

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



**ПРОЈЕКТОВАЊЕ ДИСК АНТЕНЕ ЗА БЕЖИЧНИ  
ИНТЕРНЕТ У ОПСЕГУ 2,4-2,5 GHz**

Мастер рад

Ментор:

др Слободан Савић, ванредни професор

Кандидат:

Лазар Јовановић 3191/2020

Београд, октобар 2021.

# САДРЖАЈ

САДРЖАЈ .....	I
<b>1. УВОД.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ТЕОРИЈСКА ОСНОВА И ПРОЦЕС РАЧУНАРСКОГ МОДЕЛОВАЊА АНТЕНЕ.....</b>	<b>3</b>
2.1. ОСНОВНА КОНСТРУКЦИЈА ЈАГИ АНТЕНЕ.....	3
2.2. ОСНОВНА КОНСТРУКЦИЈА НАСЛАГАНЕ МИКРОТРАКАСТЕ АНТЕНЕ.....	4
2.3. ДИСК АНТЕНА.....	8
2.4. СОФТВЕРСКА РЕАЛИЗАЦИЈА ДИСК АНТЕНЕ.....	9
2.4.1. <i>Анализа у програмском пакету WIPL-D</i> .....	10
2.4.2. <i>Анализа у програмском пакету HFSS</i> .....	38
<b>3. ИЗРАДА ПРОТОТИПА И ЊЕГОВО МЕРЕЊЕ .....</b>	<b>44</b>
3.1. ПРОЦЕС ИЗРАДЕ ПРОТОТИПА.....	44
3.2. МЕРЕЊЕ КОЕФИЦИЈЕНАТА РЕФЛЕКСИЈЕ.....	44
3.3. МЕРЕЊЕ КОЕФИЦИЈЕНАТА ТРАНСМИСИЈЕ И ФОРМИРАЊЕ ДИЈАГРАМА ЗРАЧЕЊА.....	46
<b>4. ЗАКЉУЧАК.....</b>	<b>53</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>54</b>
<b>СПИСАК СКРАЋЕНИЦА .....</b>	<b>56</b>
<b>СПИСАК СЛИКА.....</b>	<b>57</b>

# 1. УВОД

Антиена је уређај који може да ствара и прима електромагнетске таласе. Антиене могу бити пасивни или активни уређаји или делови који у склопу са одређеним електронским уређајима (нпр. радарским одашиљачима или пријемницима) претвара примењену електромагнетску енергију у електромагнетни талас или обрнуто [1]. Најбољи ефекат зрачења се постиже у фреквенцијском опсегу за који је та антиена намењена. Са тим у виду, антиене се могу поделити на ускопојасне (резонантне), које раде у веома специфичном (најчешће веома уском) опсегу учестаности и широкопојасне. Облик, конструкција и сами габарити антиене зависе од намене коју антиена има, као и од опсега таласних дужина за коју је антиена предвиђена [2].

Као увод, у овом параграфу ће бити наведени основни параметри и појмови везани за антиене:

- Поларизација антиене је опис криве коју у времену описује врх вектора електричног поља које антиена зрачи, односно за који је антиена подешена да прима, када се она напаја простопериодичним сигналом. Поларизација може бити линеарна (хоризонтална, вертикална или коса) или елиптичка (посебан облик елиптичке поларизације је кружна). Најбољи пренос сигнала се постиже за исти тип поларизације антиене на предајној и пријемној страни.
- Дијаграм зрачења описује расподелу густине енергије на површи замишљене сфере (у далекој зони зрачења) [3]. На основу њега могу се одредити смерови у којима антиена максимално зрачи (примарни лобови зрачења).
- Ширина главног снопа се обично узима да је угао у Е- или Н-равни око правца максималног зрачења у коме усмереност антиене опадне за 10 dB у односу на максимум усмерености, која садржи главни правац зрачења. То је угао који карактерише главни снап зрачења и представља угао (око правца максималног зрачења) за који интензитет зрачења опадне за 3 dB (односно на једну половину своје максималне вредности), односно угао за који максимална вредност електричног поља опадне  $\sqrt{2}$  пута ( $E = 0.707E_{max}$ ). [3]
- Директивност или коефицијент усмерености је величина која карактерише упереност дијаграма зрачења антиене. Дефинише се као [3]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\text{Интензитет зрачења у посматраном правцу}}{\text{Средња вредност интензитета зрачења}} \quad (1.1)$$

- Добитак антиене се дефинише као однос интензитета зрачења антиене у неком правцу, према максималном зрачењу референтне антиене, под условом да се оне напајају сигналом исте снаге,  $P_0$  [3].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{\text{Интензитет зрачења посматране антиене}}{\text{Интензитет зрачења референтне антиене}}, P_0 = P_{0ref} \quad (1.2)$$

- Потискивање секундарних лобова је однос интензитета зрачења у смеру максималног зрачења и интензитета зрачења у смеру максимума посматраног бочног лоба [3].

Антиена која је испројектована у оквиру овога рада је Јаги-Уда антиена, познатија и под називом Јаги антиена, како ће и бити називана у даљем тексту. Први пут је направљена 1926. године од стране јапанског научника Шинтара Уде са Тохоку универзитета у Јапану, уз помоћ свог колеге Хидетсу Јагија. Иако је Удин допринос био већи, Јаги је патентирао ову антиену, па је временом остало само име Јаги. Антиена је своју прву велику употребну вредност стекла у Другом Светском рату у оквиру радарских система од стране тадашњих великих сила (Јапан, Немачка, Сједињене Америчке Државе и Велика Британија) [4-6]. После рата, овај тип антиене је масовно коришћен за пријем сигнала за телевизију, па се до увођења оптичке телевизије ова антиена могла видети на крововима кућа у појединим домаћинствима.

За потребе дизајна и анализе ове антиене у оквиру овог рада коришћени су програмски пакети *WIPL-D Pro v17* [7] и *Ansys HFSS v15* [8]. У њима су направљени модели антиена и извршене симулације при којима су добијени сви потребни параметри. За додатну проверу и верификацију резултата, коришћен је и програмски пакет *NI AWR Microwave Office (MWO) v13* [9]. За потребе цртања графика и слика, коришћени су програмски пакети *MATLAB* [10], *GNU Octave* [11], као и програмски пакет *Inkscape* [12]. За потребе мерења антиене, коришћен је анализатор мрежа *Agilent N5227A* [13]. Мерење коефицијента рефлексije обављено је у Лабораторији за основе електротехнике (соба 95а) Електротехничког факултета Универзитета у Београду, док је мерење (нормализованог) дијаграма зрачења антиене обављено у делимично анехоичној соби у оквиру Лабораторије за антиене и простирање (соба 63) на истом факултету.

Рад је подељен у четири поглавља. У првом поглављу кратко је описана конструкција антиене и теоријска основа на којој се базира читава анализа. У другом поглављу биће детаљно приказана конструкција антиене у програмским пакетима *WIPL-D Pro v17* и *Ansys HFSS v15*. У трећем поглављу биће описан процес прављења и мерења антиене у лабораторији. У четвртном поглављу су сумирани резултати и изведени су закључци.

## 2. ТЕОРИЈСКА ОСНОВА И ПРОЦЕС РАЧУНАРСКОГ МОДЕЛОВАЊА АНТЕНЕ

### 2.1. Основна конструкција Јаги антене

Основна конструкција Јаги антене се састоји из неколико паралелних танких елемената, налик на шипке дужине око половине таласне дужине, који су подупрети једним носачем, који је најчешће нормалан на њих.

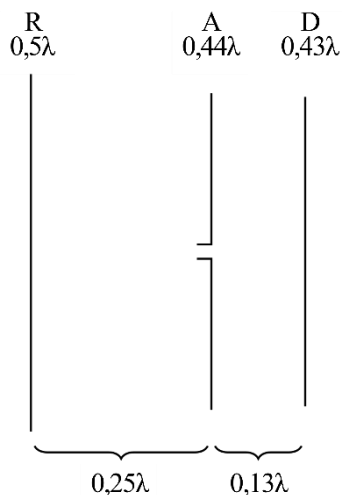
Основни елемент Јаги антене је напајани елемент (енг. *feed element*). Такође, Јаги антена се састоји од одређеног броја паразитних елемената, односно елемената који се не напајају директно из генератора, већ паразитно, путем електромагнетске спреге. Постоје два типа паразитних елемената. Рефлектор, који је обавезан елемент сваке Јаги антене, налази се иза напајаног елемента и служи као нека врста баријере између напајаног елемента и дела простора иза антене. Други тип паразитних елемената су директори. Да би антена била сматрана Јаги антеном, потребно је да садржи минимално један директор. Остали директори су опциони, и они, као што ће бити показано, до одређеног броја побољшавају перформансе антене, али и повећавају комплексност самог склопа. Паразитни елементи су пасивни радијатори, јер нису директно напајани из генератора, али активно учествују у модификацији дијаграма зрачења (повећавања добитка антене и усмеравање главног снопа зрачења у жељеном смеру), као и генералном побољшању перформанси антене [14]. На слици 2.1.1 [15] приказан је основни изглед Јаги антене.



Слика 2.1.1. Основна конструкција Јаги антене.

Типична растојања између елемената Јаги антене износе између једне десетине и једне четвртине таласне дужине, у зависности од примене антене. Типично су директорски елементи краћи од напајаног елемента, док је напајани елемент краћи од рефлекторског елемента. Дијаграм зрачења Јаги антене је унидирекциони, дуж осе носача и у смеру од

рефлектора ка директорима. Између носача, директора и рефлектора Јаги антене најчешће се поставља изолатор, тако да носач својим присуством не утиче значајно на дијаграм зрачења и остале перформансе Јаги антене. Напајани елемент се напаја у центру, па је приликом његовог монтирања потребно изоловати обе његове половине при носачу [16]. Неке стандардне вредности растојања између елемената, као и величине елемената, приказане су на слици 2.1.2, при чему "R" означава рефлектор, "A" означава активно напајани елемент, а "D" директор. Уз те ознаке наведена је и дужина тих елемената изражена у таласним дужинама ( $\lambda$ ).

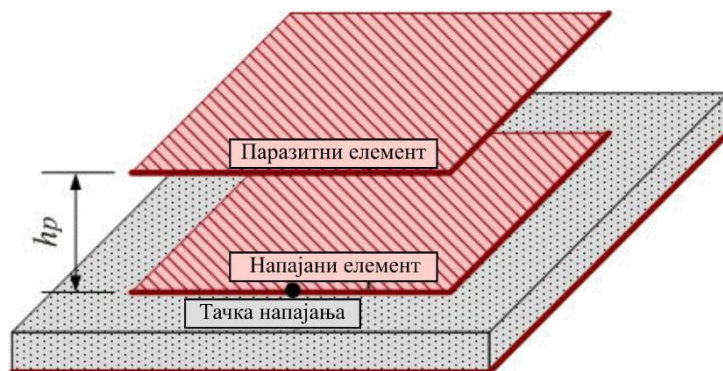


Слика 2.1.2. Типично растојање између елемената и типични габарити елемената.

Добитак антене расте са бројем употребљених директора, али не линеарно и практично само до одређеног броја директора. Самим тим уколико није потребан неки одређен добитак, обично треба направити компромис између броја директора и добитка који оквирно треба постићи [17]. Добитак антене се практично не повећава додавањем додатних рефлектора, па се зато у пракси готово увек поставља само један рефлектор [18]. Пропусни опсег Јаги антене је, по дефиницији, скуп фреквенција при којима антена има коефицијент рефлексије мањи од  $-10$  dB. Јаги антене у основном облику, без додатних кола за прилагођење, су у том смислу релативно ускопојасне антене, са пропусним опсегом од свега 2-3% централне учестаности. Као и код сваке антене, постоји компромис између пропусног опсега и добитка, а то значи да се са повећавањем броја директора који се користи повећава и добитак, али се смањује пропусни опсег [18].

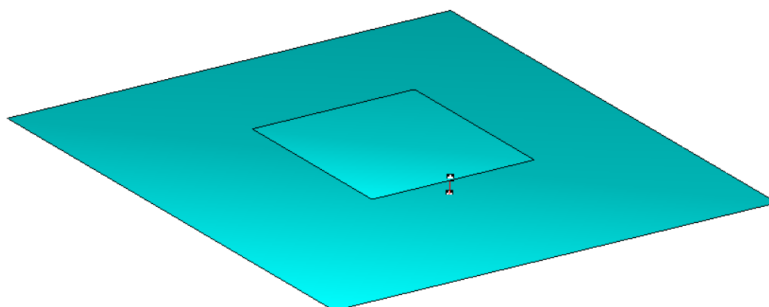
## 2.2. Основна конструкција наслагане микротракасте антене

Наслагана микротракаста антена (енг. *stacked patch antenna*), је основни тип антене од које се кренуло пре израде диск антене. Наслагана микротракаста антена се састоји из две или више стандардних микротракастих антена одвојених танким слојем диелектричног супстрата. При томе се прва (доња) микротракаста антена напаја на неки од стандардних начина, а свака следећа (горња) микротракаста антена се напаја посредством електромагнетске спреге. Пример изгледа наслагане микротракасте антене приказан је на слици 2.2.1.

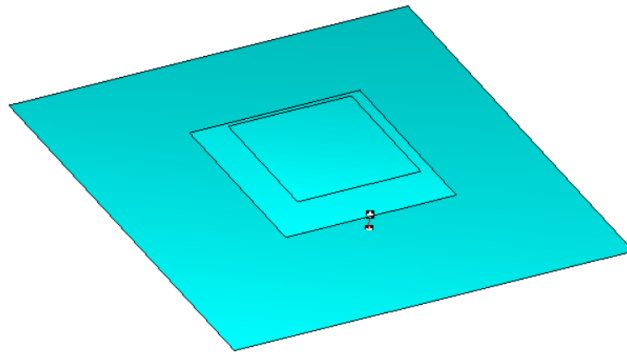


Слика 2.2.1. Основни дизајн наслагане микротракасте антене са три проводника.

У овом раду полазни модел биће наслагана микротракаста антена са два квадратна проводника. Доњи проводник представља део проводне равни, а горњи проводник представљају микротракасту антену. Изглед основног модела класичне микротракасте антене приказан је на слици 2.2.2. Иако се наслагане микротракасте антене најчешће праве на супстратима чије се електричне особине разликују од особина ваздуха, у овом раду за диелектрик је коришћен ваздух, што ће одговарати ситуацији код диск антене, за чију основу рада ће се искористити наслагана микротракаста антена. Други модел, приказан на слици 2.2.3, представља модел наслагане микротракасте антене. У том моделу постоје три проводника. Прва два проводника (са доње стране) су иста као код претходног модела, и чине класичну микротракасту антену. Трећи проводник побуђује се електромагнетском спрегом, слично попут директора код Јаги антене и он заједно са класичном микротракастом антенном (која се налази испод њега) чини наслагану микротракасту антену.



Слика 2.2.2. Приказ класичне микротракасте антене у програмском пакету *WIPL-D*.

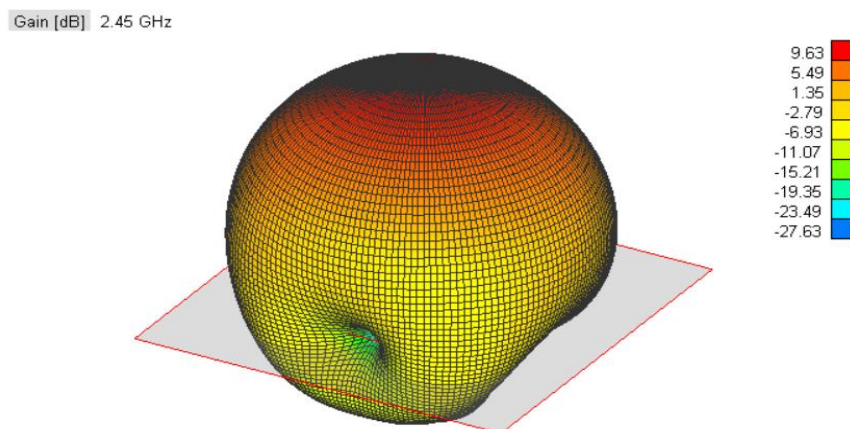


Слика 2.2.3. Приказ наслагане микротракасте антене са три проводника у програмском пакету WIPL-D.

Ради лакшег рада унутар програмског пакета *WIPL-D*, уведене су променљиве које описују класичну и наслагану микротракасту антену:

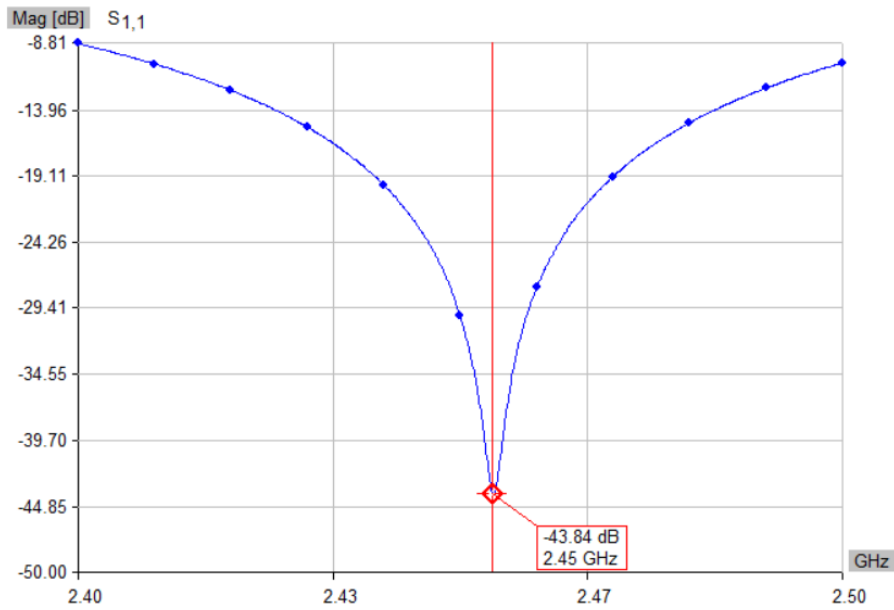
- $a_0$  – дужина странице рефлектора.
- $a_1$  – дужина странице напајаног елемента.
- $a_2$  – дужина странице паразитног елемента (само за наслагану микротракасту антену).
- $d_{01}$  – растојање између рефлектора и напајаног елемента.
- $d_{12}$  – растојање између напајаног и паразитног елемента (само за наслагану микротракасту антену).
- $x_{son}$  – растојање центра коаксијалног вода за напајање од средишта напајаног елемента.

