването на коефициента на усилване КУ на изследваните антени е използван методът на сравнението с три антени.
5. Диаграмите на насоченост (ДН) на основната и кросполяризационната компонента са измерени по метода на поляризационната диаграма чрез използване на спомагателна ЛП антена и измерване на аксиалното отношение AR .

МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ:

Числените изследвания и сглобяването на отделните антенни елементи на експерименталните антенни модели са извършени в катедра „Комуникационна техника и технологии” на ТУ-Варна, а отделните антенни елементи с метализирани участъци са изработени по фотолитографска технология за изработка на печатни платки (чрез ецване) във фирма „Микрон 20 ЕООД” София.

НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

1. Предложени са нови конструкции на КП МЛКАОИ с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и различна форма на цилиндричния периферен екран.
2. Извършен е параметричен анализ на предложените нови конструкции на КП МЛКАОИ с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и различна форма на цилиндричния периферен екран на базата на числени изследвания и е определено влиянието на изменението на антенните размери и конструктивни параметри върху основните електрически характеристики на антените.
3. Извършена е практическа реализация на две от предложените и анализирани нови конструкции на КП МЛКАОИ и са изследвани експериментално техните основни електрически характеристики. За едната антена е получен патент за изобретение от Патентното ведомство, а за другата е подадена заявка за патент за изобретение, която е в производство.

ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

1. Определено е влиянието на антенните размери и конструктивни параметри върху електрическите характеристики на изследваните антени и са намерени техните оптимални стойности.
2. Създадените нови конструкции на КП МЛКАОИ са с намалени размери, високи механични качества и подобри електрически характеристики спрямо известните антени от този клас.
3. Получените нови антенни конструкции в резултат на изследването могат да намерят широко приложение в съвременните безжични комуникационни и други системи с високи изисквания по отношение на размерите, теглото, механичната устойчивост и електрическите характеристики на използваните в тях антени.

АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:

По темата на дисертацията авторът има публикувани 8 научни труда, от които 5 самостоятелни публикации в реферирани научни издания и списания в страната и в чужбина и 3 публикации в съавторство, както следва – 1 в национална конференция с международно участие, 1 признат патент за изобретение от Патентното ведомство и една заявка за патент за изобретение в производство.

Основните резултати от изследванията в дисертационния труд са публикувани и докладвани на следните издания и форуми:

Рецензирани научни издания в страната

– „Годишник на Техническия университет Варна”, 2011.

Рецензирани научни списания в чужбина

- “*International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology*”, 2017;
- “*International Journal of Engineering Science and Technology*”, 2017;
- “*International Journal of Computer Science*”, 2017;
- “*Advances in Research*”, 2017.

Национални конференции с международно участие

– Трети международен научен конгрес „50 г. ТУ-Варна”, Варна, 04–06 окт. 2012.

Патенти за изобретение

– Патентно ведомство на Р. България, 2017.

Заявки за патент за изобретение

– Патентно ведомство на Р. България, 2013.

СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИЯТА:

Дисертационният труд съдържа 199 страници (основна част от 148 страници и 7 приложения в обем от 51 страници), включително 116 фигури и 38 таблици. Основната част включва съдържание, списък на използваните по-важни съкращения и означения, увод, 6 глави, заключение – резюме на получените резултати с декларация за оригиналност, приноси на дисертационния труд, списък на публикациите по темата на дисертационния труд и библиография от 175 заглавия, от които 20 на кирилица и 155 на латиница. Означенията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата съвпадат с тези в дисертационния труд.

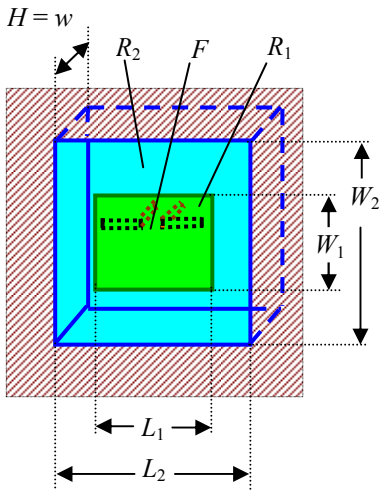
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

УВОД

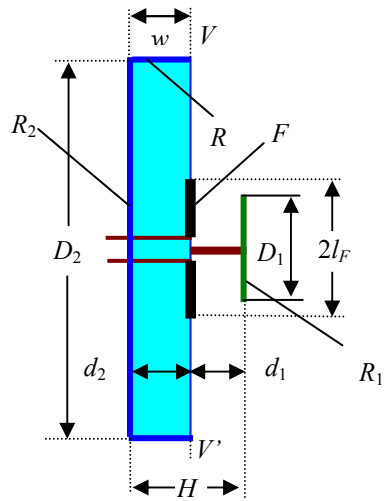
Изтъкната е важноста, която имат за съвременните безжични комуникации КП МЛКАОИ, и необходимостта от извършване на научни изследвания с тях.

ГЛАВА 1. Критичен анализ на състоянието на експерименталните, теоретични и числени изследвания в областта на кръговополяризираните микролентови къси антени с обратно излъчване

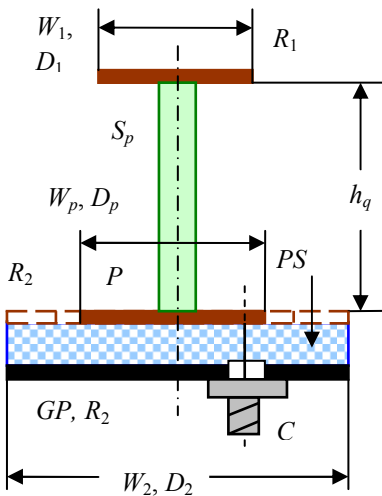
КАОИ е създадена в резултат от изследванията на двама немски учени в средата на миналия век – *G. v. Trentini* (1954) и *H. W. Ehrenspeck* (1965). Антената на *Trentini* е с правоъгълни отражатели и неоптимизирани размери (фиг. 1.1). *Ehrenspeck* предлага КАОИ с кръгли отражатели (фиг. 1.2), която притежава компактна структура, малък надлъжен размер ($\approx 0.5\lambda_0$) и добри електрически характеристики – КУ $G \approx 15$ dBi и импедансна честотна лента (ИЧЛ) $bw_{|S_{11}|}$ около 5 – 6%. Тя се състои от два успоредно разположени кръгли отражателя – малък R_1 и голям R_2 , с поставен между тях възбудител F (в случая полувълнов дипол) и периферен екран R , обхващащ големия отражател, за намаляване на задното и страничните излъчвания. След многократни отражения от двата отражателя (стени на така формирания отворен резонатор на КАОИ) електромагнитната енергия се излъчва през виртуалния отвор на антената IV . Поради компактната си конструкция и добри електрически характеристики, КАОИ намира широко



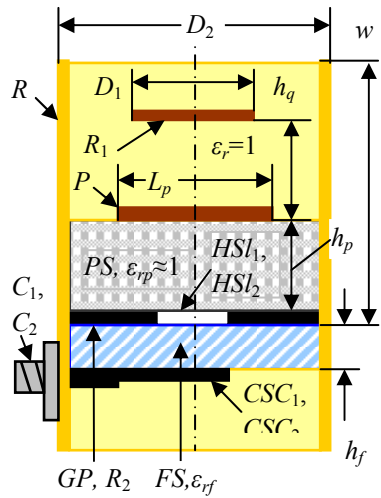
Фиг. 1.1. КАОИ с правоъгълни отражатели (антена на *Trentini*):
 $L_1 = 1.95\lambda_0$, $W_1 = 1.54\lambda_0$, $L_2 = 2.98\lambda_0$, $W_2 = 3.26\lambda_0$, $H = w = 0.58\lambda_0$



Фиг. 1.2. Надлъжен разрез на КАОИ с кръгли отражатели (антена на *Ehrenspeck*): $D_1 = 0.4\lambda_0$, $D_2 = 2\lambda_0$, $H = 0.5\lambda_0$, $w = 0.25\lambda_0$



Фиг. 1.3. Надлъжен разрез на МЛКАОИ на *Kaloi*: $h_q = \lambda_0/2$, $W, D_2 = 2\lambda_0$



Фиг. 1.10. Надлъжен разрез на КП МЛКАОИ, възбудена с Н-образен процес

приложение в редица безжични комуникационни системи, където се използва и до днес. За сведение, тя бе използвана за осъществяване на връзката между лунната капсула и космическия кораб Аполо 11 при покоряване на Луната от човека през 1969 г. Използването на микролентова технология намалява още повече размерите на КАОИ, като първите опити в това отношение датират от 1981 г., когато *С. М. Kaloj* предлага МЛКАОИ (фиг. 1.3). Антената на *Kaloj* представлява КАОИ, в която като възбудител се използва МЛА. МЛА, както и КАОИ, е резонаторна антена с КУ $G \approx 6 - 7 \text{ dBi}$ и ИЧЛ $bw_{|S_{11}|}$ също около $5 - 6\%$. В МЛКАОИ, предложени през този период, обемният резонатор обикновено е запълнен с ППВ материали (пенопропилен, полимер и въздух с $\epsilon_r \approx 1$) за разширяване на честотната лента. Този тип антени имат два съществени недостатъка – минимално намаляване на размерите на антените, поради ниската стойност на диелектричната константа, и слабата им механична якост.