На слици 2.2.1, са  $h_p$  означено је растојање између напајаног и паразитног проводника, што је у нашој анализи слично растојању између напајаног елемента и првог директора диск антене. У програмском пакету *WIPL-D* анализирана су претходна два модела. На наредним сликама приказани су резултати симулација оптимизованих модела ових антена (кофицијент рефлексије и дијаграм зрачења):



Слика 2.2.4. Дијаграм зрачења класичне микротракасте антене.

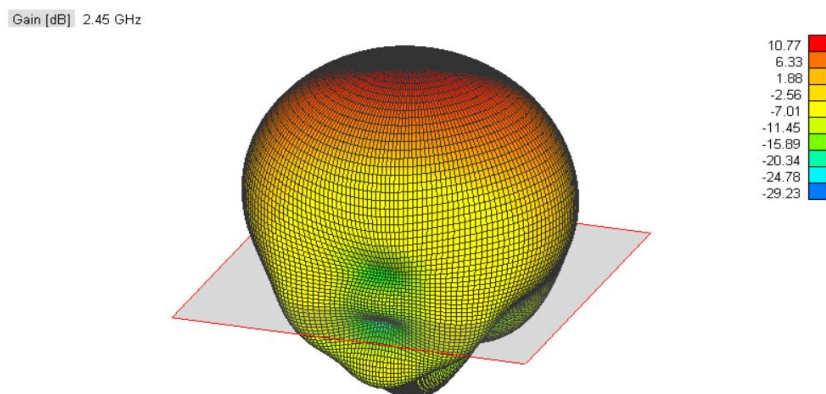




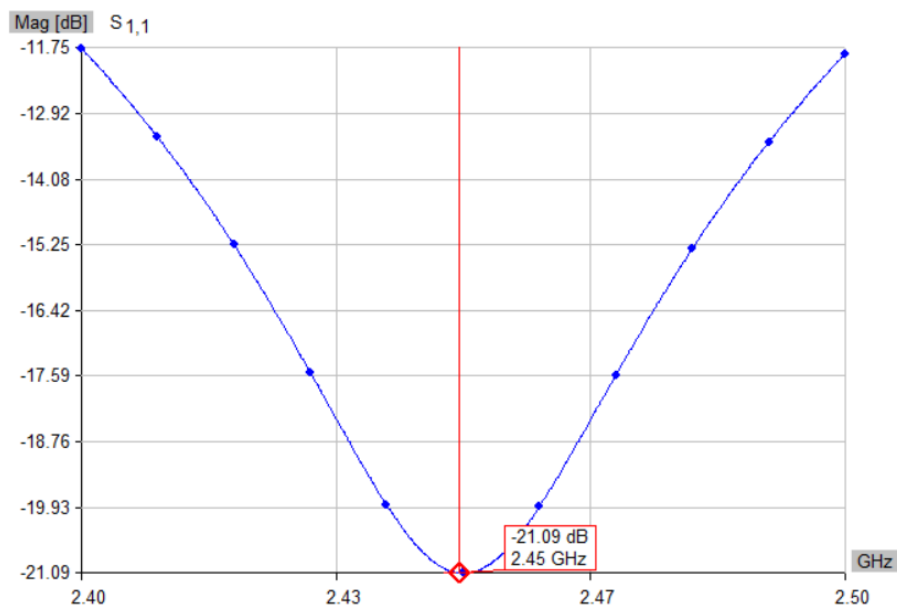
Слика 2.2.5. Коэффициент рефлексии классичне микротракасте антене.

Symbols		
	Symbol	
1	4.02046	d01=4.02046e+000
2	53.8369	a0=5.38369e+001
3	30.2345	a1=3.02345e+001
4	27	a2=27
5	0.1	rw=0.1
6	16.8427	xson=1.68427e+001

Слика 2.2.6. Димензије классичне микротракасте антене након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.



Слика 2.2.7. Дијаграм зрачења наслагане микротракасте антене са три проводника.



Слика 2.2.8. Коэффициент рефлексije наслагане микротракасте антене са три проводника.

Symbols		
	Symbol	
1	5.94875	d01=5.94875e+000
2	5.25173	d12=5.25173e+000
3	88.2797	a0=8.82797e+001
4	28.9688	a1=2.89688e+001
5	20.069	a2=2.00690e+001
6	0.1	rw=0.1
7	26.1815	xson=2.61815e+001

Слика 2.2.9. Димензије наслагане микротракасте антене са три проводника након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.

Са претходних слика се може закључити да је додаток паразитног елемента допринео повећању добитка по цену повећања коефицијента рефлексije, што је резултат који је очекиван. Модел наслагане микротракасте антене са три проводника узет је као почетна тачка за формирање диск антене.

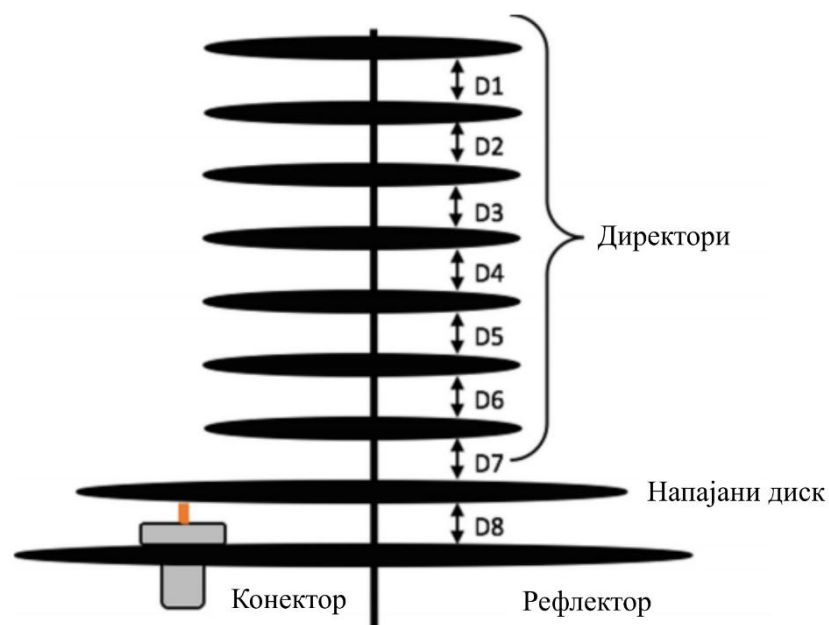
### 2.3. Диск антена

У претходним одељцима, дати су прикази основне конструкције Јаги антене и микротракасте антене са паразитним елементима (налагане микротракасте антене). Ту се могло видети да је основни облик било ког елемента Јаги антене дипол антена. Како је тема овог рада унапређење класичног модела Јаги антене и наслагане микротракасте антене, у овом одељку ће бити приказана конструкција једне такве антене, али са дисковима као основним елементима, чија основа лежи у наслаганој микротракастој антени. Модел диск

антене није пронађен у литератури, већ је су за основу узети концепти са разних канала “радио аматера”.

Диск антена користи бакарне прстенове као основне конструктивне елементе. Како је код обичне јаги антене параметар елемента био његова дужина, код диска ће еквивалентан параметар бити полупречник спољашњег дела диска. Дискони су монтирани на дугачак вијак и причвршћени су завртњима за основу.

Антена која је конструисана са дисковима има пар предности у односу на класичну Јаги антену. Једна од предности је та што је антена механички робуснија и самим тим боље подноси физичке услове након монтирања (ветар, киша, итд.). Друга предност је та што се елементи антене доста лакше повезују, јер су довољни обични завртњи за причвршћавање за основу. Једина предност која се односи на сам принцип рада антене, је што су због свог облика корисне за учестаности преко 1 GHz, па је за потребе рада са бежичним интернетом она доста добар избор. На слици 2.3.1 приказан је основни концепт конструкције Јаги диск антене.



Слика 2.3.1. Основни принцип конструкције диск антене.

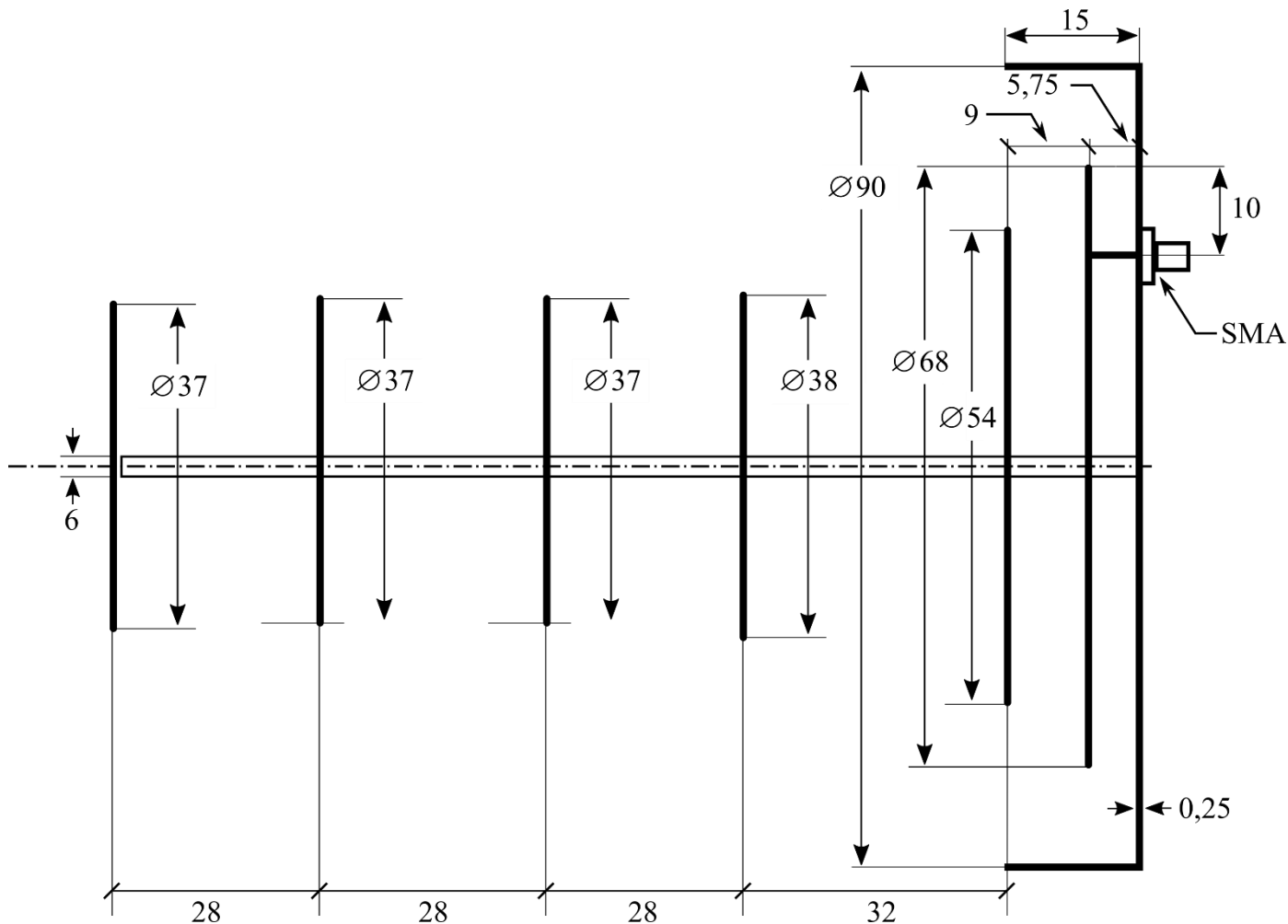
Са слике 2.3.1 се може уочити још једна разлика у односу на стандардну антену, а то је да се напајани елемент не напаја у центру, односно носачу, већ преко конектора постављеног ван осе носача. Положај конектора ће бити један од параметара који је веома битан за исправан рад и њему ће, поред самих димензија и растојања између дискова, бити посвећена подједнака количина пажње.

## 2.4. Софтверска реализација диск антене

Као што је напоменуто у уводу, за рачунарско моделовање диск антене коришћени су софтвери *WIPL-D Pro v17* и *Ansys HFSS v15*. Користећи се основном једначином између радне учестаности и таласне дужине:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.3.1)$$

где је  $c$  брзина светлости у вакууму, а  $f$  радна учестаност, која износи 2,45 GHz, добија се да је таласна дужина за *Wi-Fi* опсег учестаност око  $\lambda = 122,45 \text{ mm}$ . Коришћењем већ познатих стандардних димензија антене и генералним теоријским концептом везаним за Јаги антене и микроталасне антене са паразитним зрачећим елементима, почетни полупречници дискова и растојања између њих су приказани на слици 2.4.1.



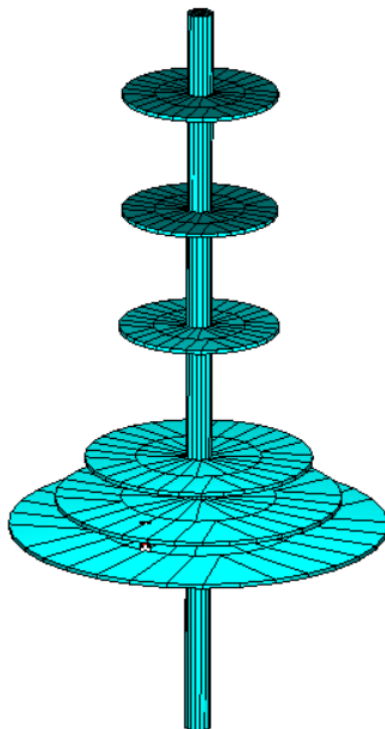
Слика 2.4.1 Почетни дизајн диск антене. Све димензије су у милиметрима.

Једина разлика у односу на модел са слике 2.3.1 и правог почетног дизајна у оквиру овог рада је та што је, да би реализација била једноставнија, рефлектор облика шоље замењен обичним диск рефлектором. Пошто резултат симулације није био познат унапред, као ни колико додавање додатних директора утиче на перформансе антене, у програмском пакету *WIPL-D Pro v17* су формиран и оптимизовани модели ових антена за број директора између 3 и 10. У програмском пакету *Ansys HFSS v15* додатно је формиран само онај модел за који је одлучено да ће се изградити, а све са циљем додатне верификације резултата нумеричких симулација пре израде самог прототипа.

#### 2.4.1. Анализа у програмском пакету *WIPL-D*

У овом делу биће дат осврт на детаљан процес конструкције и оптимизације добитка и коефицијента рефлексије диск антене. На слици 2.4.1.1 приказан је модел диск антене са 3 директора. Оно што је заједничко за све моделе је да се у број директора не урачунава први

директор. Између дискова и металног носача нема изолације, тако да је целокупна антена једно проводно тело.



Слика 2.4.1.1. Приказ модела диск антене са 3 директора у пакету *WIPL-D*.

Ради лакшег рада у оквиру софтвера, уведене су променљиве које описују антену, а које се између осталог односе на полупречнике дискова, растојања између дискова, и положај сонде:

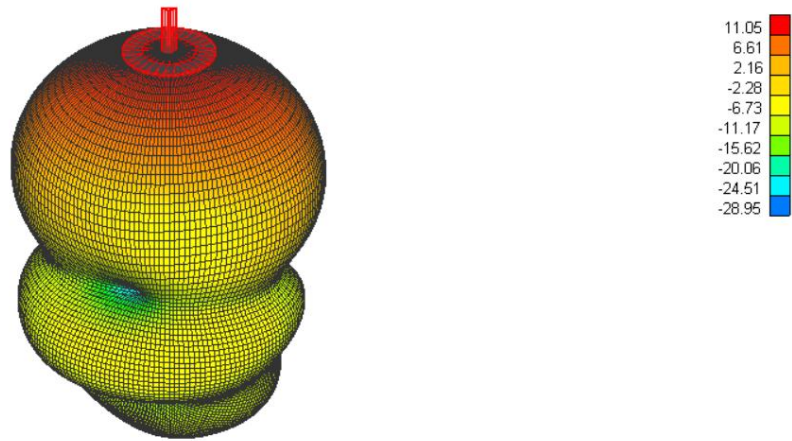
- $r_0$  – полупречник рефлектора.
- $r_1$  – полупречник напајаног диска.
- $r_2$  – полупречник првог директора.
- $r_3$  – полупречник другог директора.
- $r_4$  – полупречник свих осталих директора (за случајеве када је  $n_{директора} > 3$ ).
- $n$  – број директора (укључујући други, али не и први директор).
- $d_{01}$  – растојање између рефлектора и напајаног елемента.
- $d_{12}$  – растојање између напајаног елемента и првог директора.
- $d_{23}$  – растојање између првог и другог директора.
- $d_{34}$  – растојање између другог и трећег и између свака наредна два директора.
- $x_{сон}$  – растојање центра коаксијалног вода за напајање од осе носача.

Све координате које се тичу самих положаја елемената су задаване параметарски, у функцији горе наведених параметара.

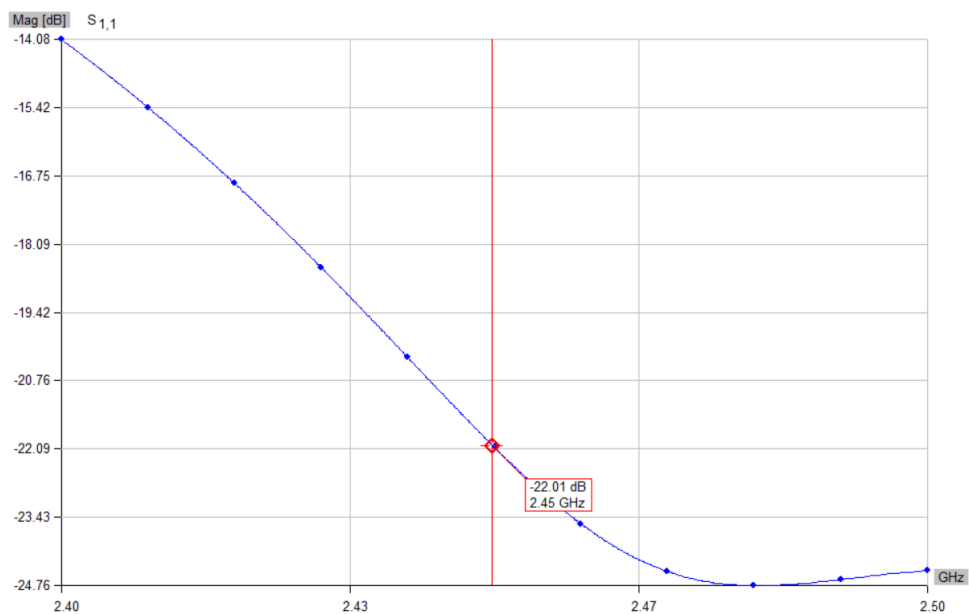
Анализа је извршена у опсегу од 2,4 GHz до 2,5 GHz у 11 еквидистантних фреквенцијских тачака. У оквиру тог опсега, симулирана су два главна параметра. Први параметар је добитак антене. Претпостављено је да у оквиру задатог опсега усмереност неће пуно зависити од радне учестаности, а како је то показано и симулацијом, у оквиру овог рада ће бити приложен само резултат на централној учестаности, односно на 2,45 GHz. Други параметар је коефицијент рефлексије (параметар  $s_{11}$ ), у децибелима, који нам говори колики део инцидентног таласа се преда антени. Тај нам параметар практично говори, колико добро је антена прилагођена, у овом случају на генератор карактеристичне импедансе 50  $\Omega$ . Генерално важи да што је тај параметар у децибелима мањи, прилагођење је боље, јер је самим тим и рефлексија мања.