За постигане на по-голяма миниатюризация и по-добри механични качества в [32] (Lee, R. Q., K. F. Lee. Experimental study of the two-layer electromagnetically coupled rectangular patch antenna. IEEE Trans. AP, 1990, vol. 38, no. 8, pp. 1298–1302) е предложена и изследвана експериментално ЛП МЛКАОИ с обемен резонатор, изцяло запълнен с твърд диелектрик. Постигнато е намаляване на височината на антената Н (надлъжен размер) с 38%, но ИЧЛ $bw_{|S_{11}|}$ намалява чувствително до 0.85%. По-добри резултати са получени в [34] (Червенков, Г. Ц. Изследване на микролентови къси антени с обратно излъчване, Дисертация, ОНС „Доктор”, ТУ-Варна, 2013 г.), където са предложени и изследвани няколко конструкции на ЛП МЛКАОИ с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик с различна форма на цилиндричния периферен екран.

Използването на КП в МЛКАОИ разширява техните възможности, особено при включването им в наземни и спътникови мобилни комуникации. За целта в МЛКАОИ се възбуждат две ортогонални колебания с еднакви амплитуди и с фазова квадратура:

$$|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| \quad (1.2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \pm(2n + 1)\pi/2, n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3)$$

Едновременното изпълнение на амплитудното и фазовото условие (1.2) и (1.3) в широк честотен обхват се оказва на практика трудна задача, поради което поляризационната честотна лента (ПЧЛ) bw_{AR} на конвенционалната КП МЛКАОИ е тясна и обикновено не надвишава 1%, като най-често тя съвпада с честотната лента bw на КП МЛКАОИ. При прилагане на различни методи за разширяване на честотната лента на МЛА, описани в края на първа глава, като използване на процепно възбуждане, включване на два и повече резонанса в ИЧХ и ПЧХ, употреба на ППВ материали в антенната конструкция и др., честотната лента на

КП МЛКАОИ може да се увеличи (фиг. 1.10). Честотната лента на КП МЛКАОИ в дисертационния труд се определя съгласно IEEE Standard 145–2013 като областта от честоти $f_{min} - f_{max}$, в която се изпълняват едновременно трите условия: $|S_{11}| \leq -10$ dB, $AR \leq 3$ dB и $G \geq G_{max} - 3$ dBic.

Извършеният литературен обзор в областта на КП МЛКАОИ позволява да се направят следните изводи:

1. Не са известни конструкции на КП МЛКАОИ с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик.
2. Не е извършен параметричен анализ на КП МЛКАОИ с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик. Не е изследвано числено влиянието на геометричните размери върху електрическите характеристики на антените от този клас.
3. Няма извършени експериментални изследвания на КП МЛКАОИ с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик.

Въз основа на направените по-горе изводи са формулирани целта и задачите на изследването, описани в общата характеристика на дисертационния труд.

ГЛАВА 2. Методи и модели за електродинамичен анализ на микролентови антени

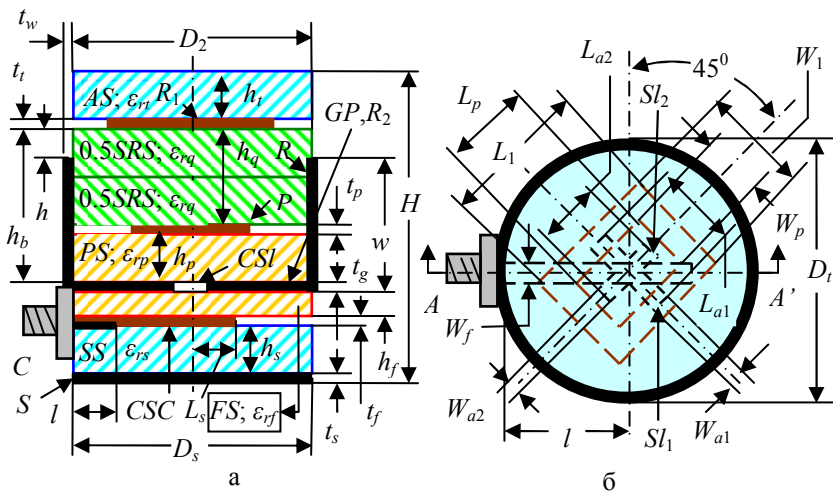
Описани са методите и моделите за електродинамичен анализ на МЛА. От аналитичните методи са разгледани двата най-използвани метода, основаващи се на модела на предавателната линия (МПЛ) и на резонаторния модел (РМ), при които анализираната антена се представя съответно като предавателна линия или като обемен резонатор. От числените методи, известни още като методи на пълновълновия анализ, е обърнато внимание на два метода – метода на крайния брой разлики във времевата област (FDTD) и метода на крайните елементи (FEM), тъй като те се използват в софтуерните продукти, избрани за извършване на компютърните симулации в дисертационния труд – Microwave Studio 2010 (FDTD метод) и HFSS v.13 (FEM), а останалите числени методи са споменати само за сведение.

Направена е оценка на точността на аналитичните методи при прилагането им за анализ на изследваните КП МЛКАОИ. Извършено е, също така, сравнение на няколко от най-използваните софтуерни продукти по отношение на приложимостта им за анализ на МЛА с 3D нехомогенна структура, точността и необходимото компютърно време за симулациите. В резултат на това сравнение са избрани софтуерните продукти MWS и HFSS за числените изследвания в дисертационния труд, базирани на използването съответно на методите FDTD и FEM.

ГЛАВА 3. Числено изследване на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гладък цилиндричен периферен екран (антена A1)

В дисертационния труд числено са изследвани 4 нови конструкции на КП МЛКАОИ, принадлежащи към три класа антени според вида на цилиндричния периферен екран. Всички изследвани антени са с процепно възбуждане, при което общата метална основа изолира двете съставни части на антената – възбуждаща и излъчваща, и позволява независима оптимизация на геометричните размери и параметри на техните елементи, а оттам и подобряване на електрическите характеристики на антената. Също така, всички изследвани антени са с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик с цел постигане на максимално намаление на размерите им и висока механична якост, които качества са от съществено значение при някои техни приложения. В зависимост от формата на цилиндричния периферен екран изследваните антени могат да бъдат разделени на три групи – антена с гладък цилиндричен периферен екран, която за краткост ще бъде означена като антена A1, антени с гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен (антена A2) и с два пръстена (антена A3) и антена с многослоен печатен цилиндричен периферен екран (антена A4).

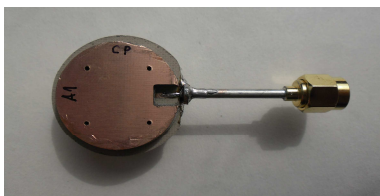
Конструкцията на антена A1 е показана на фиг. 3.5, а изработеният експериментален модел - на фиг. 3.6. За ЛП прототип на антената е избрана антенната конструкция, предложена в [33] (Kirov, G. S., G. T. Chervenkov, C. D. Kalchev. Aperture coupled microstrip short backfire antenna. *Journal of Electrical Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 75–80). КП в антената се постига чрез възбуждане на две ортогонални колебания с еднакви амплитуди и с фазова разлика от 90^0 с помощта на кръстообразен процеп (КрП), получен чрез изрязване на втори правоъгълен процеп Sl_2 в общата метална основа $GP(R_2)$, ортогонален на първия правоъгълен процеп Sl_1 на ЛП прототип, и завъртане на възбуждащата МЛЛ на 45^0 около центъра на КрП. Възбуждащата част на антената се състои от общата метална основа $GP(R_2)$, диелектрична подложка на възбуждащата МЛЛ FS , централен лентов проводник CSC на МЛЛ, запоен за жилото на коаксиалния SMA куплунг C , метален екран S , и диелектрична подложка на екрана SS , разположена между него и централния лентов проводник CSC . Излъчващата част на антената включва следните елементи: обща метална основа $GP(R_2)$, която изпълнява ролята на големия метален отражател R_2 на МЛКАОИ, правоъгълен излъчващ елемент P и диелектрична подложка PS между тях, формиращи първия, MS резонатор на антената, малък правоъгълен метален отражател R_1 с диелектрична подложка SRS , намираща се между него и излъчващия елемент P , допълнителна подложка



Фиг. 3.5. Геометрия на антена A1: а) надлъжен разрез AA'; б) изглед отгоре

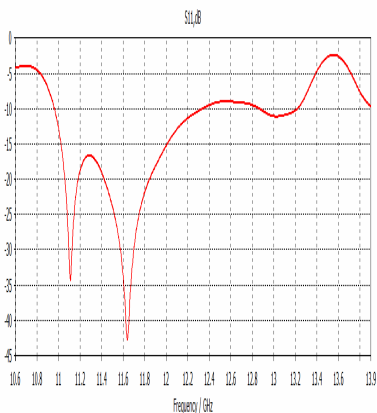


а



б

Фиг. 3.6. Изработен експериментален модел на антена A1: а) изглед отгоре; б) изглед отдолу (Патент на РБ No. 66583/13.06.2017)



Фиг. 3.16а. Модул на коефициента на отражение $|S_{11}|(f)$ на антена A1

AS , разположена над малкия отражател R_1 , служеща за импедансно съгласуване между отворения втори, BF резонатор на антената и свободното пространство, и гладък цилиндричен периферен екран R . Вторият резонатор на антената се формира между малкия R_1 и големия R_2 отражател на МЛКАОИ.