Утврђено је да би за овај тип антене, у овом опсегу, задовољавајуће квалитетан резултат био да  $s_{11}$  параметар буде мањи од  $-10$  dB у читавом опсегу учестаности, тако да је то резултат коме ће се приликом оптимизације и тежити. На наредним сликама, биће приложени резултати основне симулације, пре самог процеса оптимизације:

Gain [dB] 2.45 GHz

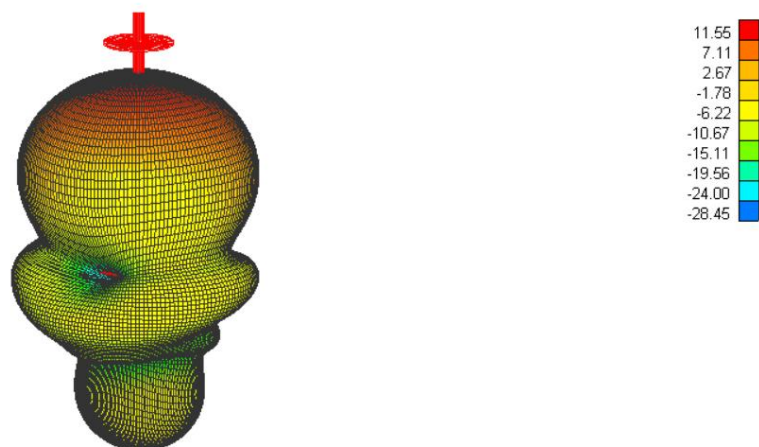


Слика 2.4.1.2. Дијаграм зрачења антене са 3 директора на централној учестаности, пре оптимизације.

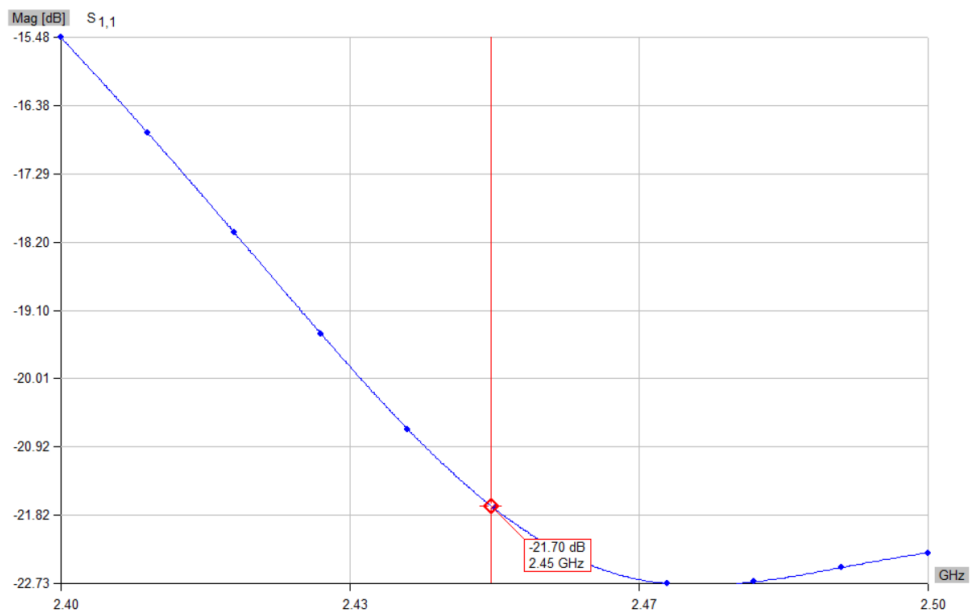


Слика 2.4.1.3. Коэффициент рефлексije за антену са 3 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz

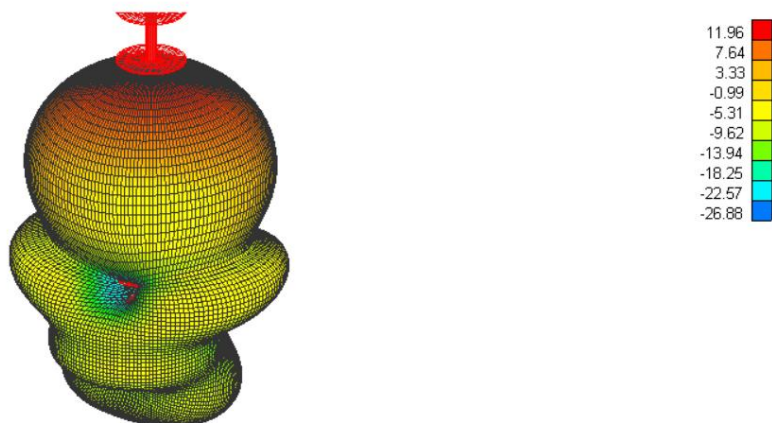


Слика 2.4.1.4. Дијаграм зрачења антене са 4 директора на централној учестаности, пре оптимизације.



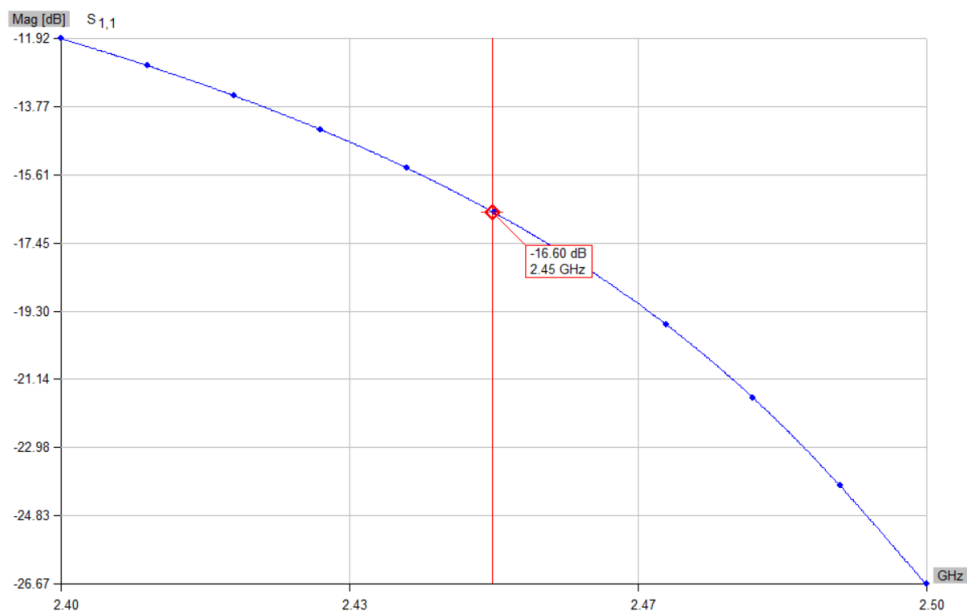
Слика 2.4.1.5. Коefицијент рефлексије за антену са 4 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz



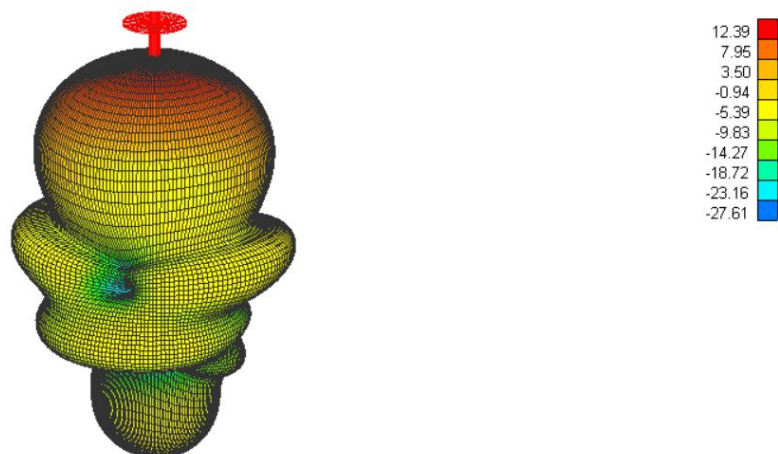
Слика 2.4.1.6. Дијаграм зрачења антене са 5 директора на централној учестаности, пре оптимизације.



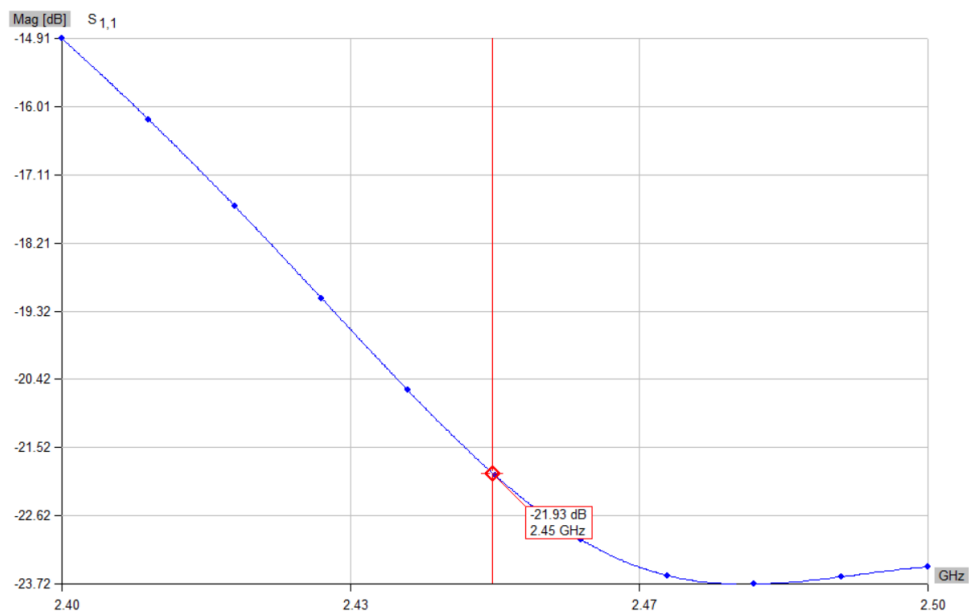


Слика 2.4.1.7. Коefицијент рефлексије за антену са 5 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz

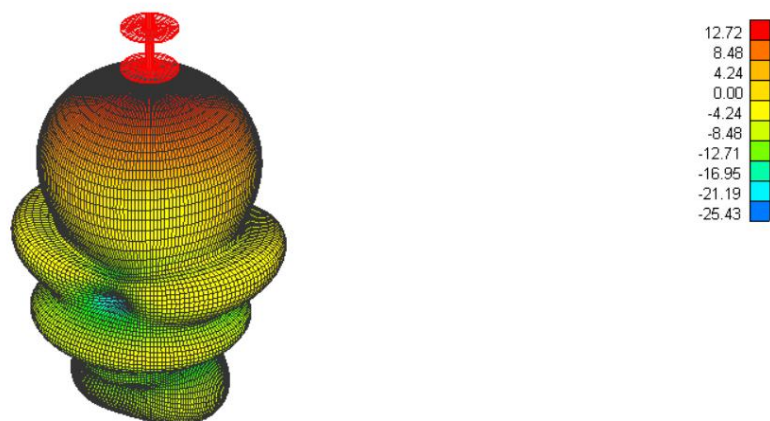


Слика 2.4.1.8. Дијаграм зрачења антене са 6 директора на централној учестаности, пре оптимизације.

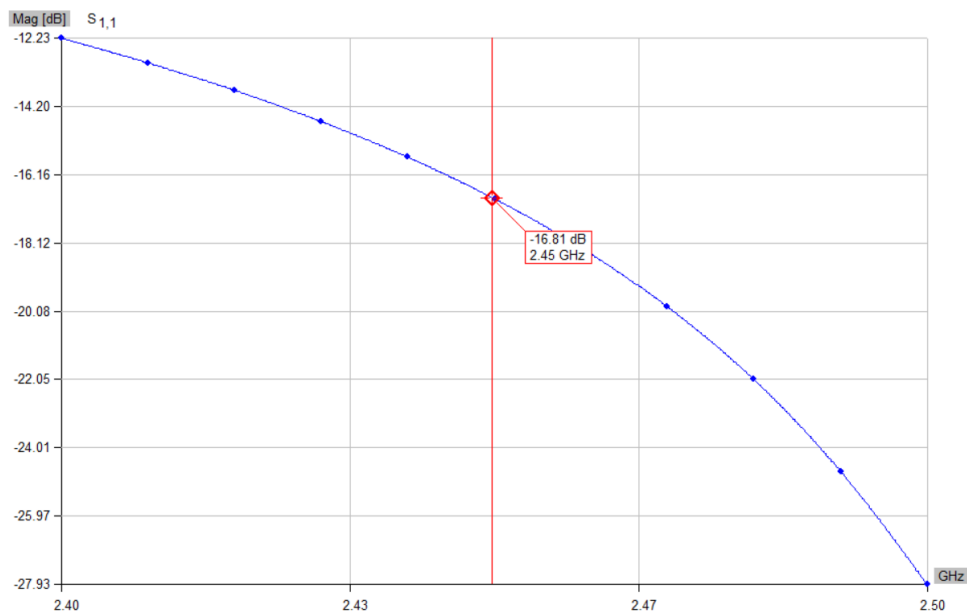


Слика 2.4.1.9. Коэффициент рефлексije за антену са 6 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz

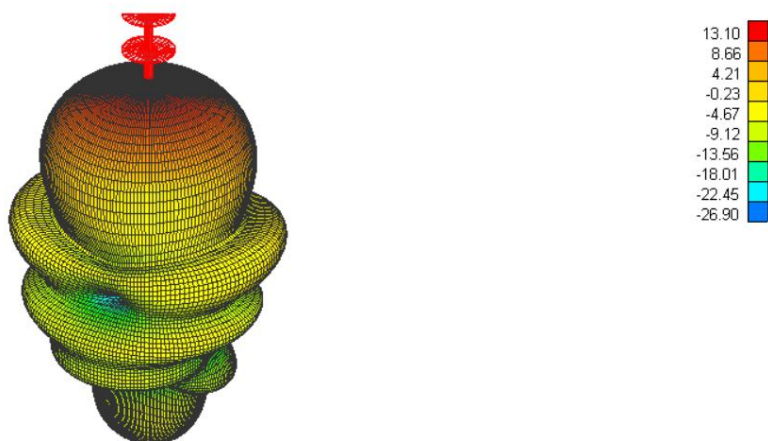


Слика 2.4.1.10. Дијаграм зрачења антене са 7 директора на централној учестаности, пре оптимизације.

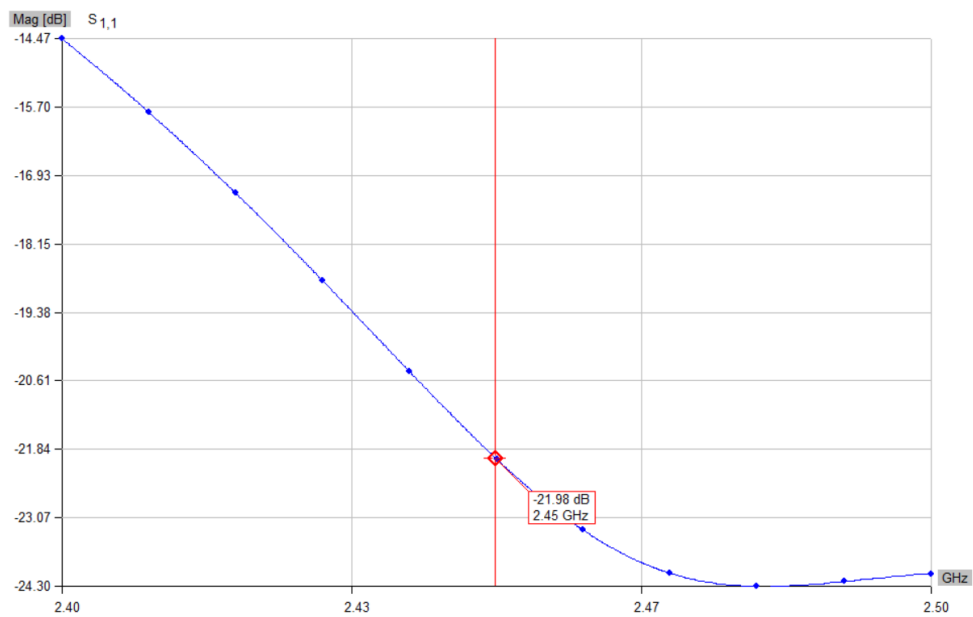


Слика 2.4.1.11. Коefицијент рефлeксије за антeну са 7 директoра у посматраном опсегу учeстаности, прe оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz

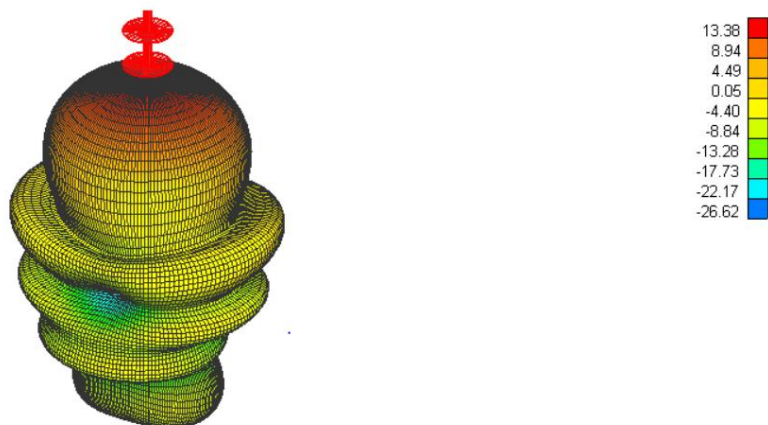


Слика 2.4.1.12. Дијаграм зрачења антeне са 8 директoра на централној учeстаности, прe оптимизације.

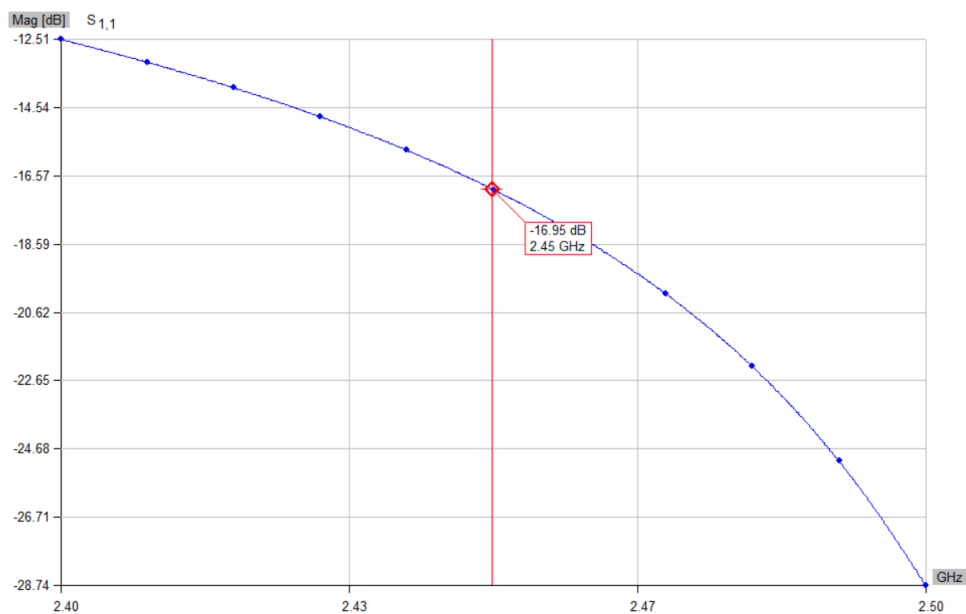


Слика 2.4.1.13. Коefицијент рефлексије за антену са 8 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz

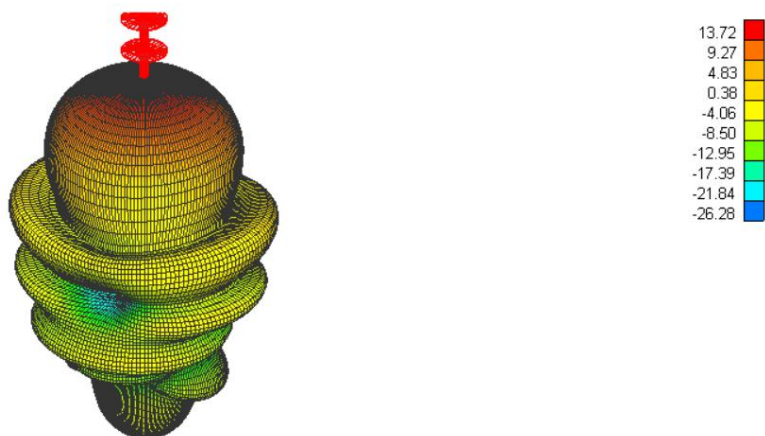


Слика 2.4.1.14. Дијаграм зрачења антене са 9 директора на централној учестаности, пре оптимизације.

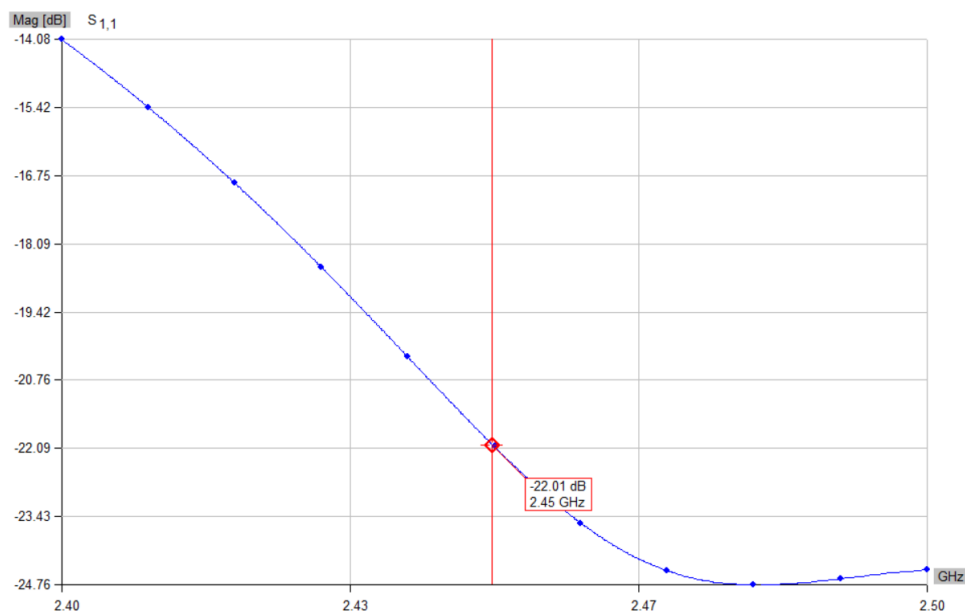


Слика 2.4.1.15. Коefицијент рефлeксије за антeну са 9 директoра у посматраном опсегу учeстаности, прe оптимизације.

Gain [dB] 2.45 GHz

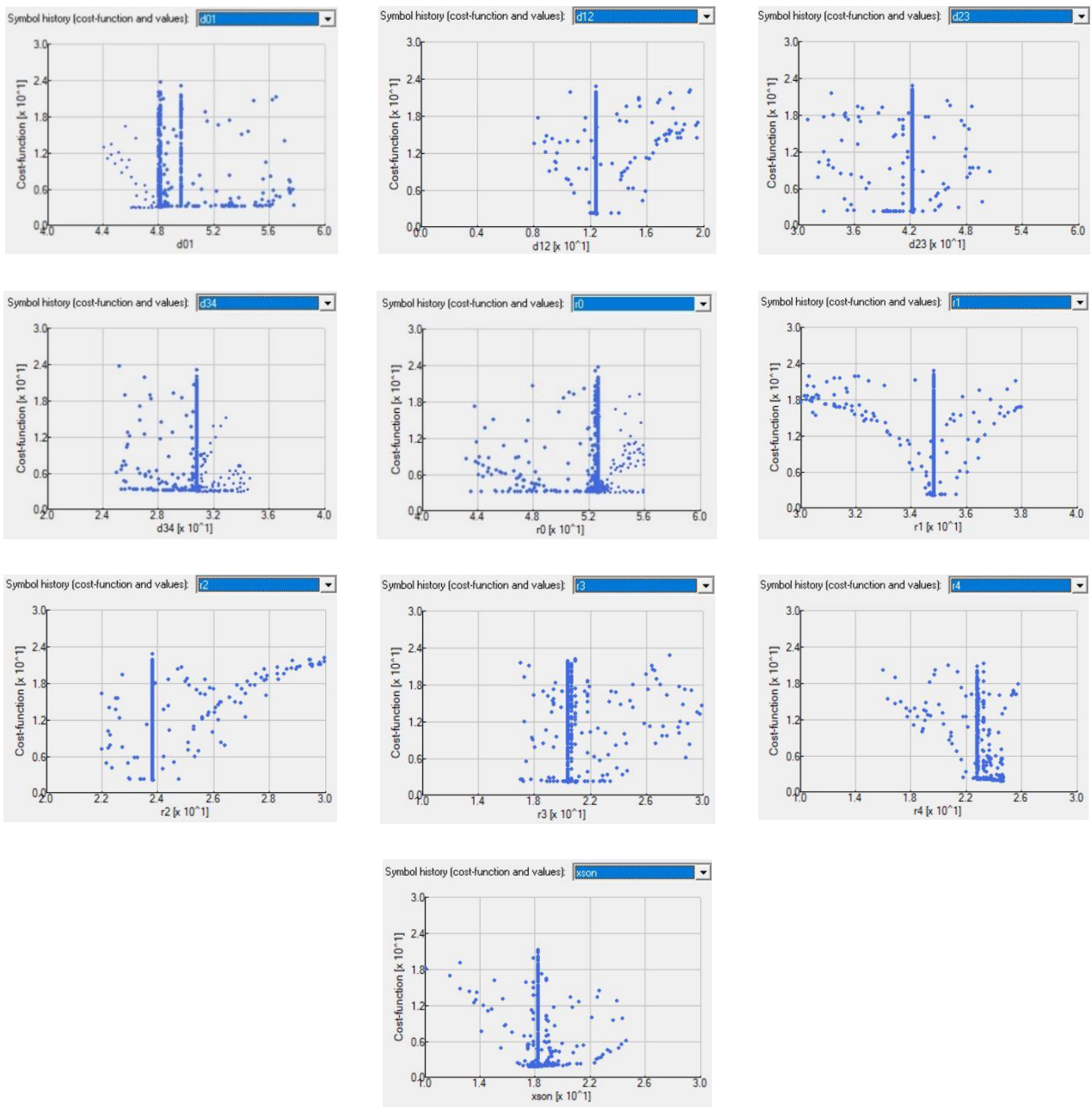


Слика 2.4.1.16. Дијаграм зрачења антeне са 10 директoра на централној учeстаности, прe оптимизације.



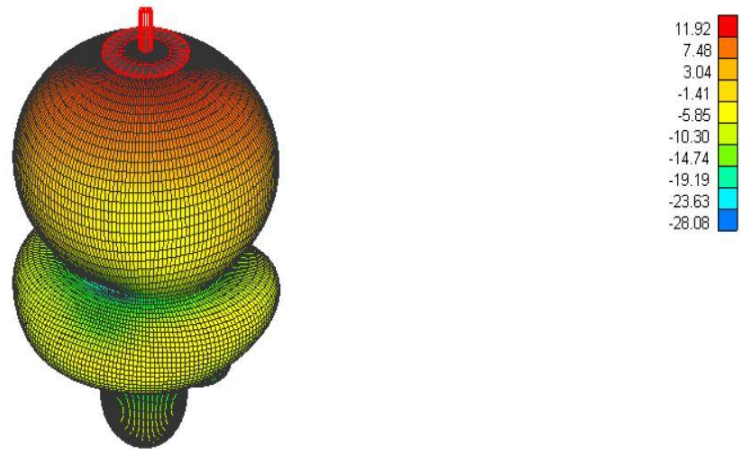
Слика 2.4.1.17. Коefицијент рефлексије за антену са 10 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.

Са слика 2.4.1.2 – 2.4.1.17 може се видети да основни модел, пре процеса оптимизације, даје резултате који су у складу са теоријски очекиваним резултатима. Овај модел се може оптимизовати тако да се добије већа усмереност и боље прилагођење антене. Оптимизација у програмском пакету *WIPL-D* извршена је применом два оптимизациона алгорита. Први је генетички алгоритам [19], који се базира на укрштању резултата из претходне итерације и добијању бољих резултата у свакој наредној, при чему се најбољи резултат увек памти. Тај алгоритам је погодан у проблемима који садрже већи број променљивих, па самим тим скрађује време потребно да се дође до жељеног решења. Други коришћени алгоритам оптимизације је градијентни алгоритам [20], који даје изузетно тачно решење уколико добије улазне податке које су већ близу најбољег решења. Суштински, градијентни алгоритам је алгоритам који проналази локалну екстремну вредност. Опсези променљивих приликом оптимизације бирани су на такав начин да се приликом процеса конвергенције алгоритма вредност ка којој алгоритам конвергира нађе на средини опсега. Другим речима, границе су сматране успешно одабраним уколико алгоритам конвергира са обе стране ка својој оптималној вредности. Није потребно да се та вредност нађе у центру опсега, већ је то идеалан случај. Такође, границе су сматране неуспешно одабраним уколико се при процесу конвергенције график тока оптимизације групише уз једну од граничних вредности задатог опсега. Због чињенице да генетички алгоритам има релативно слабу поновљивост за релативно мали број итерација (као што је у овој ситуацији и случај), оптимизација је била урађена више пута за сваки од случајева, да би на неки начин могао бити извучен податак о томе које би биле оптималне границе за сваку променљиву. Као главни услов оптимизације, односно жељена вредност коefицијента рефлексије и добитка, узето је да буде  $|S_{11}| < -15 \text{ dB}$  и  $G > 15 \text{ dB}$ , у смеру главног правца зрачења, при чему је захтев био да ови услови буду испуњени искључиво на централној учестаности, односно  $f = 2,45 \text{ GHz}$ . Оба услова су задата са истим тежинским коefицијентом, односно од софтвера је било захтевано да оба услова испуни истовремено, без фаворизовања иједног од њих, уколико је то могуће. Резултати након оптимизације, као и токови свих оптимизационих процеса, приказани су на наредним сликама.

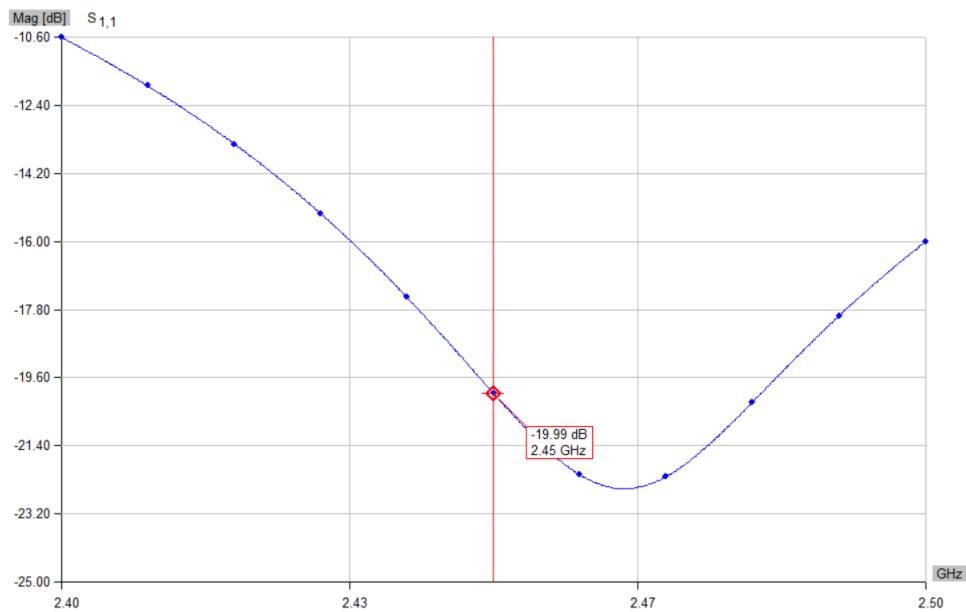


Слике 2.4.1.18. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 3 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



Слика 2.4.1.19. Дијаграм зрачења антене са 3 директора на централној учестаности.

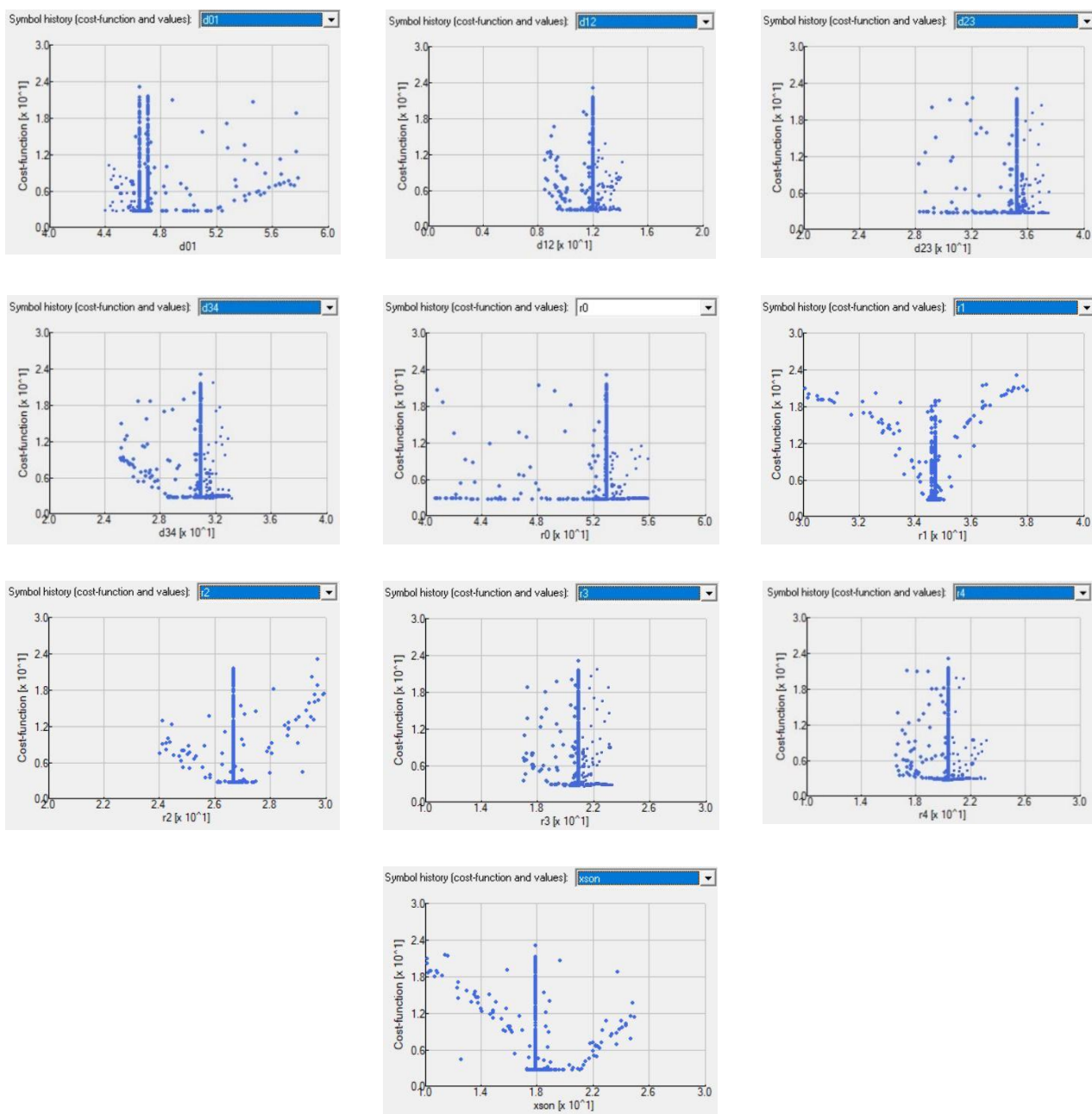


Слика 2.4.1.20. Коэффициент рефлексиие за антену са 3 директора у посматраном опсегу учестаности.