В антената са използвани пет диелектрични подложки със следните дебелини и електрически параметри:

- 1). Подложка на екрана SS : Taconic TLX-7: $h_s = 3.175$ mm, $\epsilon_{rs} = 2.6$ и $\tan\delta_s = 0.0019$.
- 2). Подложка на възбуждащата МЛЛ FS : Arlon AD 600: $h_f = 0.635$ mm, $\epsilon_{rf} = 6.15$ и $\tan\delta_f = 0.0030$.
- 3). Подложка на излъчващия елемент PS : Arlon AD 600: $h_p = 1.27$ mm (2 диелектрични плоскости с дебелини 0.635 mm), $\epsilon_{rp} = 6.15$ и $\tan\delta_p = 0.0030$.
- 4). Подложка на малкия отражател SRS : Arlon AD 410: $h_q = 6.35$ mm (2 диелектрични плоскости с дебелини 3.175 mm), $\epsilon_{rq} = 4.1$ и $\tan\delta_q = 0.0030$.
- 5). Допълнителна подложка AS : Taconic TLX-7: $h_t = 1.575$ mm, $\epsilon_{rt} = 2.6$ и $\tan\delta_t = 0.0019$.

Параметричният анализ на антена A1 е извършен със софтуерния продукт MWS 2010, като е избрана точност на решението за всички симулации равна на 2%. Първоначално се извършва предварително числено изследване за определяне на геометричните размери и параметри, които оказват най-силно влияние върху електрическите характеристики на антената. Установени са 15 променливи размера и параметъра, които участват в оптимизацията. С цел опростяване на оптимизационната процедура, те са разделени на две групи, като първата група включва 8 независими променливи размера и параметъра (фиг. 3.5) – дължина на излъчващия елемент L_p , отношение $K_p = L_p/W_p$, средна дължина на възбуждащия КрП $L_a = 0.5(L_{a1} + L_{a2})$, отношение $K_s = L_{a1}/L_{a2}$, дължина на малкия отражател L_1 , отношение $K_1 = L_1/W_1$, ширина на периферния екран w и дължина на съгласуващата линия L_s , а във втората група влизат 7 зависими променливи размера – ширина на излъчващия елемент W_p , дължина на процеп 1 L_{a1} , ширина на процеп 1 W_{a1} , дължина на процеп 2 L_{a2} , ширина на процеп 2 W_{a2} , ширина на малкия отражател W_1 и разстояние между малкия отражател и горния край на периферния екран h , чиито стойности се определят от групата на независимите променливи размери и параметри чрез използване на съществуващи или въведени връзки между тях:

$$W_p = L_p/K_p \quad (3.11)$$

$$L_{a1} = 2L_a K_s / (K_s + 1) \quad (3.12)$$

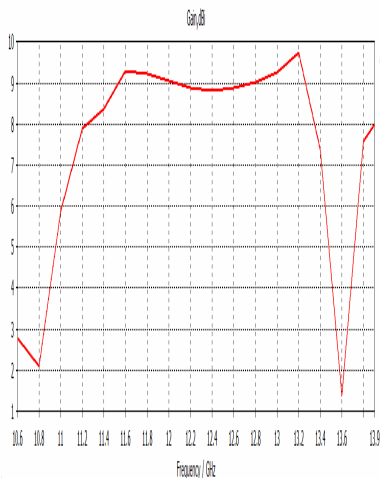
$$L_{a2} = 2L_a / (K_s + 1) \quad (3.13)$$

$$h = h_b - w, h_b = 7.638 \text{ mm} \quad (3.15)$$

$$W_{ai} = L_{ai}/10, i=1, 2 \quad (3.16)$$



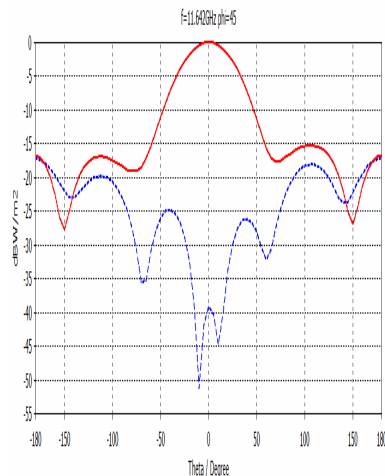
Фиг. 3.16б. Аксиално отношение AR на антена A1



Фиг. 3.16в. Коэффициент на усилване G на антена A1



Фиг. 3.16г. Ниво на задно излъчване BRL на антена A1



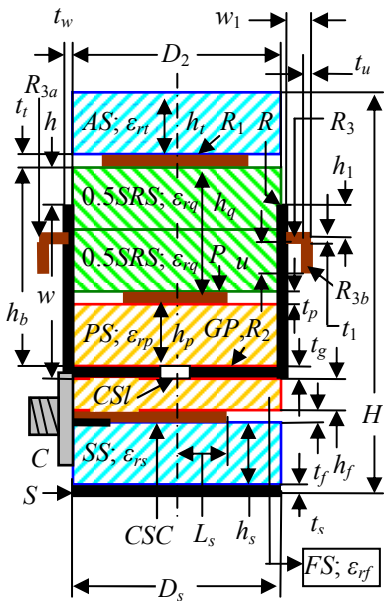
Фиг. 3.17б. ДН на антена A1: $\varphi = 45^\circ$, $f = f_0 = 11.642 \text{ GHz}$,
— основна поляризация,
--- кросполяризация

Като основен критерий при оптимизацията е избрана ширината на честотната лента bw с допълнителни критерии минималната стойност на аксиалното отношение AR и КУ G . В резултат на оптимизацията са намерени оптималните стойности на променливите размери и параметри, както следва: $L_p = 2.8$ mm, $K_p = 1.04$, $L_a = 3.9$ mm, $K_s = 1.125$, $L_1 = 5.0$ mm, $K_1 = 1,18$, $w = 5.5$ mm, $L_s = 1.0$ mm, $W_p = 2.692$ mm, $L_{a1} = 4.129$ mm, $W_{a1} = 0.413$ mm, $L_{a2} = 3.670$ mm, $W_{a2} = 0.367$ mm, $W_1 = 4.237$ mm и $h = 2.155$ mm. На фиг. 3. 16а - 3.16г са показани честотните зависимости на четири електрически характеристики на антена А1 в Х и Ку-обхвата – модул на коефициента на отражение $|S_{11}|(f)$, аксиално отношение $AR(f)$, КУ $G(f)$ и ниво на задно излъчване $BRL(f)$ след оптимизацията. Стойностите на основните електрически характеристики на антената са: $bw = 2.71\%$, $AR_{min} = 0.20$ dB, $G_{max} = 9.30$ dBic, $BRL_{max} = -15.9$ dB и минимална стойност на ефективността на излъчване $\eta_{effmin} = 87.5\%$. На фиг. 3.17б са показани ДН на основната и кръсполяризационната компонента в равнина $\varphi = 45^0$ на средната работна честота на антената $f_0 = 11.642$ GHz.

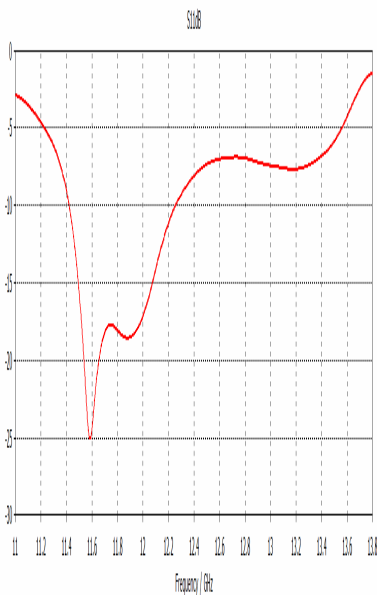
ГЛАВА 4. Числено изследване на кръговополяризирани микролентови къси антени с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран (антени А2 и А3)

В тази глава са предложени и изследвани числено две нови конструкции на КП МЛКАОИ с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен (антена А2) и с два пръстена (антена А3). Идеята при този тип антени е чрез известно усложняване на конструкцията на периферния екран и респективно на антената, да се измени амплитудното и фазово разпределение на полето в излъчващата апертура на антената по такъв начин, че излъчените полета от възбудителя на КП МЛКАОИ (МЛА) и от излъчващата апертура да се окажат синфазни в далечната зона. В резултат на това трябва да се очаква повишаване на КУ G на антени А2 и А3 в сравнение с КУ на антена А1.