	Symbol
1	52.7664 r0=5.27664e+001
2	33.2377 r1=3.32377e+001
3	24.5382 r2=2.45382e+001
4	20.9554 r3=2.09554e+001
5	20.4949 r4=2.04949e+001
6	4.80793 d01=4.80793e+000
7	10.9863 d12=1.09863e+001
8	35.442 d23=3.54420e+001
9	30.979 d34=3.09790e+001
10	19.3135 xson=1.93135e+001

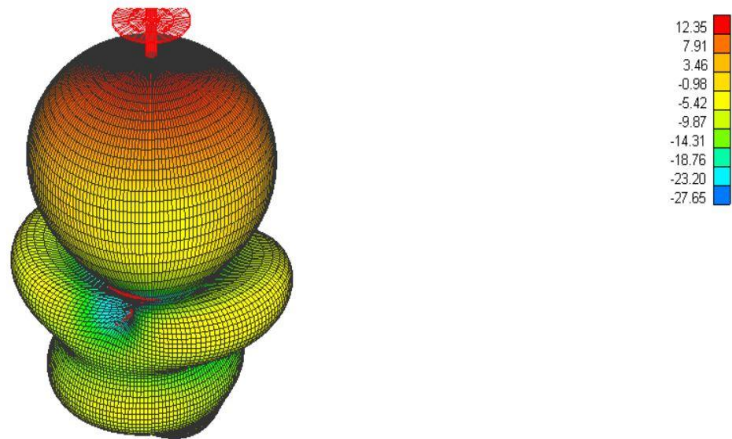
Слика 2.4.1.21. Димензије антене са 3 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.



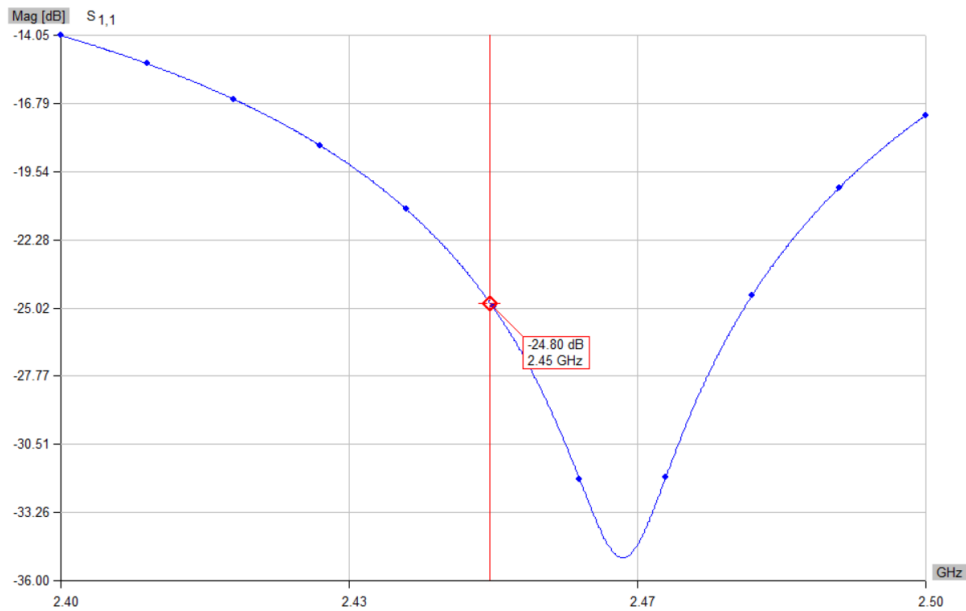


Слике 2.4.1.22. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 4 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



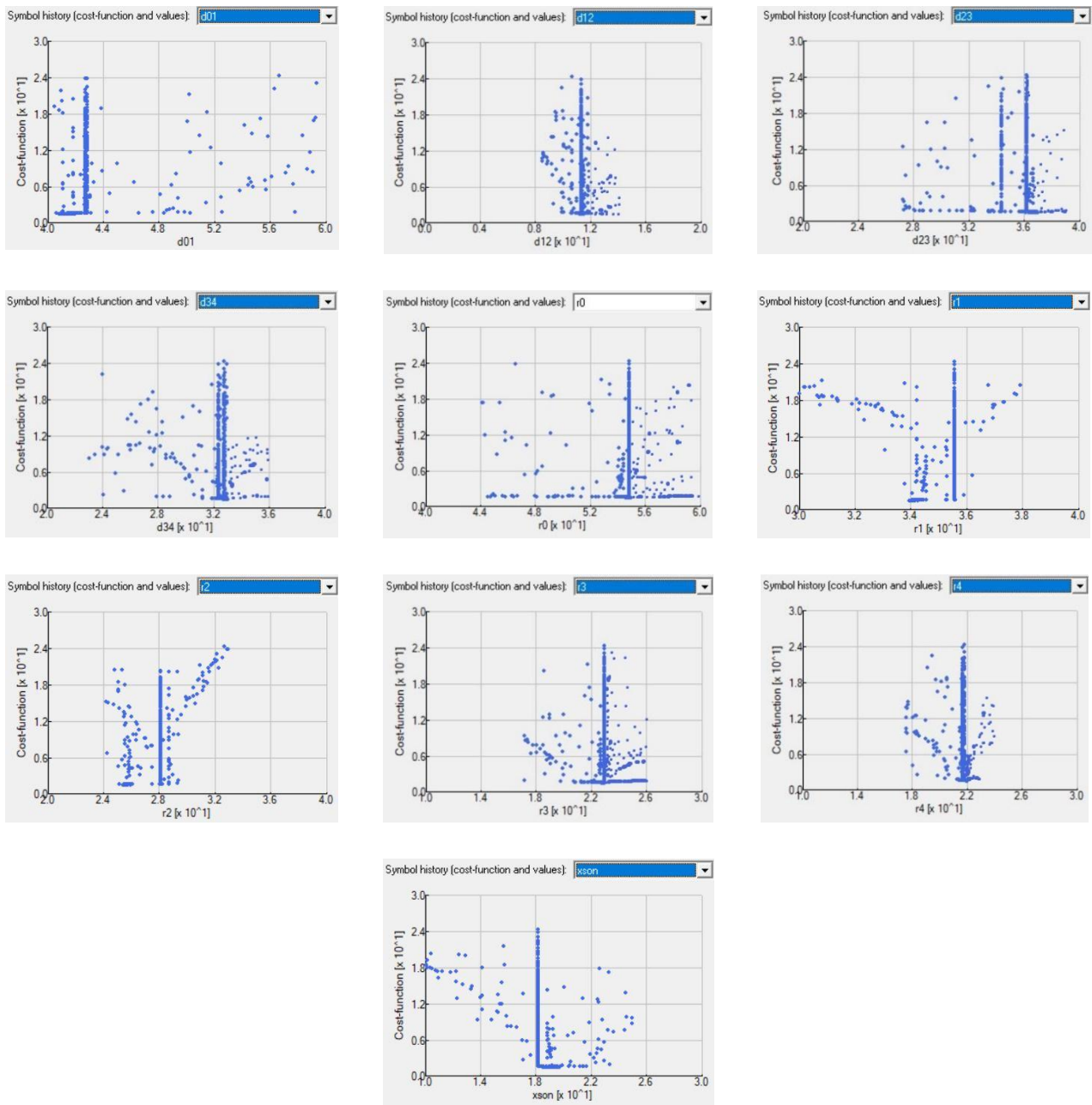
Слика 2.4.1.23. Дијаграм зрачења антене са 4 директора на централној учестаности.



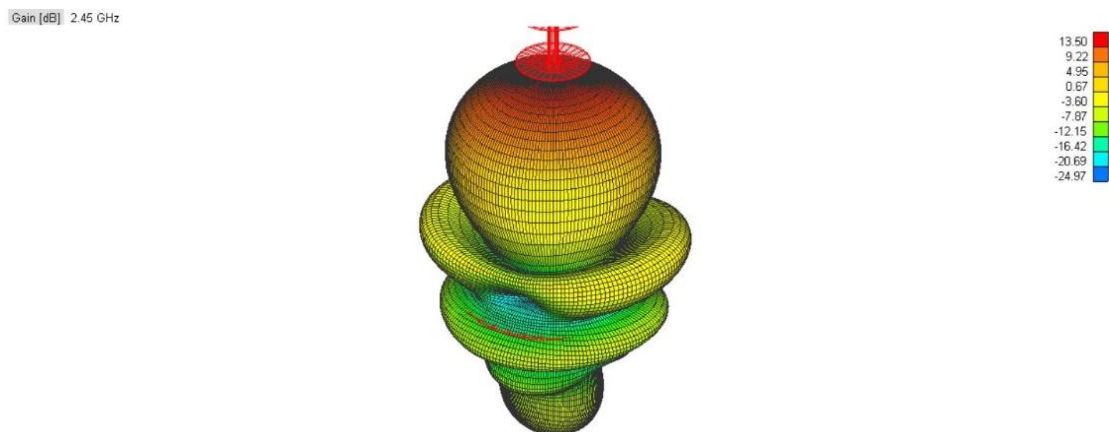
Слика 2.4.1.24. Коэффициент рефлексии за антену са 4 директора у посматраном опсегу учестаности.

Symbols		
	Symbol	
1	52.7705	r0=5.27705e+001
2	34.4579	r1=3.44579e+001
3	26.6159	r2=2.66159e+001
4	20.9961	r3=2.09961e+001
5	20.4943	r4=2.04943e+001
6	4.60534	d01=4.60534e+000
7	11.9789	d12=1.19789e+001
8	35.4724	d23=3.54724e+001
9	30.978	d34=3.09780e+001
10	17.4975	xson=1.74975e+001

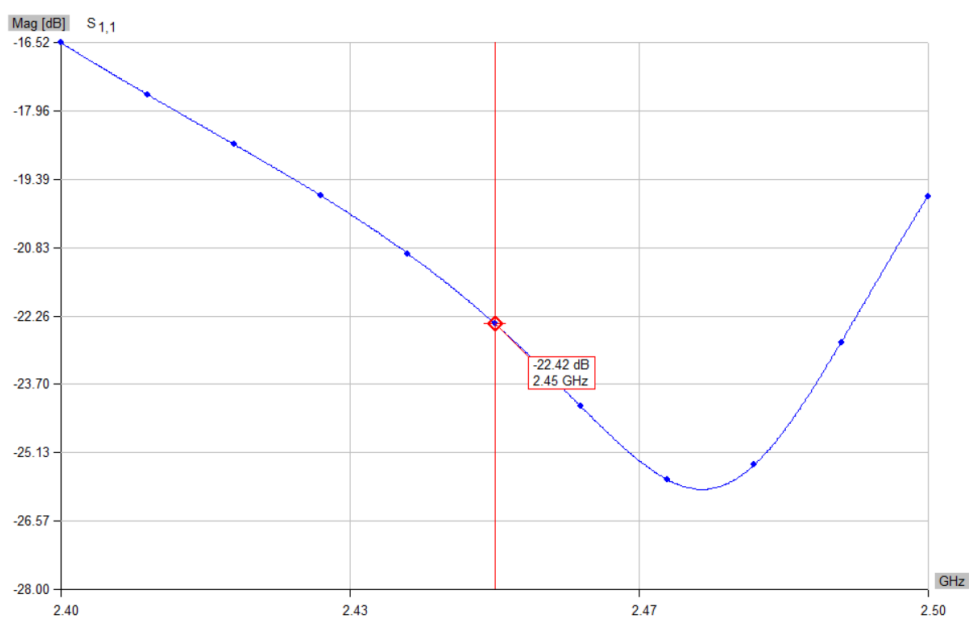
Слика 2.4.1.25. Димензије антене са 4 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.



Слике 2.4.1.26. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 5 директора.



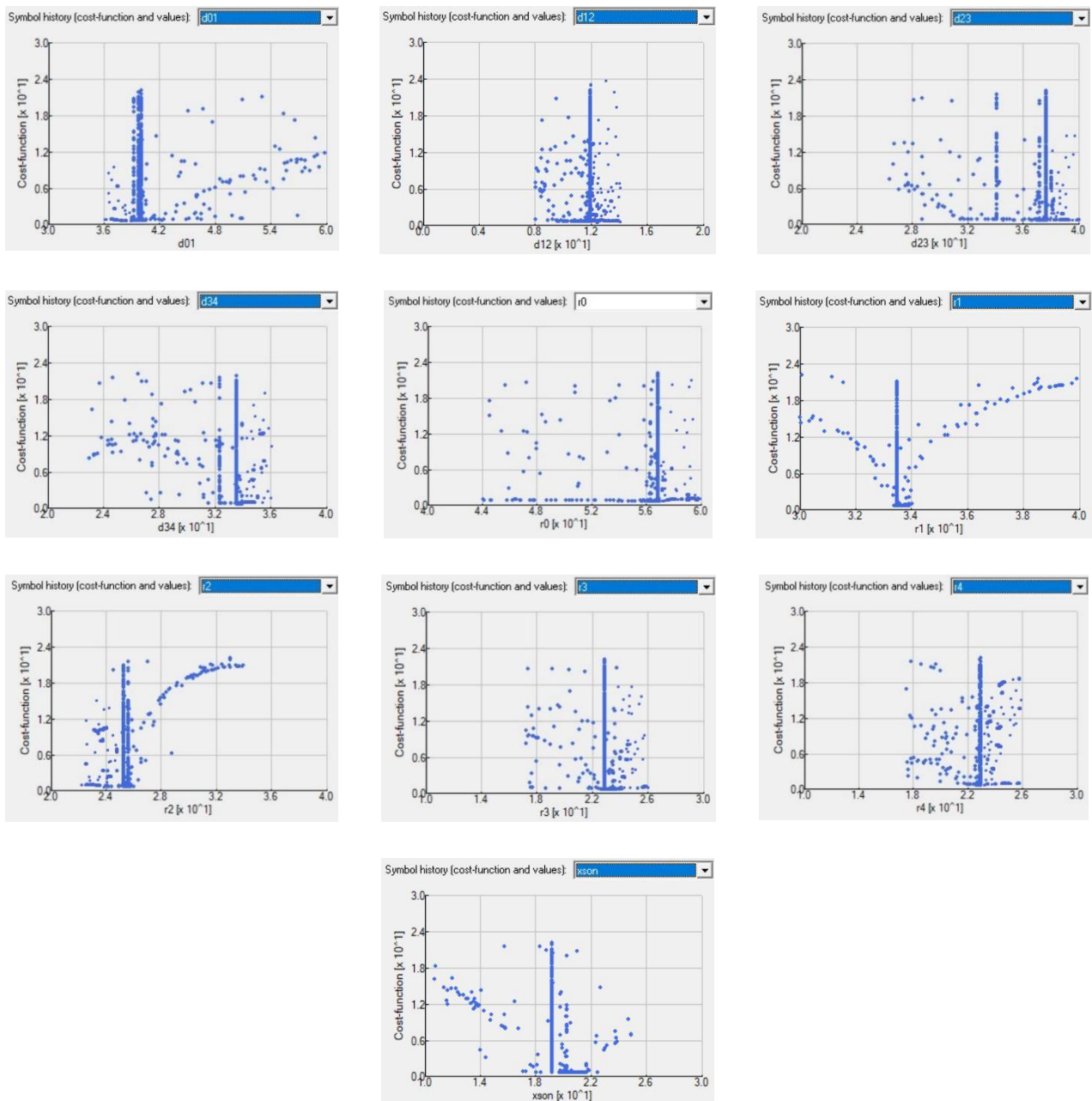
Слика 2.4.1.27. Дијаграм зрачења антене са 5 директора на централној учестаности.



Слика 2.4.1.28. Коefицијент рефлексије за антену са 5 директора у посматраном опсегу учестаности.

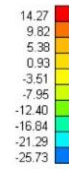
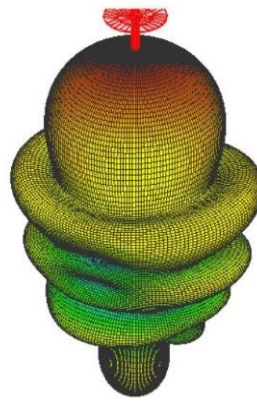
Symbols		
		Symbol
1	54.9297	r0=5.49297e+001
2	34.0451	r1=3.40451e+001
3	25.4903	r2=2.54903e+001
4	22.9191	r3=2.29191e+001
5	21.9803	r4=2.19803e+001
6	4.09938	d01=4.09938e+000
7	11.3916	d12=1.13916e+001
8	36.9673	d23=3.69673e+001
9	32.9336	d34=3.29336e+001
10	19.6974	xson=1.96974e+001

Слика 2.4.1.29. Димензије антене са 5 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.