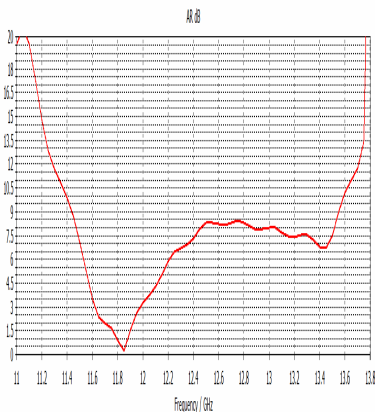
Тъй като не се предвижда изработване и измерване на експериментални антенни модели на антени А2 и А3, за валидиране на резултатите от числените изследвания с тях със симулатора MWS 2010, се извършват симулации и с втори софтуерен продукт HFSS и сравнение на резултатите, получени от двата симулатора. Естествено, точността на решението при симулациите е избрана една и съща (2%) и при двата симулатора.



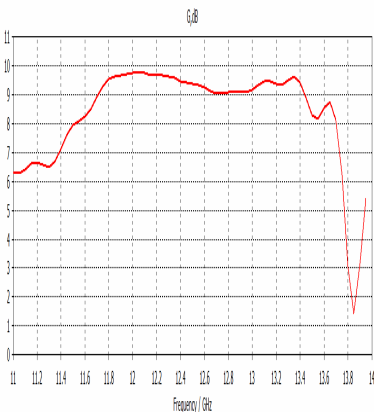
Фиг. 4.1а. Надлъжен разрез AA' на антена A2



Фиг. 4.4а. Модул на коефициента на отражение $|S_{11}|(f)$ на антена A2



Фиг. 4.4б. Аксиално отношение AR на антена A2



Фиг. 4.4в. Коефициент на усилване G на антена A2

Антенa A2

Конструкцията на антенa A2 е показана на фиг. 4.1a. Антената използва ЛП прототип, предложен в [35] (Chervenkov, G. T. Aperture coupled microstrip short backfire antenna with corrugated rim. *Journal of Applied Electromagnetism*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 1–10), като се различава от изследваната вече в трета глава антенa A1 по добавения в горния край на периферния екран R на разстояние h_1 от края му метален пръстен R_3 . Пръстенът се състои от две части – основен пръстен R_{3a} с ширина w_1 и дебелина t_1 и допълнителен пръстен R_{3b} с ширина u и дебелина t_u .

Параметричния анализ и оптимизационната процедура при антенa A2 са избрани по начина, приложен при антенa A1, като получените стойности на оптималните променливи размери и параметрите са следните: $L_p = 2.7$ mm, $K_p = 1.06$, $L_a = 4.1$ mm, $K_s = 1.10$, $L_1 = 4.1$ mm, $K_1 = 1.08$, $w = 3.8$ mm, $L_s = 0.9$ mm, $W_p = 2.547$ mm, $L_{a1} = 4.295$ mm, $W_{a1} = 0.429$ mm, $L_{a2} = 3.905$ mm, $W_{a2} = 0.390$ mm, $W_1 = 3.796$ mm и $h = 3.855$ mm.

На фиг. 4.4a – 4.4г са показани честотните зависимости на електрическите характеристики $|S_{11}|(f)$, $AR(f)$, $G(f)$ и $BRL(f)$ на антенa A2. Антената притежава следните характеристики: $bw = 2.07\%$, $AR_{min} = 0.22$ dB, $G_{max} = 9.79$ dBic, $BRL_{max} = -16.4$ dB и $\eta_{effmin} = 86.1\%$, получени при симулационното изследване.

На фиг. 4.5б са изобразени ДН на основната и кросполяризационната компонента в равнината $\varphi = 45^\circ$ на средната работна честота на антената $f_0 = 11.795$ GHz.

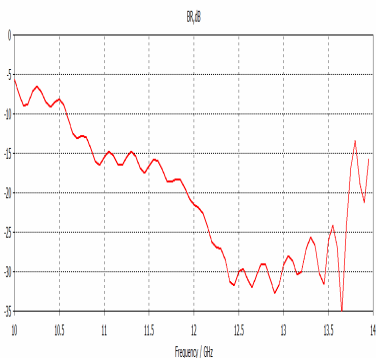
При сравняване на електрическите характеристики на антенa A2, получени при численото изследване на антената с два различни продукта се установи, че относителната разлика между тях $|\delta|$ (за величините, изразени с числа) е в границите от 0.8% до 8.3%, а разликата δ (за величините, изразени в dB и dBic) варира от -0.45 dBic до $+1.45$ dB. Относителната разлика $|\delta|$ и разликата δ са изчислени по изразите

$$|\delta| = |(A_{HFSS} - A_{MWS})/A_{MWS}| \times 100, \% \quad (4.1)$$

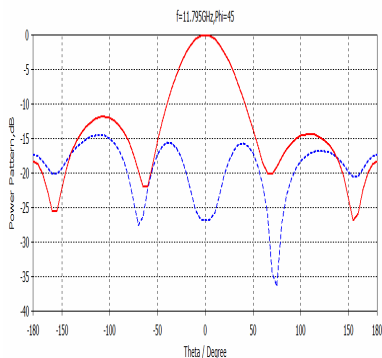
$$\delta = A_{HFSS} - A_{MWS}, \text{ dB (dBic)}, \quad (4.2)$$

където A_{HFSS} и A_{MWS} са стойностите на изследваните величини, получени при симулациите съответно с продуктите HFSS v.13 и MWS 2010.

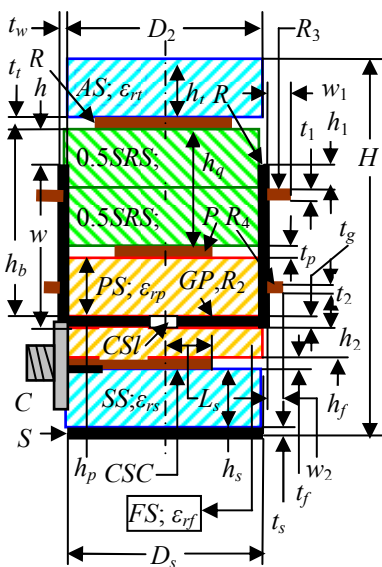
Сравнението на резултатите, получени при симулационното изследване на 5 основни електрически характеристики и параметъра (bw , AR_{min} , G_{max} , BRL_{max} и η_{effmin}) на антени A2 и A1 показва, че антената A2 превъзхожда антенa A1 по максималния КУ G_{max} и максимално ниво на задно излъчване BRL_{max} при еднакви стойности на минималното аксиално отношение AR_{min} за двете антени.



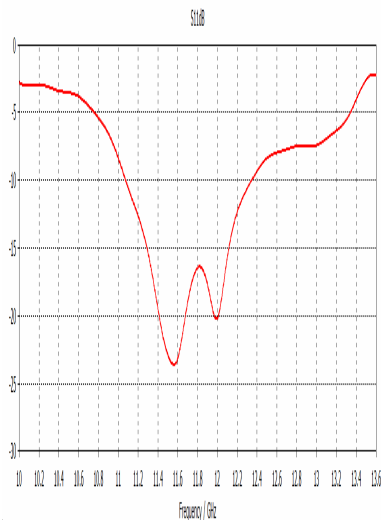
Фиг. 4.4г. Ниво на задно излъчване BRL на антена A2



Фиг. 4.5б. ДН на антена A2: $\varphi = 45^\circ$, $f = f_0 = 11.795 \text{ GHz}$,
— основна поляризация,
- - - кросполяризация



Фиг. 4.8а. Надлъжен разрез AA' на антена A3



Фиг. 4.11а. Модул на коефициента на отражение $|S_{11}|$ на антена A3

Антенa A3

На фиг. 4.8а е показана конструкцията на антенa A3. Тя е получена от ЛП прототип, предложен в [35]. Антената се различава от антенa A1 по поставените върху цилиндричния периферен екран R два пръстена – първи пръстен R_3 на разстояние h_1 от горния край на периферния екран с ширина w_1 и дебелина t_1 и втори пръстен R_4 на разстояние h_2 от долния край на периферния екран с ширина w_2 и дебелина t_2 .

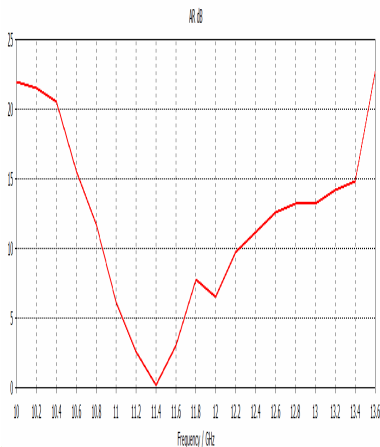
Параметричният анализ и оптимизационната процедура, приложени при антенa A3, дават следните стойности на оптималните променливи размери и параметри: $L_p = 2.7$ mm, $K_p = 1.13$, $L_a = 4.3$ mm, $K_s = 1.10$, $L_1 = 3.7$ mm, $K_1 = 1.12$, $w_1 = 3.0$ mm, $w_2 = 3.0$ mm, $L_s = 1.0$ mm, $W_p = 2.389$ mm, $L_{a1} = 4.505$ mm, $W_{a1} = 0.450$ mm, $L_{a2} = 4.095$ mm, $W_{a2} = 0.410$ mm и $W_1 = 3.304$ mm.