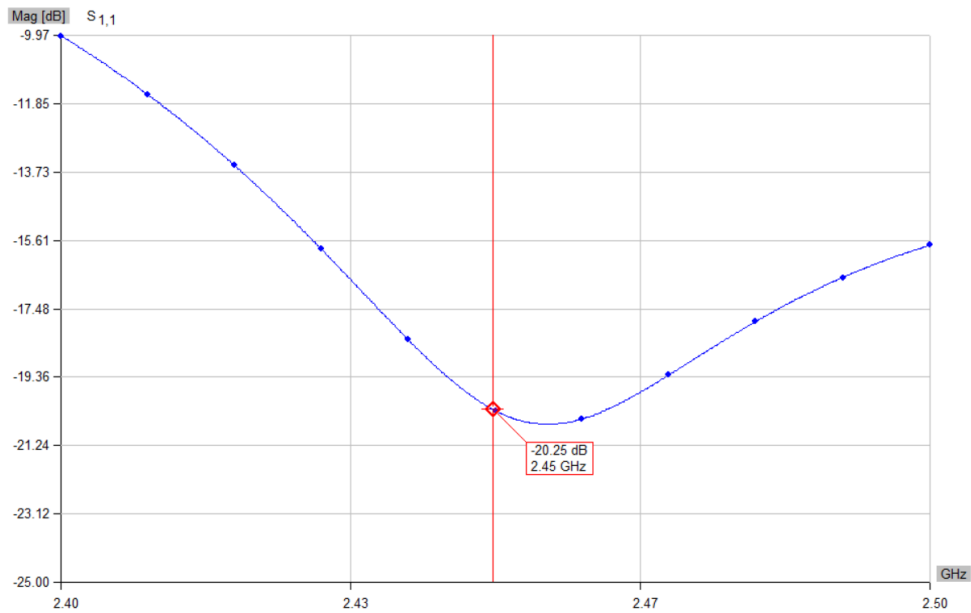


Слике 2.4.1.30. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 6 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



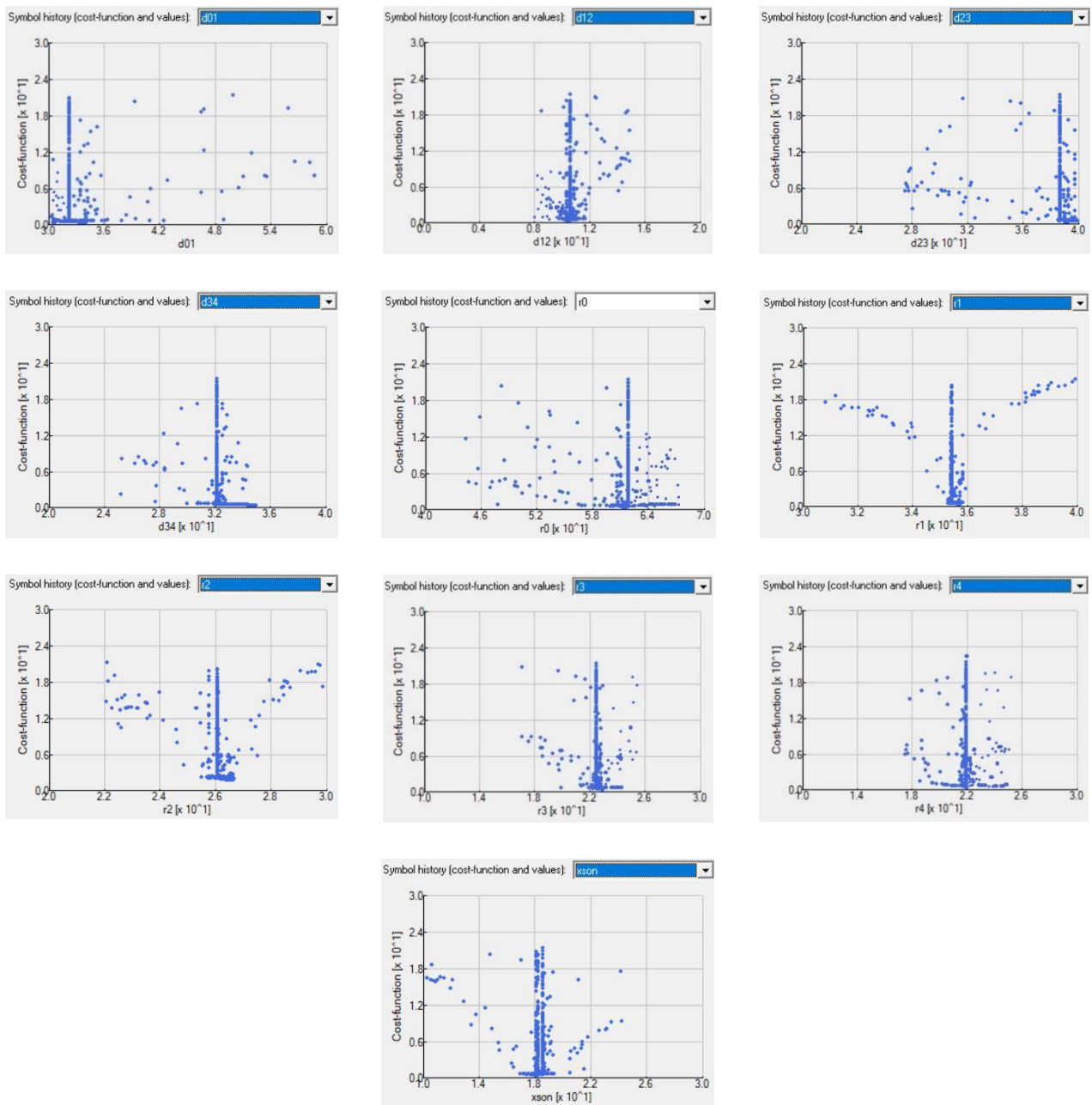
Слика 2.4.1.31. Дијаграм зрачења антене са 6 директора на централној учестаности.



Слика 2.4.1.32. Коэффициент рефлексиие за антену са 6 директора у посматраном опсегу учестаности.

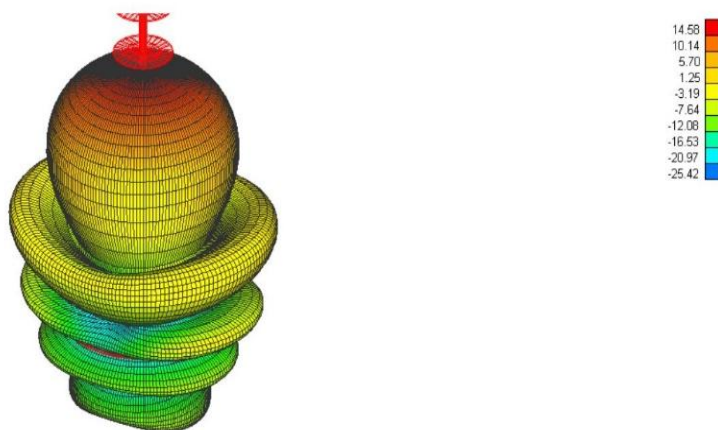
	Symbol
1	56.9343 r0=5.69343e+001
2	33.558 r1=3.35580e+001
3	25.6668 r2=2.56668e+001
4	23.4294 r3=2.34294e+001
5	22.7038 r4=2.27038e+001
6	3.90038 d01=3.90038e+000
7	11.7359 d12=1.17359e+001
8	37.5818 d23=3.75818e+001
9	33.9389 d34=3.39389e+001
10	21.5381 xson=2.15381e+001

Слика 2.4.1.33. Димензије антене са 6 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.

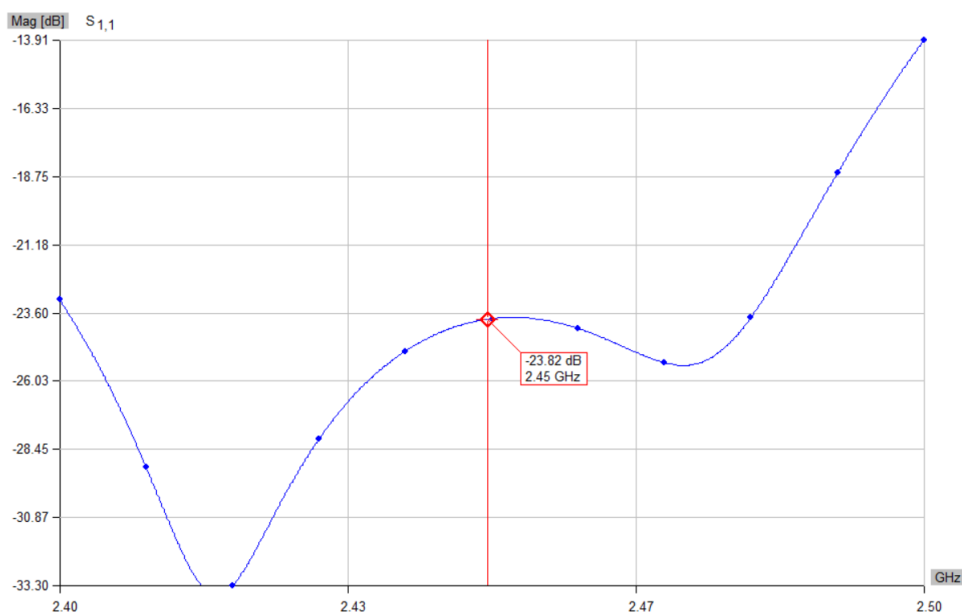


Слике 2.4.1.34. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 7 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



Слика 2.4.1.35. Дијаграм зрачења антене са 7 директора на централној учестаности.

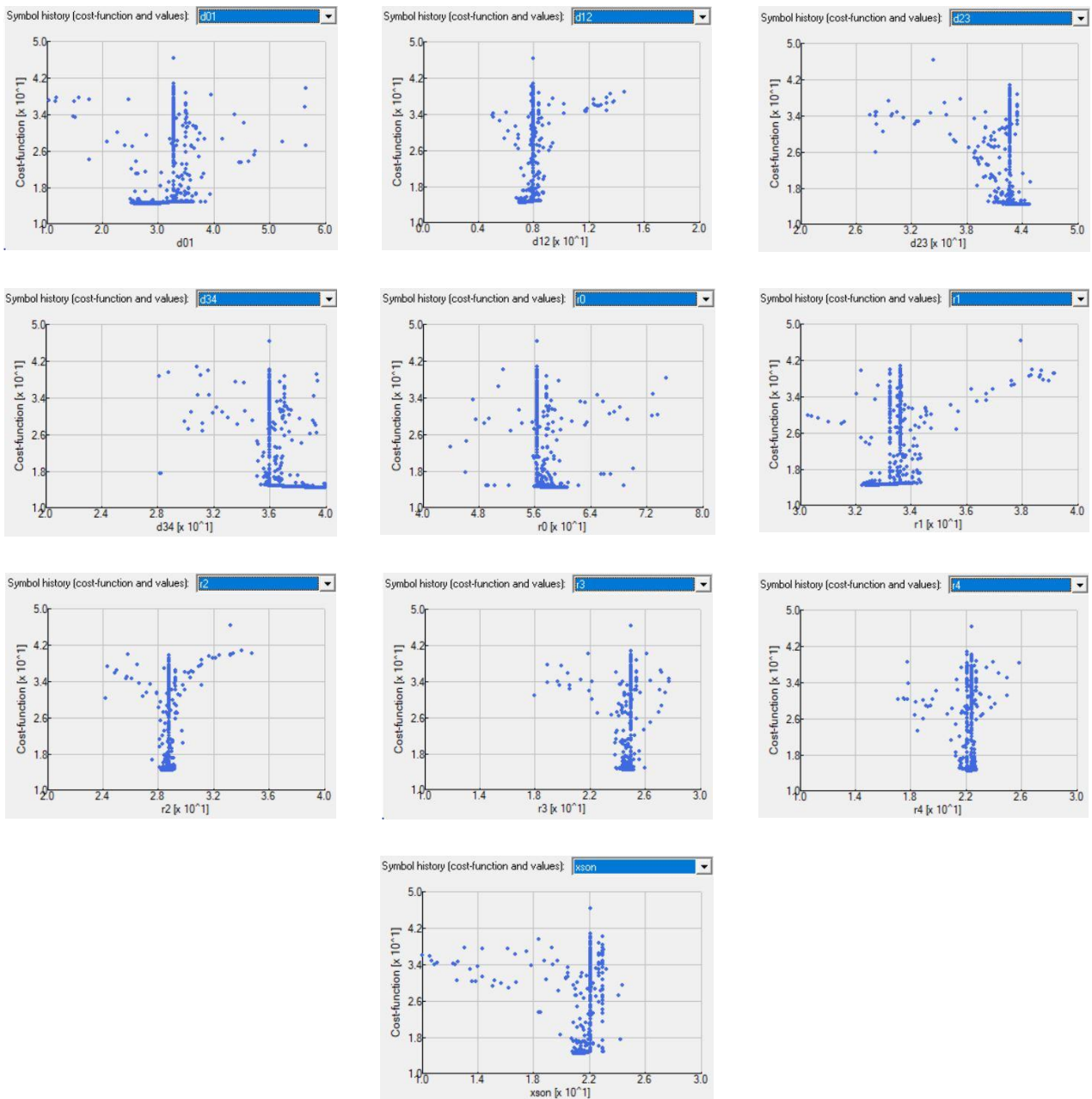


Слика 2.4.1.36. Коэффициент рефлексии за антену са 7 директора у посматраном опсегу учестаности.

		Symbol
1	61.2841	r0=6.12841e+001
2	35.7045	r1=3.57045e+001
3	29.0536	r2=2.90536e+001
4	22.9468	r3=2.29468e+001
5	21.9902	r4=2.19902e+001
6	3.40214	d01=3.40214e+000
7	10.4257	d12=1.04257e+001
8	39.0994	d23=3.90994e+001
9	34.9993	d34=3.49993e+001
10	18.1095	xson=1.81095e+001

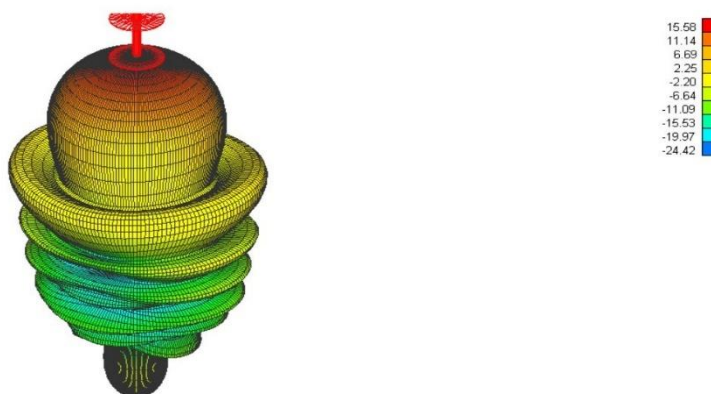
Слика 2.4.1.37. Димензије антене са 7 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.



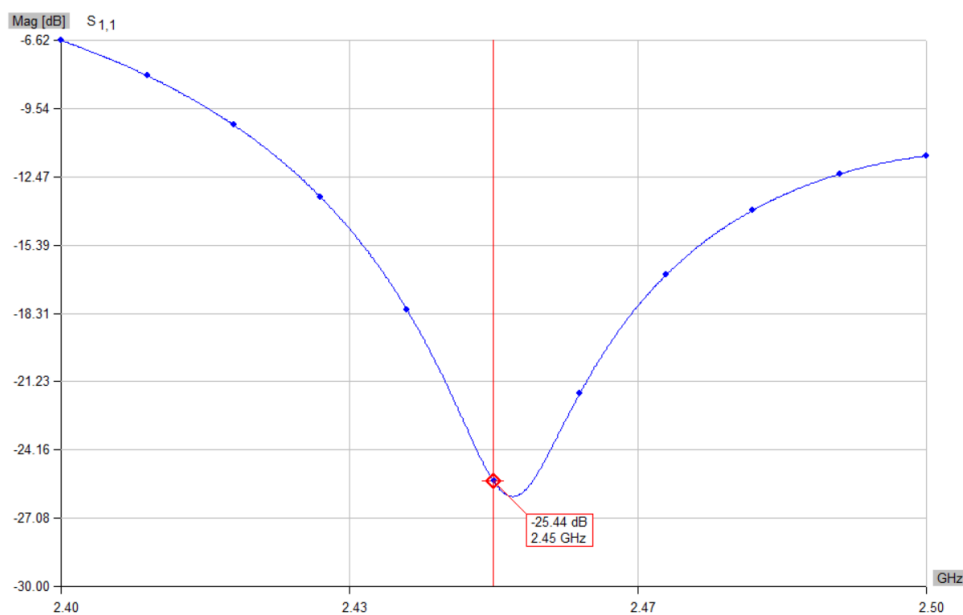


Слике 2.4.1.38. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 8 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



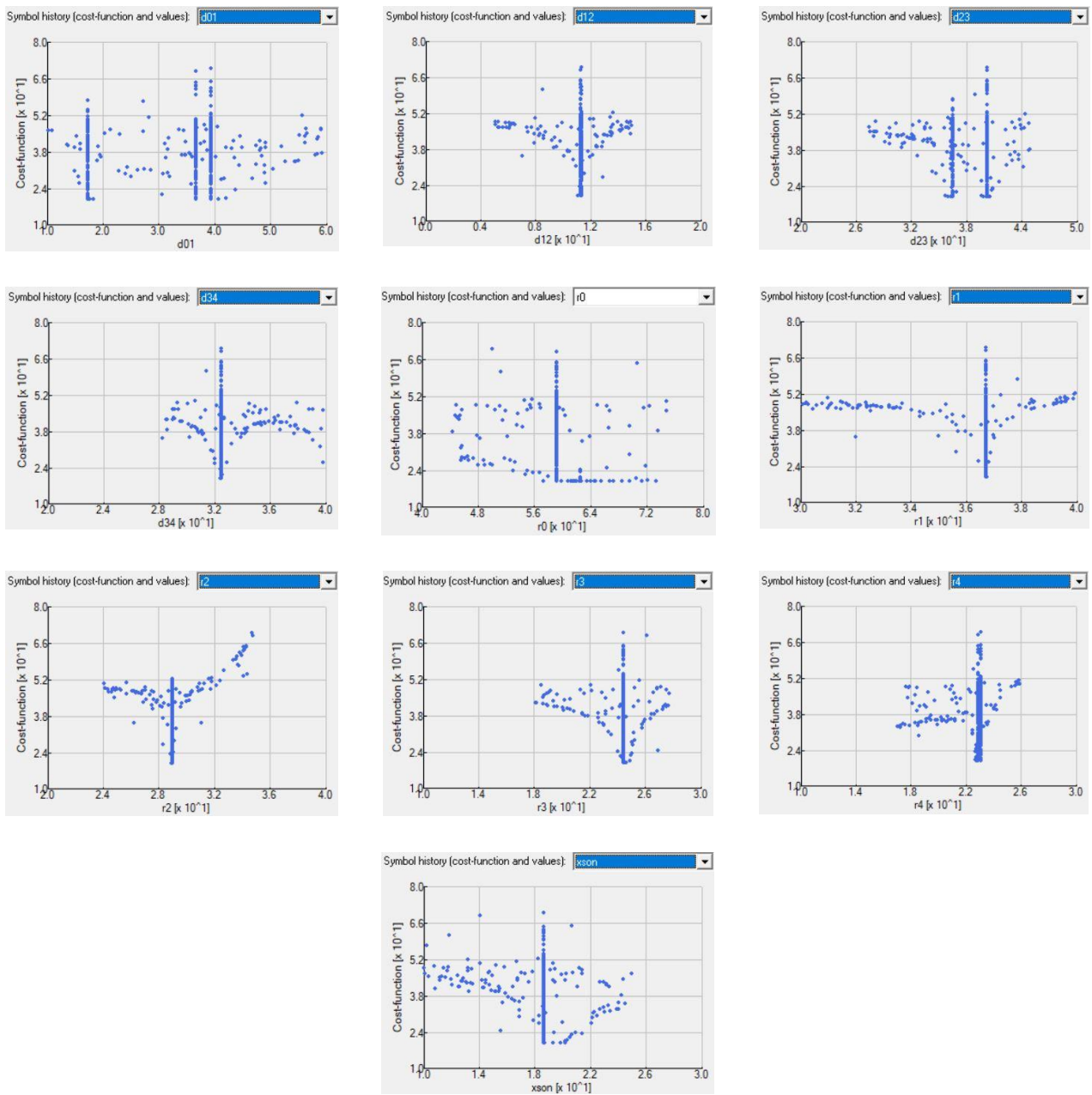
Слика 2.4.1.39. Дијаграм зрачења антене са 8 директора на централној учестаности.



Слика 2.4.1.40. Коefицијент рефлексије за антену са 8 директора у посматраном опсегу учестаности.