Честотните зависимости на електрическите характеристики $|S_{11}|(f)$, $AR(f)$, $G(f)$ и $BRL(f)$ на антенa A3 в X и Ku-обхвата след оптимизацията са показани на фиг. 4.11а – 4.11г. Антената притежава следните характеристики: $bw = 3.75\%$, $AR_{min} = 0.06$ dB, $G_{max} = 10.43$ dBic, $BRL_{max} = -15.6$ dB и $\eta_{effmin} = 88.6\%$, получени при симулационното изследване.

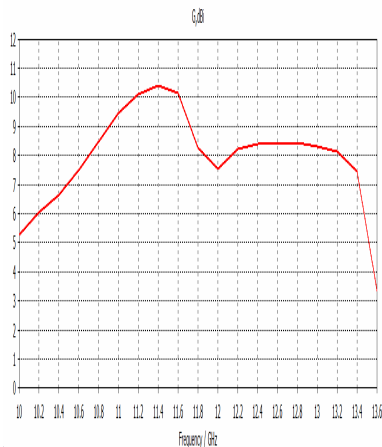
На фиг. 4.12б са показани ДН на основната поляризация и кросполяризацията на антенa A3 в равнината $\varphi = 45^\circ$ на средната работна честота $f_0 = 11.388$ GHz.

Сравнението на резултатите, получени от численото изследване на антенa A3 с два различни софтуерни продукта – MWS 2010 и HFSS v.13 показва че относителната разлика $|\delta|$ между стойностите на сравняваните 8 електрически характеристики и параметъра е в границите от 0 до 12.3% за величините, изразени с числа, докато разликата δ за величините в dB и dBic варира от -2.2 dB до $+0.5$ dBic, което може да се счита като добро съответствие.

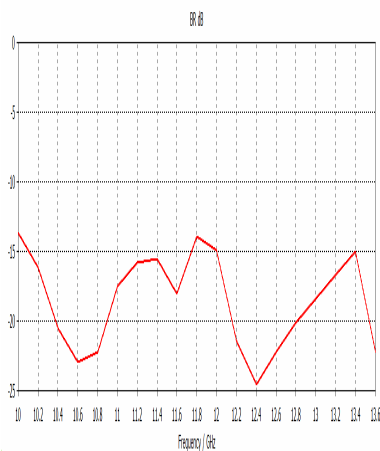
Сравнението между антенa A3 и антени A1 и A2 по 5 основни електрически характеристики и параметъра (bw , AR_{min} , G_{max} , BRL_{max} и η_{effmin}) дава следните резултати: антенa A3 има подобрени характеристики и параметри спрямо антенa A1 с изключение само на един показател – максималното ниво на задно излъчване BRL_{max} , което леко надвишава това на антенa A1 с 0.3 dB; антенa A3 превъзхожда антенa A2 по всички сравнявани характеристики и параметри с изключение на максималното ниво на задно излъчване BRL_{max} , което е по-високо от това на антенa A2 с 0.8 dB.



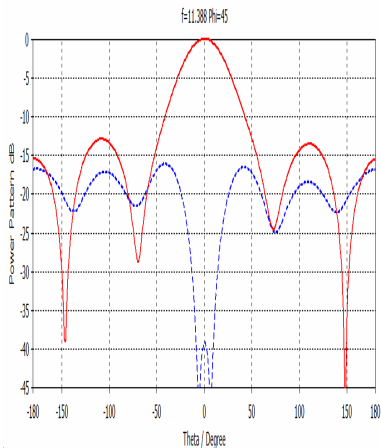
Фиг. 4.11б. Аксиално отношение AR на антена А3



Фиг. 4.11в. Коефициент на усилване G на антена А3



Фиг. 4.11г. Ниво на задно излъчване BRL на антена А3



Фиг. 4.12б. ДН на антена А3: $\varphi = 45^\circ$, $f = f_0 = 11.388 \text{ GHz}$,
— основна поляризация,
--- кросполяризация

ГЛАВА 5. Числено изследване на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и многослоен печатен цилиндричен периферен екран (антена А4)

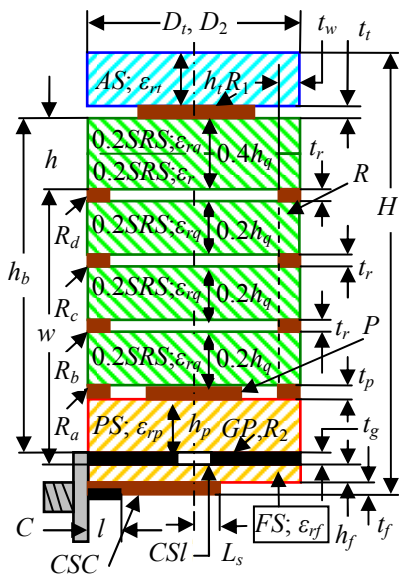
В изследваните в трета и четвърта глава на дисертационния труд антени А1, А2 и А3 всички антенни елементи се изработват по фотолитографска технология с изключение на периферния екран. Замяната на плътния метален екран с многослоен печатен периферен екран позволява да се облекчи изработването на антената (изцяло по фотолитографски метод) и да се намалят омичните загуби, което води до повишаване на КУ и ефективността ѝ. В предложената и изследвана в пета глава антена А4 има още една промяна в сравнение с базовата антена А1 – отсъствие на металния екран S и неговата подложка SS . По този начин се опростява антенната конструкция и се разширяват възможностите за приложение на антената в състава на сложни антенни решетки, тъй като е известно, че присъствието на екрана влияе контрапродуктивно върху антенните характеристики на антенните решетки от МЛА с процепно възбуждане [161] (Waterhouse, R. B. *Microstrip Patch Antennas: a Designer's Guide*. Kluwer Academic Publishers, 2003).

Антената е създадена на базата на предложения в [34] ЛП прототип. Конструкцията ѝ е представена на фиг. 5.1а, а на фиг. 5.2 е показан изработен антенен модел, предназначен за експериментално изследване чрез измерване. Периферният екран на антената се състои от четири метални пръстена $R_a - R_d$, получени чрез ецване на метализацията на горната част на диелектричната подложка PS на излъчващия елемент и на три диелектрични плоскости на диелектричната подложка SRS на малкия отражател.

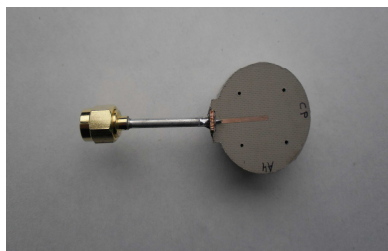
След извършването на параметричния анализ и оптимизационната процедура са получени следните оптимални стойности на променливите размери и параметри: $L_p = 2.8$ mm, $K_p = 1.08$, $L_a = 4.1$ mm, $K_s = 1.18$, $L_1 = 6.3$ mm, $K_1 = 1.02$, $L_s = 1.4$ mm, $W_p = 2.502$ mm, $L_{a1} = 4.438$ mm, $W_{a1} = 0.444$ mm, $L_{a2} = 3.762$ mm, $W_{a2} = 0.376$ mm и $W_1 = 6.176$ mm.

Основните електрически характеристики на антена А4 $|S_{11}|(f)$, $AR(f)$, $G(f)$ и $BRL(f)$, получени след оптимизацията на антената, са показани на фиг. 5.4а – 5.4г. Антената притежава следните характеристики: $bw = 4.70\%$, $AR_{min} = 0.5$ dB, $G_{max} = 10.85$ dBic, $BRL_{max} = -24.4$ dB и $\eta_{effmin} = 90\%$.

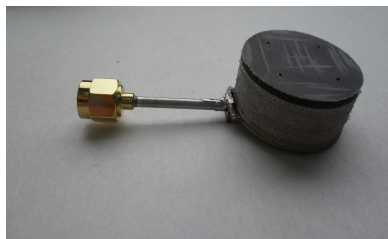
На фиг. 5.5б са изобразени ДН на основната и кръговополяризиращата компонента на антена А4 в равнината $\varphi = 45^\circ$ на средната работна честота $f_0 = 11.388$ GHz.