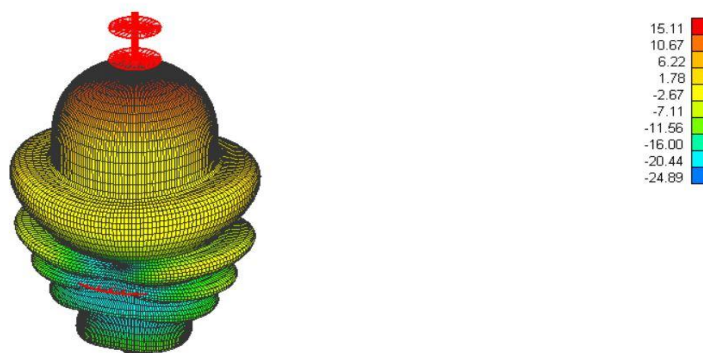
Symbols		
		Symbol
1	60.6738	r0=6.06738e+001
2	32.6167	r1=3.26167e+001
3	28.2866	r2=2.82866e+001
4	24.3761	r3=2.43761e+001
5	22.2443	r4=2.22443e+001
6	3.01801	d01=3.01801e+000
7	7.01839	d12=7.01839e+000
8	44.6631	d23=4.46631e+001
9	39.9646	d34=3.99646e+001
10	20.8545	xson=2.08545e+001

Слика 2.4.1.41. Димензије антене са 8 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.

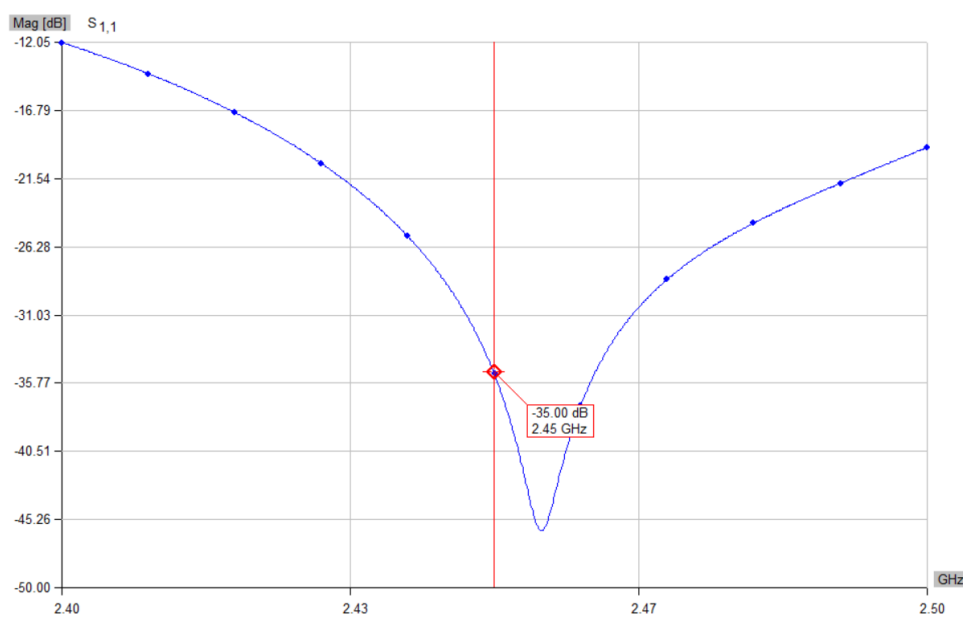


Слике 2.4.1.42. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 9 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



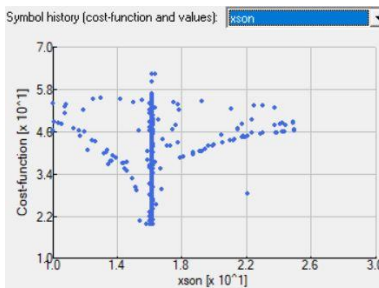
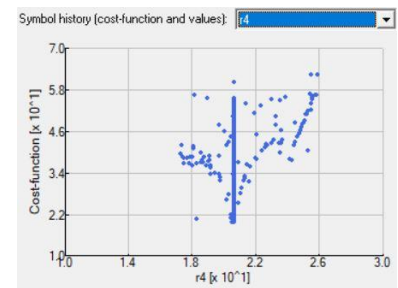
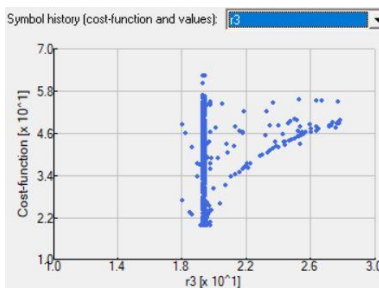
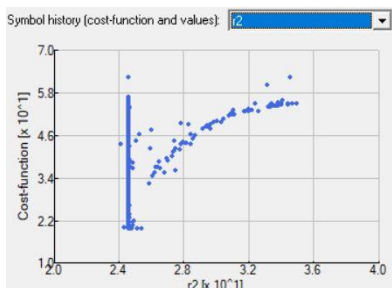
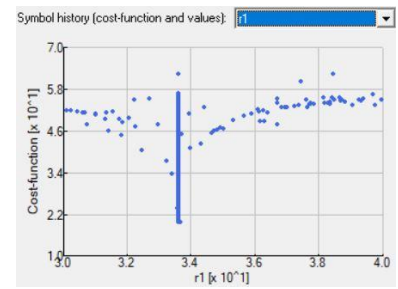
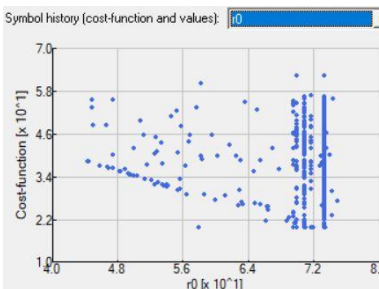
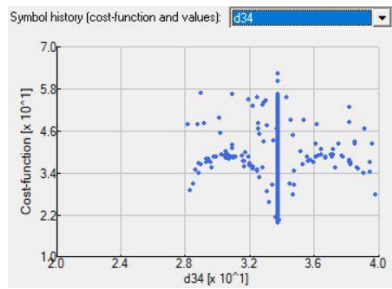
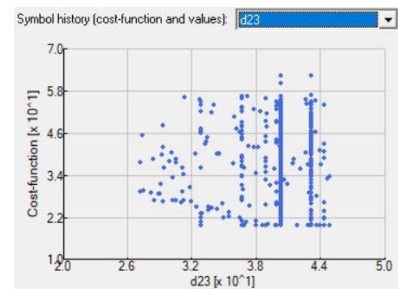
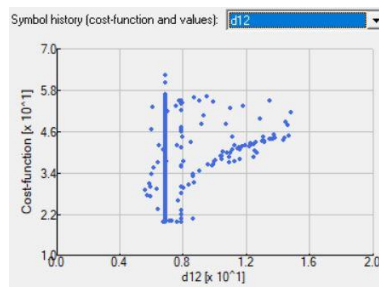
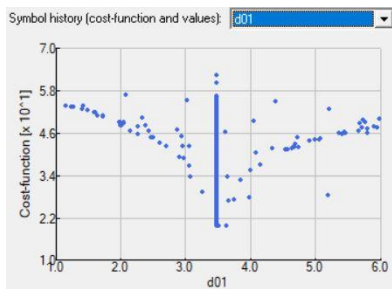
Слика 2.4.1.43. Дијаграм зрачења антене са 9 директора на централној учестаности.



Слика 2.4.1.44. Коэффициент рефлексии за антену са 9 директора у посматраном опсегу учестаности.

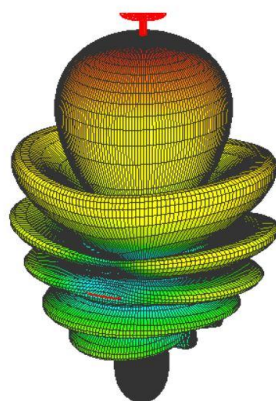
	Symbol
1	62.5248 r0=6.25248e+001
2	36.704 r1=3.67040e+001
3	28.9377 r2=2.89377e+001
4	24.4211 r3=2.44211e+001
5	22.7324 r4=2.27324e+001
6	1.73411 d01=1.73411e+000
7	11.2551 d12=1.12551e+001
8	36.4614 d23=3.64614e+001
9	32.4813 d34=3.24813e+001
10	18.6345 xson=1.86345e+001

Слика 2.4.1.45. Димензије антене са 9 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.

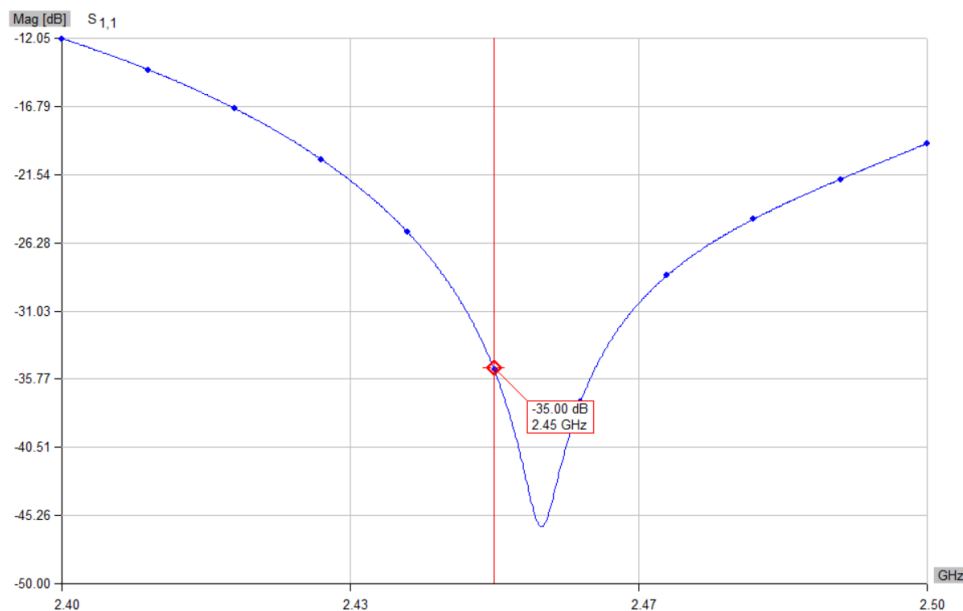


Слике 2.4.146. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 10 директора.

Gain [dB] 2.45 GHz



Слика 2.4.1.47. Дијаграм зрачења антене са 10 директора на централној учестаности.

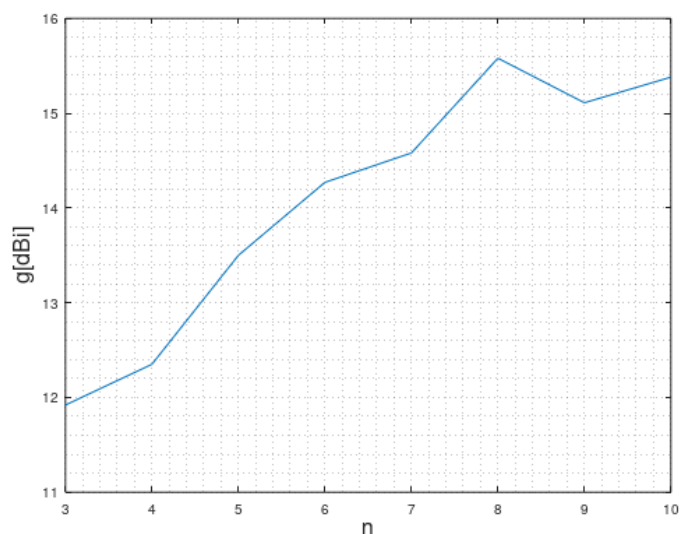


Слика 2.4.1.48. Коэффициент рефлексии за антену са 10 директора у посматраном опсегу учестаности.

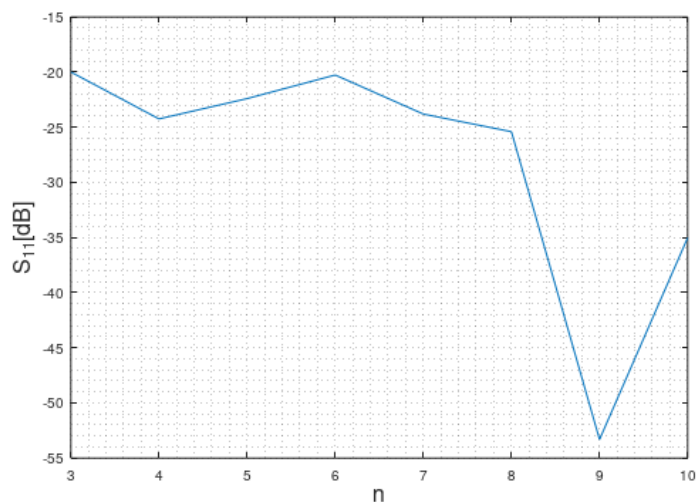
Symbols		
	Symbol	
1	73.3099	r0=7.33099e+001
2	33.6243	r1=3.36243e+001
3	24.6046	r2=2.46046e+001
4	19.435	r3=1.94350e+001
5	20.701	r4=2.07010e+001
6	3.48875	d01=3.48875e+000
7	6.87472	d12=6.87472e+000
8	40.314	d23=4.03140e+001
9	33.7987	d34=3.37987e+001
10	16.1456	xson=1.61456e+001

Слика 2.4.1.49. Димензије антене са 10 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.

На основу резултата са слика 2.4.1.18 - 2.4.1.41, на сликама 2.4.1.42 и 2.4.1.43, приказан је добитак антена и коефицијент рефлексије добијени након оптимизације у функцији броја директора. Са тих графика, као најоптималнија антена одабрана је антена са  $n=5$  директора, из разлога што она има задовољавајуће добре параметре, а једноставније је конструкције у односу на антене са више директора. Са графика токова свих оптимизационих процеса, може се уочити да су сви параметри у свим токовима конвергирани ка оптималним вредностима, као и да је вредност добитка оптимизоване антене са 5 директора већа него вредност добитка неоптимизоване антене са 10 директора. Као што је већ речено, у наредном одељку биће приказана детаљнија симулација антене са 5 директора у програмском пакету *Ansys HFSS*, као и упоредни приказ резултата те симулације, са резултатима добијеним у овом одељку.



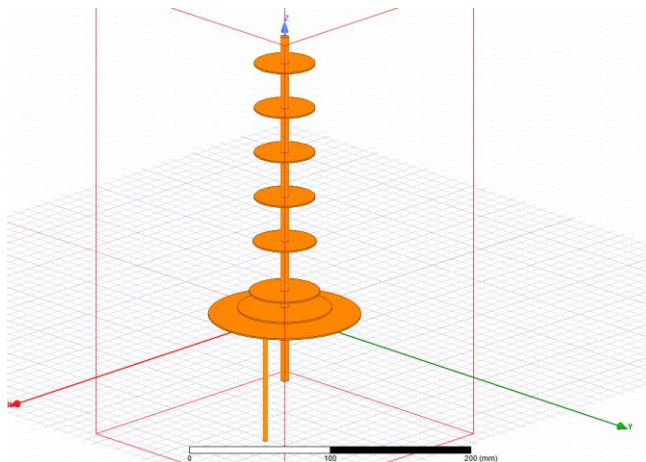
Слика 2.4.1.50. Графички приказ зависности добитка на централној учестаности од броја директора.



Слика 2.4.1.51. Графички приказ зависности коефицијента рефлексије на централној учестаности од броја директора.

### 2.4.2. Анализа у програмском пакету HFSS

Програмски пакет HFSS пружа више конструкцијских погодности, као што су лакша манипулација објектима (спајање и раздвајање објеката) и постојање функција за брзу конструкцију неких од основних геометријских тела и фигура (кругови, цилиндри, итд.), од пакета WIPL-D Pro, али је обично захтевнији по питању потребних рачунарских ресурса. Стога је он одабран као други нумерички модел којим ће се проверити раније добијени нумерички резултати пре него се приступи изради прототипа. HFSS модел антене за  $n = 5$  директора, приказан је на слици 2.4.2.1. Димензије антене за HFSS модел су преузете из оптимизованог WIPL-D модела за антену са 5 директора.



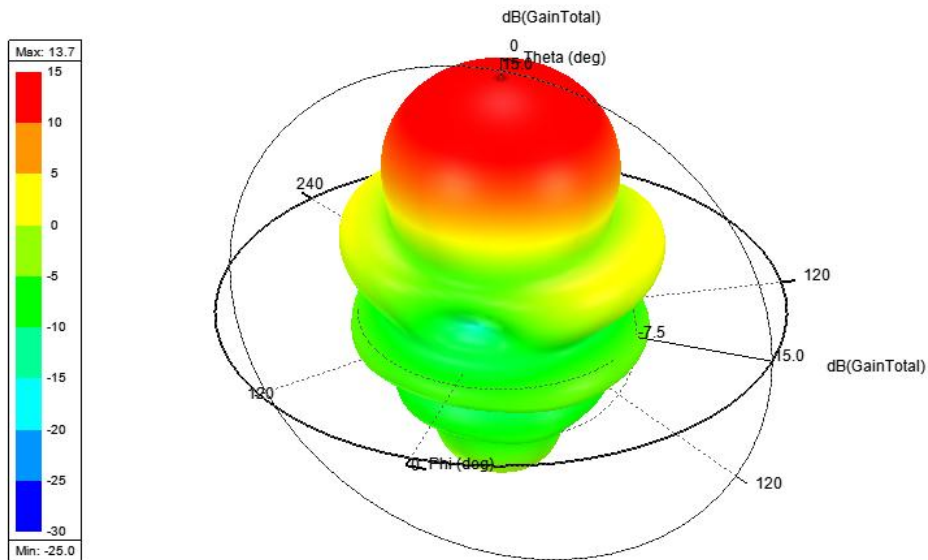
Слика 2.4.2.1. Дизајн диск антене са 5 директора у програмском пакету HFSS.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
\$r0	54.9297	mm	54.9297mm
\$r1	34.0451	mm	34.0451mm
\$r2	25.4903	mm	25.4903mm
\$r3	22.9191	mm	22.9191mm
\$r4	21.9803	mm	21.9803mm
\$d	1	mm	1mm
\$d01	4.09938	mm	4.09938mm
\$d12	11.3916	mm	11.3916mm
\$d23	36.9673	mm	36.9673mm
\$d34	32.9336	mm	32.9336mm
\$d34d	\$d34+\$d		33.9336mm
\$xson	19.6974	mm	19.6974mm

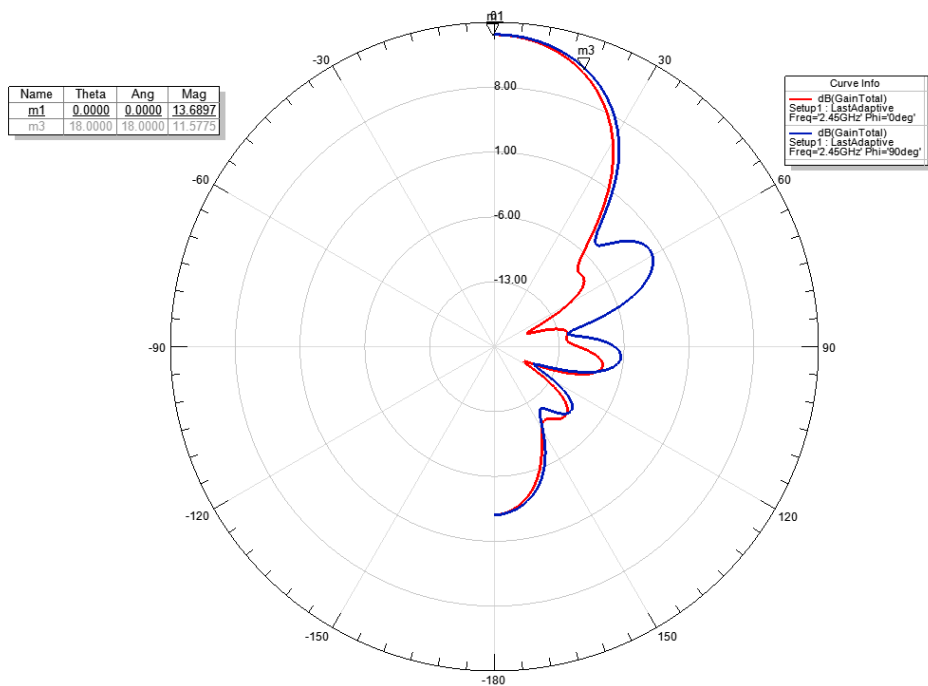
Слика 2.4.2.2. Димензије диск антене са 5 директора у програмском пакету HFSS.