Фиг. 5.1а. Надлъжен разрез AA' на антена A4

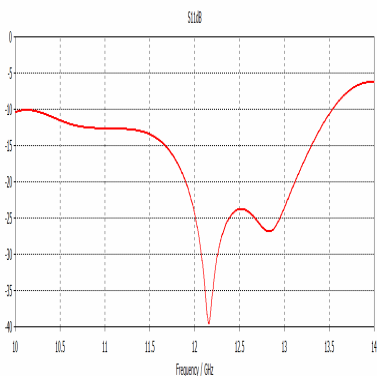


а

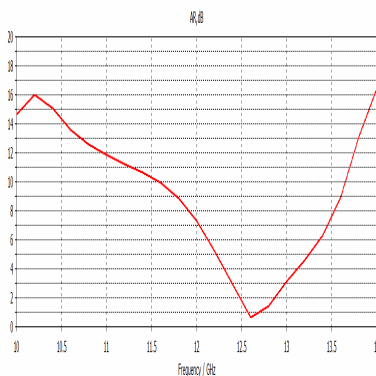


б

Фиг. 5.2. Изработен експериментален модел на антена A4: а) изглед отгоре; б) изглед отдолу



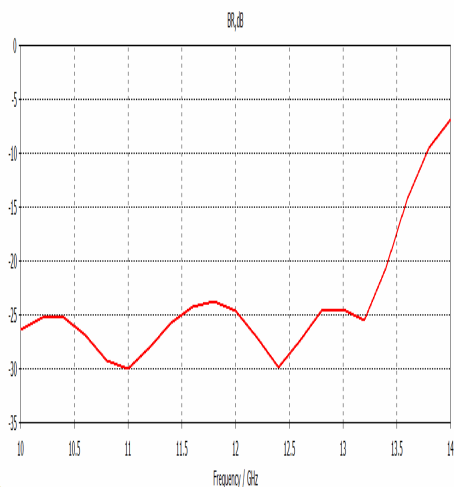
Фиг. 5.4а. Модул на коефициента на отражение $|S_{11}|$ на антена A4



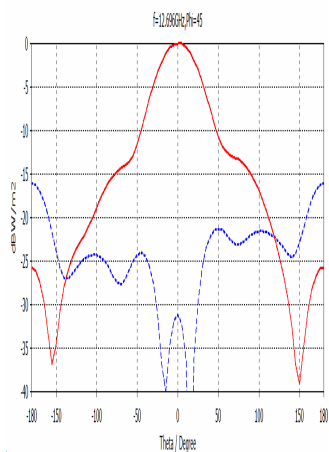
Фиг. 5.4б. Аксиално отношение AR на антена A4



Фиг. 5.4в. Коефициент на усилване G на антена A4



Фиг. 5.4г. Ниво на задно излъчване BRL на антена A4



Фиг. 5.5б. ДН на антена A4: $\varphi = 45^\circ$, $f_0 = 12.696\text{GHz}$
— основна поляризация,
--- кросполяризация

Табл. 5.5. Сравнение на основните електрически характеристики, получени при симулационното изследване на антените

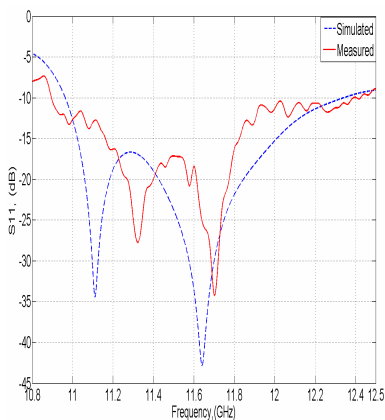
Ел. х-ка	Антенa			
	A1	A2	A3	A4
bw , %	2.71	2.07	3.75	4.70
AR_{min} , dB	0.20	0.22	0.06	0.50
G_{max} , dBi	9.30	9.79	10.43	10.85
BRL_{max} , dB	-15.9	-16.4	-15.6	-24.4
η_{effmin} , %	87.5	86.1	88.6	90

В табл. 5.5 са сравнени 5 основни електрически характеристики и параметъра (bw , AR_{min} , G_{max} , BRL_{max} и η_{effmin}) на антена A4, получени при симулационното изследване, със същите характеристики и параметри на антени A1, A2 и A3. Сравнението показва, че антена A4 превъзхожда антени A1, A2 и A3 по всички характеристики и параметри с изключение на един показател – минималното аксиално отношение AR_{min} , по който отстъпва на антени A1, A2 и A3 съответно с 0.3 dB, 0.28 dB и 0.44 dB.

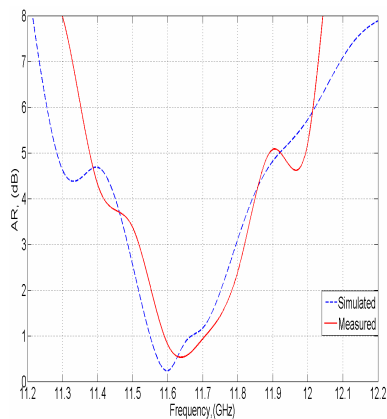
ГЛАВА 6. Експериментално изследване на изработените антенни модели

Получените резултати от числените изследвания в четвърта глава бяха валидирани чрез допълнителна проверка с втори софтуерен продукт. Резултатите от числените изследвания в трета и пета глава са валидирани с по-надежден метод – чрез изработване и измерване на експериментални модели на антени A1 и A4, показани на фиг. 3.6 и фиг. 5.2. След извършено проучване по отношение на точността на литографската и механична обработка на антенните елементи, за тяхното изпълнение беше избрана фирма „Микрон 20 ЕООД“ София, която осигурява толеранс между 18 μm и 36 μm при дебелина на метализацията 0.0175 mm и между 35 μm и 70 μm при дебелина на метализацията 0.035 mm, точност на механична изработка при фрезование по контур (поради кръглата форма на антените) ± 0.3 mm и точност при изработване на плътния метален екран на антена A1 чрез струговане равна на ± 0.1 mm. Окончателното сглобяване на антенните модели беше извършено в катедра „Комуникационна техника и технологии“ на ТУ-Варна. Измерванията са проведени в безеховата електромагнитна камера за антенни измервания на катедрата. В X и Ku-обхвата бяха измерени пет антенни характеристики на антените A1 и A4 - $|S_{11}|(f)$, $AR(f)$, $G(f)$, $BRL(f)$ и ДН на основната и кросполяризационната компонента в равнините $\varphi = 0^\circ$ и 45° на три честоти в честотната лента на антените – f_{min} , f_0 и f_{max} .

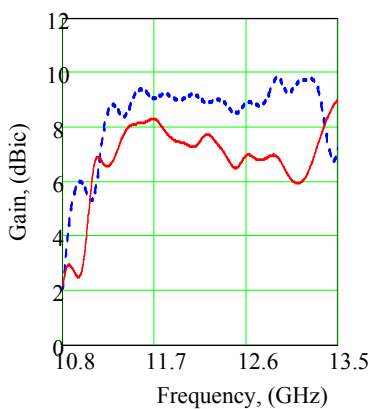
Измерванията на електрическите характеристики на антенните модели в безеховата електромагнитна камера бяха извършени със следната измервателна апаратура: микровълнов генератор Г4-195 (8 GHz – 18 GHz), измервател на мощност Agilent E4418B със сонда 8485 (50 MHz – 26.5 GHz), селективен микровълнов измервателен приемник Rhode & Schwarz USU.BN15233 (1 GHz – 13 GHz), спектрален анализатор SPECTRAN HF-6060 V4x (10 MHz – 6 GHz) и прецизен насочен отклонител Narda 23379 (9 GHz – 18 GHz).



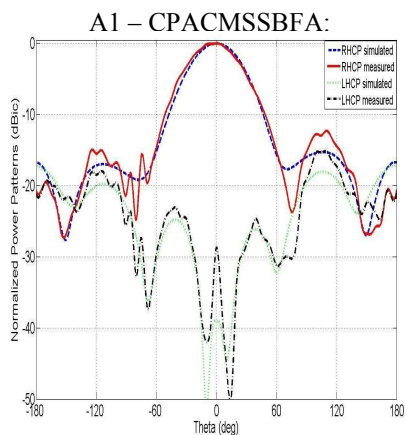
Фиг. 6.5. Модул на коефициента на отражение $|S_{11}|(f)$ на антена A1: --- симуляция; — измерване



Фиг. 6.6. Аксиално отношение $AR(f)$ на антена A1: --- симуляция; — измерване



Фиг. 6.7. Коефициент на усилване $G(f)$ на антена A1: --- симуляция; — измерване



Фиг. 6.9. ДН на антена A1: $\varphi = 0^\circ, f = f_0$, симуляция: --- основна поляризация, кросполяризация; измерване: — основна поляризация, -.-.- кросполяризация

Антенa A1

На фиг. 6.5 е показана зависимостта $|S_{11}|(f)$ на антенa A1. За сравнение, на графиката е изобразена същата зависимост на антената, получена при симулационните изследвания. Формата на двете криви се запазва една и съща в честотната лента на антената, като е регистрирано известно изместване на двата резонанса (на MS и BF резонатора) на симулационната крива в посока към нискочестотната област спрямо кривата от измерванията. На практика средната честота на ИЧЛ е една и съща при симулация и измерване, тъй като относителната грешка в случая е незначителна - $|\delta_{f_{0|S11}}| = 0.07\%$.

От фиг. 6.6 се вижда, че видът на двете криви $AR(f)$ – от симулацията и измерването се запазва един и същ в честотната лента на антената, като средната честота на ПЧЛ f_{0AR} е изместена с 0.22% в посока към ниските честоти спрямо стойността, получена при измерването.

Фиг. 6.7 показва, че КУ G получава по-ниски стойности при измерването, като разликата между средните стойности на КУ G_{av} в честотната лента на антената, получени при симулацията и измерването, е около 1 dBic.

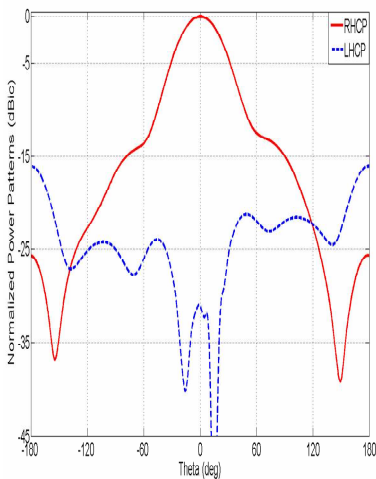
На фиг. 6.9 са изобразени ДН на антенa A1 на основната поляризация и на кросполяризацията в равнина $\varphi = 0^\circ$ на средната работна честота на антената f_0 , които показват много добро съответствие между симулация и измерване.

В табл. 6.2 е извършено сравнение между резултатите от симулациите и измерването на 5 основни характеристики и параметри на антенa A1, като относителната грешка $|\delta|$ за величините, изразени с числа и грешката δ за величините, изразени с dB (dBic), са определени съгласно следните изрази

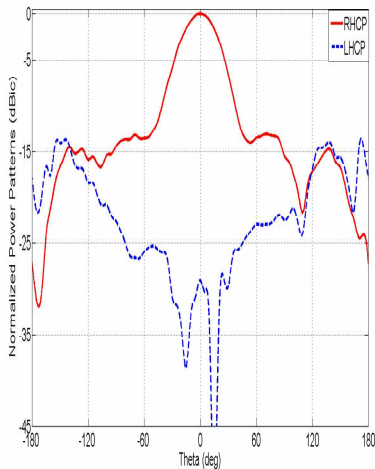
$$|\delta| = |(A_{sim} - A_{meas})/A_{meas}| \times 100, \% \quad (6.2)$$

Табл. 6.2. Сравнение между основните характеристики и параметри на антенa A1, получени при симулационно изследване и експериментално измерване

Характеристика/ параметър	Симулация (MWS)	Измерване	Отн. грешка $ \delta $ и грешка δ
$bw_{ S11 }, \%$	11.84	12.75	$ \delta = 7.14\%$
$f_{0 S11 }, \text{GHz}$	11.650	11.642	$ \delta = 0.07\%$
$bw_{AR}, \%$	2.71	2.57	$ \delta = 5.45\%$
f_{0AR}, GHz	11.642	11.668	$ \delta = 0.22\%$
G_{av}, dBic	9.1	8.1	$\delta = 1 \text{ dBic}$



а



б

Фиг. 6.19. Диаграма на насоченост на антена A4: $\varphi = 45^\circ, f = f_0$:

— основна поляризация, - - - кросполяризация: а) симулация (MWS), $f_0 = 12.696$ GHz; б) измерване, $f_0 = 12.745$ GHz

$$\delta = A_{sim} - A_{meas}, \text{ dB (dBic)}, \quad (6.3)$$

където A_{sim} и A_{meas} са сравняваните величини, получените съответно чрез симулация и измерване. От данните, поместени в табл. 6.2 може да се констатира добро съответствие между симулационно изследване и измерване.

Антенa A4

На фиг. 6.14 е показана зависимостта $|S_{11}|(f)$, от където може да се установи близост между кривите, получени при симулация и измерване, като относителната грешка $|\delta|$ при ширината на ИЧЛ $bw_{|S_{11}|}$, и средната ѝ честота $f_{0|S_{11}|}$ е в границите между 2.4% и 3%.

На фиг. 6.15, където са изобразени зависимостите $AR(f)$, получени чрез симулация и измерване, се вижда, че резултатите за средната честота на ПЧЛ f_{0AR} са много близки (относителна грешка $|\delta| = 0.38\%$), докато при ширината на ПЧЛ

bw_{AR} е регистрирано голямо отклонение ($|\delta| = 17.5\%$), дължащо се вероятно на неточности при изработване на експерименталния антенен модел.

КУ $G(f)$, показан на фиг. 6.16, има близки стойности при симулация и измерване в работната честотна лента на антената, като разликата между средните стойности на КУ G_{av} е $\delta = 0.9$ dBic.

При нивото на задно излъчване BRL (фиг. 6.17) е установено, че разликата δ между стойностите на BRL_{max} при симулация и измерване не надвишава 3.5 dB.

На фиг. 6.19 са показани ДН на антена А4 за основната и кросполяризационната компонента, получени при симулационно изследване и експериментално измерване. От фигурата може да се констатира, че ДН на основната поляризация остава същата при симулация и измерване само в границите на главния лист на ДН, докато ДН на кросполяризационната компонента са относително близки при симулацията и измерването.

В табл. 6.4 са сравнени резултатите от симулацията и измерването на 6 основни характеристики и параметъра на антена А4, от където може да се установи сравнително добро съответствие между резултатите от симулационното изследване и експерименталното измерване с изключение на резултата за ширината на ПЧЛ bw_{AR} ($|\delta| = 17.5\%$).

Табл. 6.4. Сравнение между основните характеристики и параметри на антена А4, получени при симулационно изследване и експериментално измерване

Характеристика/ параметър	Симулация (MWS)	Измерване	Отн. грешка $ \delta $ и грешка δ
$bw_{ S_{11} }$, %	27.61	26.94	$ \delta = 2.49\%$
$f_{0 S_{11} }$, GHz	11.900	12.250	$ \delta = 2.86\%$
bw_{AR} , %	4.7	4.0	$ \delta = 17.5\%$
f_{0AR} , GHz	12.696	12.745	$ \delta = 0.38\%$
G_{av} , dBic	10.46	9.56	$\delta = 0.9$ dBic
BRL_{max} , dB	-24.43	-21	$\delta = -3.43$ dB

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати при разработването на настоящия дисертационен труд дават основание да се заключи, че поставената цел и решаването на задачите за постигането ѝ са изпълнени. Извършените изследвания в дисертацията и получените резултати могат да се обобщат по следния начин:

1. Извършен е критичен анализ на състоянието на експерименталните, теоретичните и числените изследвания в областта на кръговополяризираните микролентови къси антени с обратно излъчване.
2. Разгледани са теоретичните и числените методи и модели за електродинамичен анализ на микролентови антени, в частност моделът на предавателната линия, резонаторният модел, методът на крайния брой разлики във времевата област и методът на крайния брой елементи.
3. Избрани са най-подходящите софтуерни продукти (в случая MWS 2010 и HFSS v.13) за извършването на числените изследвания на кръговополяризираните микролентови къси антени с обратно излъчване.
4. Предложена е нова компактна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гладък цилиндричен периферен екран с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики, за която е получен патент за изобретение от Патентното ведомство.
5. Извършен е параметричен анализ и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на антената с гладък цилиндричен периферен екран.
6. Извършено е сравнение на изследваната антена с размерите и електрическите характеристики на антени от този клас с въздушно запълване на резонаторния обем, което показва нейното предимството пред сравняваните антени.
7. Предложена е нова компактна малогабаритна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен с намалени геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.
8. Извършен е параметричен анализ, позволяващ определяне на влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на антената с гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен.
9. Извършено е сравнение на антената с гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен с размерите и електрическите характеристики на антена от този

клас без пръстен върху периферния екран, което показва нейното предимството пред антената без пръстен.

10. Предложена е нова компактна малобааритна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с два пръстена с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

11. Извършен е параметричен и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на антената с гофриран цилиндричен периферен екран с два пръстена.

12. Извършено е сравнение на антената с гофриран цилиндричен периферен екран с два пръстена с електрическите характеристики на антени от този клас без пръстени върху периферния екран и с един пръстен върху периферния екран, което показва нейното предимството пред сравняваните антени.

13. Предложена е нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и многослоен печатен цилиндричен периферен екран с намалени геометрични размери, добри механични качества и подобрени електрически характеристики, предназначена за използване като самостоятелна антена или като градивен елемент на сложни микролентови антенни решетки, за която е подадена заявка за патент за изобретение в Патентното ведомство, намираща се в производство.

14. Извършен е параметричен анализ и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на антената с многослоен печатен цилиндричен периферен екран.

15. Извършено е сравнение на антената с многослоен печатен цилиндричен периферен екран с електрическите характеристики на антени от този клас с плътен метален периферен екран, което показва нейното предимството пред сравняваните антени.

16. Изработени са антенни модели на две от изследваните симулационно антени – антената с гладък цилиндричен периферен екран и антената с многослоен печатен цилиндричен периферен екран.

17. Изследвана е експериментално нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гладък цилиндричен периферен екран с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

18. Извършено е сравнение между основните електрически характеристики и параметри на антената с гладък цилиндричен периферен екран, получени чрез

симулационно изследване и експериментално измерване, което показва добро съответствие между техните стойности.

19. Изследвана е експериментално нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и многослоен печатен цилиндричен периферен екран с намалени геометрични размери, добри механични качества и подобрени електрически характеристики, предназначена за използване като самостоятелна антена или като градивен елемент на сложни микролентови антенни решетки.

20. Извършено е сравнение между основните електрически характеристики и параметри на антената с многослоен печатен цилиндричен периферен екран, получени чрез симулационно изследване и експериментално измерване, при което е констатирано добро съответствие между техните стойности.

Някои възможни приложения на антените, изследвани в дисертационния труд

- В безжични комуникационни и други системи с високи изисквания по отношение на размерите, теглото и механичната устойчивост на използваните в тях антени;
- В спътникови радиоразпръсквателни системи;
- В спътникови системи за директно телевизионно приемане;
- В спътникови навигационни системи;
- В спътникови мрежи с фиксиран и мобилен достъп;
- В спътникови радио и телеметрични системи;
- В спътникови метеорологични системи;
- В спътникови любителски системи;
- В системите за радиочестотна идентификация;
- В съществуващите регионални, локални, градски и персонални комуникационно-информационни мрежи;
- В съществуващите GSM, UMTS, LTE и други наземни клетъчни и групови комуникационни мрежи;
- Като градивни елементи на сложни микровълнови антенни решетки;
- За специални и други цели.

Основни насоки на бъдещи изследвания в областта на кръговополяризираните микролентови къси антени с обратно излъчване

Настоящият дисертационен труд може да се разглежда само като начален етап от изследванията в областта на кръговополяризираните микролентови къси антени с обратно излъчване с процепно възбуждане и резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик. Бъдещите изследвания в тази интересна и пълна с предизвикателства за научни изследвания област могат да продължат в няколко насоки, от които на първо време ще отбележим следните три тематики:

1. Създаване на метод за теоретичен анализ на кръговополяризирани микролентови къси антени с обратно излъчване с процепно възбуждане и резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик;
2. Създаване и изследване на решетки от кръговополяризирани микролентови къси антени с обратно излъчване с процепно възбуждане и резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик с цел повишаване на коефициента на усилване на антенната система;
3. Създаване и изследване на решетки от кръговополяризирани микролентови къси антени с обратно излъчване с процепно възбуждане и резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик с последователно завъртане и дефазиране на антенните елементи с цел повишаване едновременно на коефициента на усилване и честотната лента на антенната система.

Благодарности

Извазвам благодарност към своя научен ръководител доц. д-р инж. Георги С. Киров и специално към гл. ас. д-р инж. Георги Ц. Червенков за особено ценната помощ, която ми оказваха през цялото време на разработването на дисертационния труд, както и към останалите колеги от катедрата и факултета в ТУ-Варна и компанията Itron Sweden AB – Стокхолм за съдействието и разбирането, което получавах от тях през този период.

ПРИНОСИ

на дисертационния труд

1. Научни приноси

1.1. Извършен е параметричен анализ и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на нова компактна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гладък цилиндричен периферен екран с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

1.2. Извършен е параметричен анализ и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на нова компактна малобабитна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен с намалени геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

1.3. Извършен е параметричен анализ и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на нова компактна малобабитна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с два пръстена с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

1.4. Извършен е параметричен анализ и е изследвано влиянието на антенните размери върху електрическите характеристики на нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и многослоен печатен цилиндричен периферен екран с намалени геометрични размери, добри механични качества и подобрени електрически характеристики, предназначена за използване като самостоятелна антена или като градивен елемент на сложни микролентови антенни решетки.

2. Научноприложни приноси

2.1. Предложена е нова компактна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гладък цилиндричен периферен

екран с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики, за която е получен патент за изобретение от Патентното ведомство.

2.2. Изследвана е експериментално нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гладък цилиндричен периферен екран с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

2.3. Предложена е нова компактна малобабитна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с един пръстен с намалени геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

2.4. Предложена е нова компактна малобабитна конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и гофриран цилиндричен периферен екран с два пръстена с минимални геометрични размери, добри механични качества и високи електрически характеристики.

2.5. Предложена е нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и многослоен печатен цилиндричен периферен екран с намалени геометрични размери, добри механични качества и подобрени електрически характеристики, предназначена за използване като самостоятелна антена или като градивен елемент на сложни микролентови антенни решетки, за която е подадена заявка за патент за изобретение в Патентното ведомство, намираща се в производство.

2.6. Изследвана е експериментално нова конструкция на кръговополяризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане с резонаторен обем, запълнен с твърд диелектрик, и многослоен печатен цилиндричен периферен екран с намалени геометрични размери, добри механични качества и подобрени електрически характеристики, предназначена за използване като самостоятелна антена или като градивен елемент на сложни микролентови антенни решетки, за която е подадена заявка за патент за изобретение в Патентното ведомство, намираща се в производство.

СПИСЪК

на публикациите по темата на дисертационния труд

I. Статии в рецензирани научни списания в чужбина

1. **Abdoula, K.** Circularly polarized aperture coupled microstrip short backfire antenna with two rings. *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology*, March–April 2017, vol. 8, no. 2, pp. 13–25.
2. **Abdoula, K.** Circularly polarized microstrip short backfire antenna with two ring corrugated rim. *International Journal of Engineering Science and Technology*, May 2017, vol. 9, no. 5, pp. 491–501.
3. **Abdoula, K.** Circularly polarized aperture coupled microstrip short backfire antenna with one ring. *International Journal of Computer Science*, May 2017, vol. 5, no. 5, pp. 1–12.
4. **Abdoula, K.** Radiation pattern of a circularly polarized microstrip short backfire antenna. *Advances in Research*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 1–9.

II. Статии в рецензирани научни списания, годишници и научни конференции в страната

5. **Abdoula, K.** Circularly polarized microstrip short backfire antennas. *Годишник на Техническия университет във Варна*, 2011, т. I, с. 110–114.
6. Kirov, G. S., G. T. Chervenkov, **K. K. Abdoula**. Some studies of circularly polarized microstrip short backfire antennas. *Трети международен научен конгрес 50 г. ТУ-Варна 04–06 окт. 2012*, Варна, т. II, с. 116–121.

III. Патенти и заявки за патенти

7. Киров, Г. С., Г. Ц. Червенков, **К. К. Абдула**. *Микролентова къса антена с обратно излъчване с кръгова поляризация*. Патент на Р. България No. 66 583/13.06.2017.
8. Червенков, Г. Ц., **К. К. Абдула**. *Кръгово поляризирана микролентова къса антена с обратно излъчване с многослоен печатен периферен екран*. Заявка за патент за изобретение рег. No. 111 567/04.09.2013, публ. в

Study of Circularly Polarized Microstrip Short Backfire Antennas

Kawa Karim Abdoula

A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy

(Abstract)

The circularly polarized microstrip short backfire antennas are potential candidate for participation in contemporary mobile terrestrial and satellite communications. The interest to this class of antennas is due to their reduced size and weight and high mechanical and electrical performance. The subjects of the thesis are circularly polarized aperture coupled microstrip short backfire antennas (CP ACMSSBFAs) with dielectric-filled cavity and different rims.

The aim of the thesis is to design, analyze, and experimentally study several constructions of CP ACMSSBFAs with dielectric-filled cavity and different rims. The use of dielectric substrates with high values (between 4.10 and 6.15) of dielectric constant in the cavity reduces the dimensions and improves mechanical characteristics of the antennas. The volume of proposed and studied antennas is reduced between 2.8 and 3.9 times in comparison with antennas of the same class filled with air. The aperture coupled feed technique allows an independent optimization of the feeding and radiating part of antennas and assures their high performance. The proposed and investigated antennas surpass in maximum specific gain G_{max}/V between 1.8 and 3.5 times antennas of the same class filled with air. The frequency bandwidth of proposed and studied antennas ranges from 2.07 to 4.70% versus around 1% for conventional CP microstrip short backfire antenna. In order to obtain a good impedance matching between the open resonant cavity and the free space a nonhomogeneous dielectric filling is employed. The four investigated CP ACMSSBFAs with dielectric-filled cavity are: an antenna with a smooth cylindrical rim (a conventional rim), an antenna with a corrugated cylindrical rim with one ring, an antenna with a corrugated cylindrical rim with two rings, and an antenna with a printed cylindrical rim.

The parametric analysis was performed by numerical simulation using two electromagnetic field simulation packages – MWS 2010 and HFSS v.13. The effect of antenna dimensions on five electrical characteristics – the return loss, the axial ratio, the gain, the back radiation level, and the radiation efficiency was studied.

Two antennas – the antenna with a smooth cylindrical rim and the antenna with a printed cylindrical rim were fabricated and experimentally investigated. Five electrical characteristics of these antennas – the return loss, the axial ratio, the gain, the back radiation level, and the copolarization and crosspolarization radiation patterns are

measured in an anechoic chamber. The obtained results show a good agreement between the simulated investigations and the experimental measurements.

The investigated antennas can find application as single antennas or as elements of complex antenna arrays in mobile and fixed communication systems.