У пакету HFSS добијени су резултати за дијаграм зрачења у 3-D и поларном облику, као и коефицијент рефлексије у децибелима и у Смитовом дијаграму. Резултати ове симулације приказани су на наредним сликама.



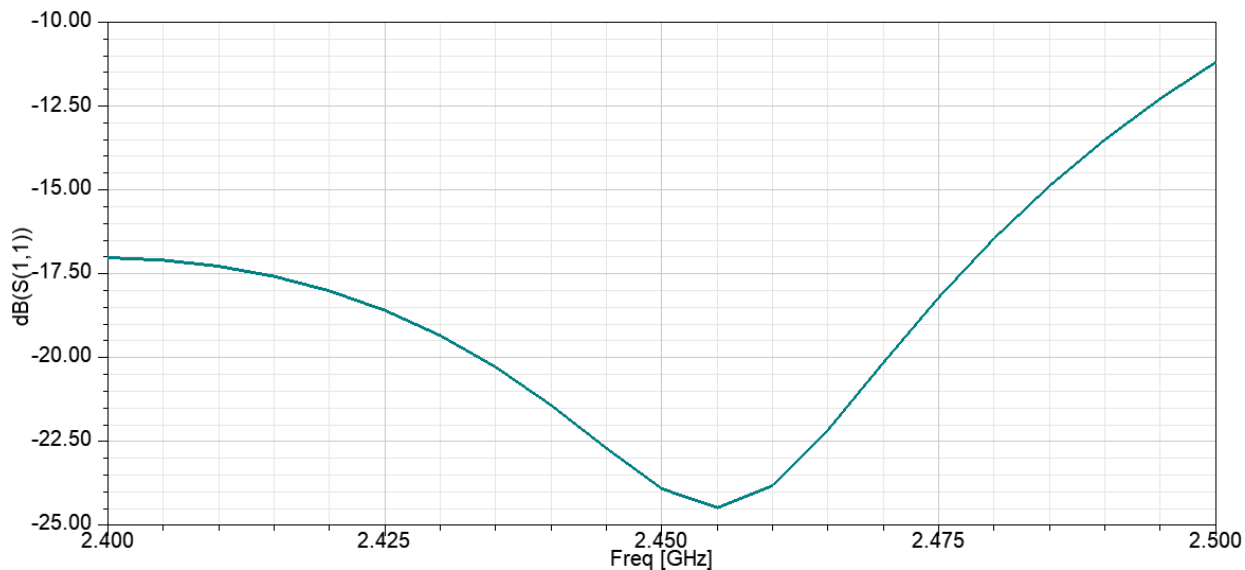


Слика 2.4.2.3. Дијаграм зрачења антене са 5 директора на централној учестаности  $f=2,45$  GHz.

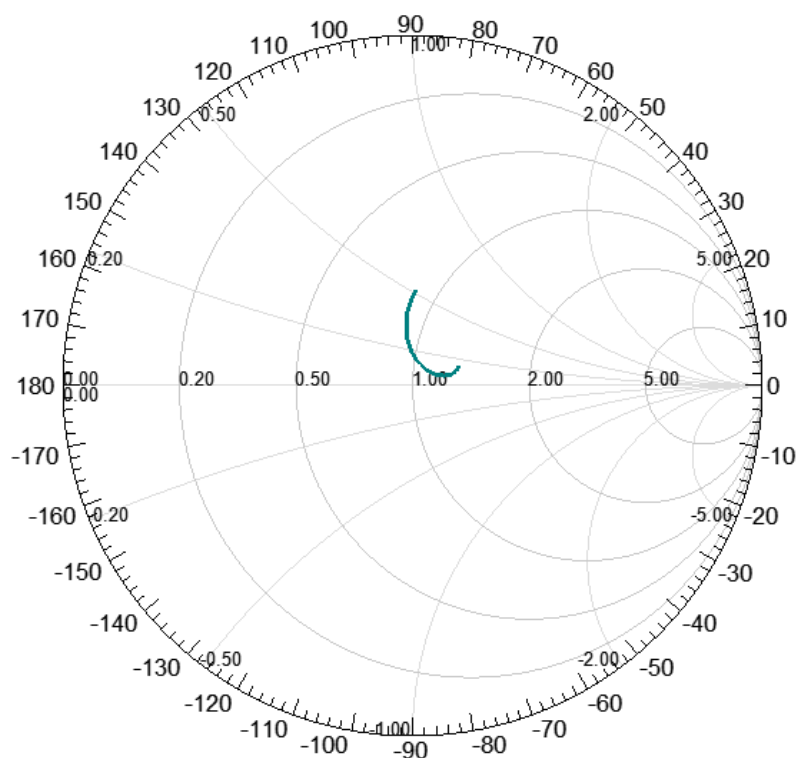


Слика 2.4.2.4. Упоредни приказ дијаграма зрачења антене у поларном дијаграму за главни смер зрачења.

Са слике 2.4.2.4 може се видети изглед дијаграма зрачења у одређеним пресецима ( $\theta$  и  $\varphi$  равнима). У овом конкретном случају, угао  $\theta$  који се поклапа са правцем главног снопа има вредност  $\theta = 0$  и оба ова графика имају ту вредност угла као своју  $\theta$  координату. Углови  $\varphi$  за које је приказан дијаграм на графику изнад су  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 90^\circ$ , што даје међусобно управне равни које садрже осу антене. Оба графика су симетрична у односу на вертикални пречник дијаграма, па је довољно приказати само једну половину графика.



Слика 2.4.2.5. Коэффициент рефлексije за антену са 5 директора добијен у програмском пакету HFSS.



Слика 2.4.2.6. Коэффициент рефлексije за антену са 5 директора у Смитовом дијаграму.

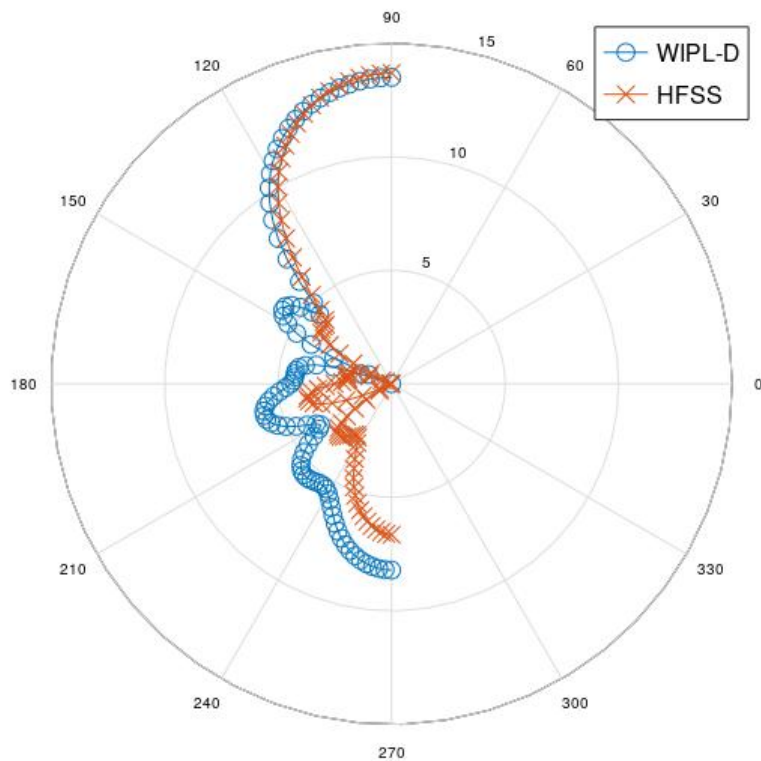
Да би било који електромагнетски склоп био потпуно прилагођен на приступ од  $50 \Omega$ , његов коофицијент рефлексije у Смитовом дијаграму се налази у центру дијаграма. Са слике 2.4.2.6 се види да је антена веома добро прилагођена, јер јој је за већину учестаности, график јако близу центра Смитовог дијаграма. Да би тај закључак био верификован, и да би се могло знати да ли овај график заиста за приступ од  $50 \Omega$ , покренута је додатна симулација за прорачун сопствене импедансе коаксијалног вода на централној учестаности. Коаксијални вод који се налази у овом моделу симулира конектор који би се налазио у прототипу, а

такође и да би се симулација уопште могла покренути. Разлог томе је што је за потребе симулације у пакету *HFSS* као приступ коришћен таласни приступ (енг. *wave port*), која је генерално боља од стандардног концентрисаног приступа (енг. *lumped port*) који је коришћен приликом симулације у пакету *WIPL-D* па самим тим, модел коаксијалног вода не постоји унутар модела у програмском пакету *WIPL-D*, већ само у оквиру модела у програмском пакету *HFSS*. Резултат те симулације приказан је на слици 2.4.2.7.



Слика 2.4.2.7. Карактеристична импеданса напојног коаксијалног вода на централној учестаности.

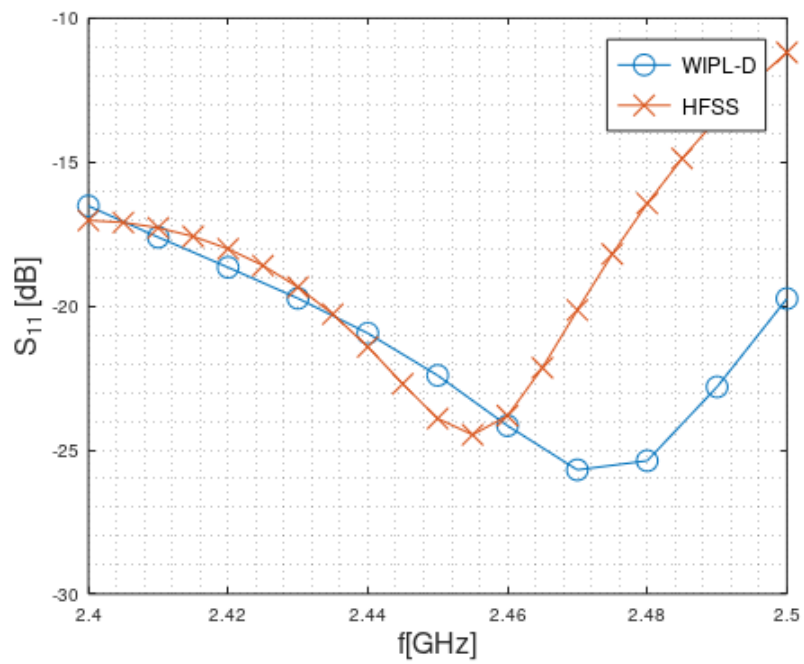
Имајући у виду да се два коришћена софтверска пакета за симулацију суштински разликују по методама које користе за израчунавања у оквиру својих симулација, корисно је упоредити дијаграме зрачења које добијамо као резултат при покретању симулације у сваком од њих. На слици 2.4.2.8 приказана су оба дијаграма зрачења, добијена симулацијама.



**Слика 2.4.2.8. Упоредни приказ дијаграма зрачења добијених из оба програмска пакета.**

Са слике 2.4.2.8 се види да су у смеру главног снопа зрачења оба софтверска пакета дала прилично сличан резултат. Разлика је у деловима простора који су ван главног снопа.

Додатно, на слици 2.4.2.9 приказани су коефицијенти рефлексије антене са 5 директора добијених симулацијама у оба софтверска пакета. Важно је напоменути да иако се визуелно може учинити да се ова два скупа резултата значајно разликују, пошто је реч о релативно ниским нивоима, испод  $-10$  dB, може се сматрати да се резултати практично добро поклапају.



Слика 2.4.2.9. Упоредни приказ коефицијента рефлексије добијених из оба програмска пакета.

## 3. ИЗРАДА ПРОТОТИПА И ЊЕГОВО МЕРЕЊЕ

### 3.1. Процес израде прототипа

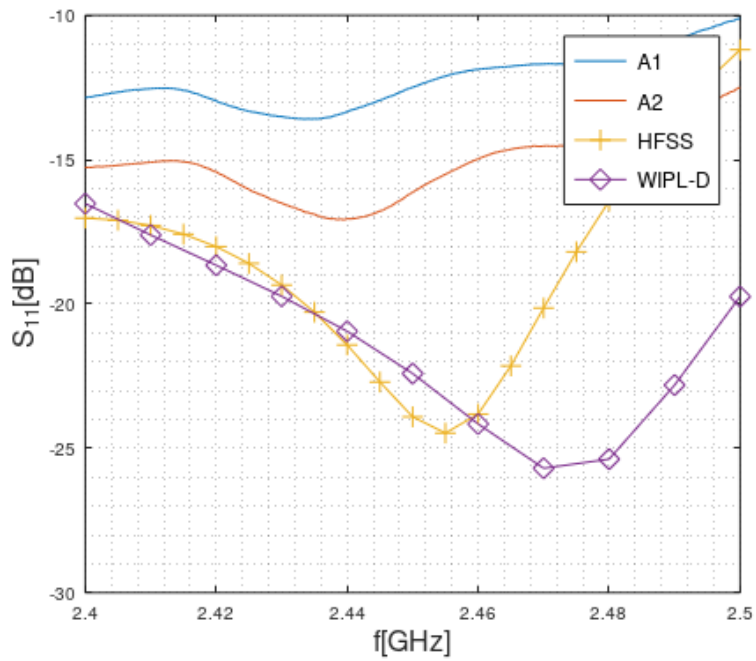
Након завршених симулација и оптимизације модела у софтверским пакетима, следећи корак је био да се антена и физички направи. Антена је направљена у Лабораторији за основе електротехнике (соба 95а) Електротехничког факултета. Као материјал за дискове антене, употребљени су бакарни лимови дебљине 1 mm. Дискови су исечени коришћењем CNC машине која је импровизирана за потребе израде овог рада. Направљене су укупно 4 антене, од којих су прве две тестиране у лабораторији. Као носач антене искоришћен је бакарни штап полупречника 3 mm, а дискови су залемљени за носач, коришћењем тинол жице и малог бренера. На слици 3.1.1 приказан је један од прототипова антене.



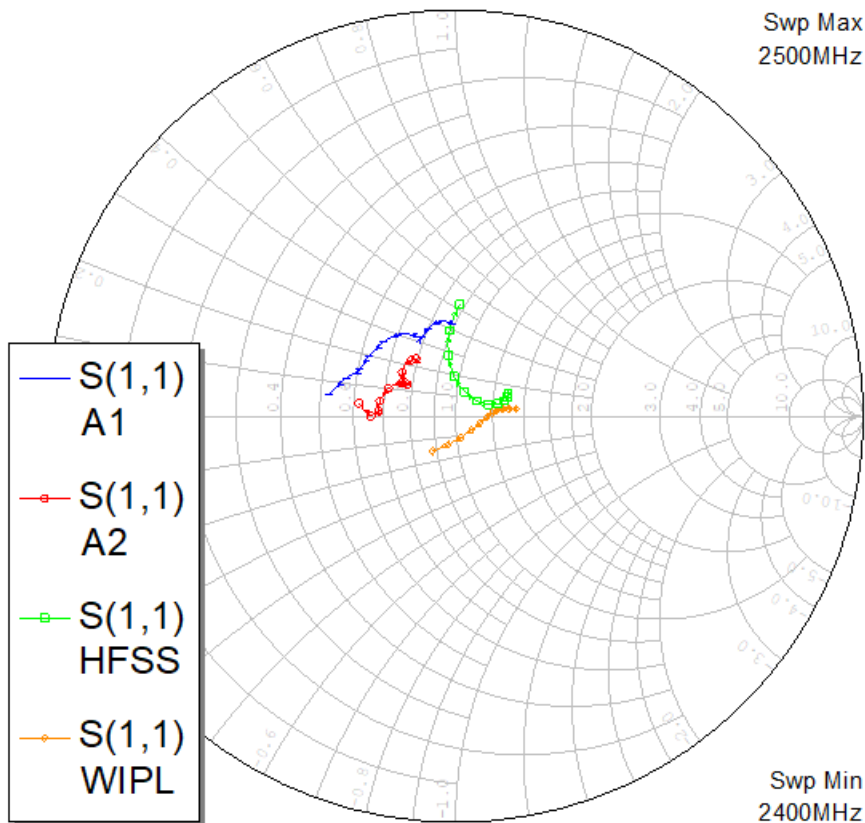
Слика 3.1.1. Приказ прототипа диск антене.

### 3.2. Мерење коефицијената рефлексије

Као што је речено у уводу, за мерење параметара антене, коришћен је анализатор мрежа *Agilent N5227A*. С обзиром на то да је антена уређај са једним приступом, пре мерења антене урађена је *SOLT* (енг. *Short Open Load Through*) једноприступна калибрација. Резултати мерења *s*-параметра обе антене биће приказани на сликама испод, заједно са резултатима симулације.



Слика 3.2.1. Упоредни приказ коефицијента рефлексије добијених мерењем и симулацијом.



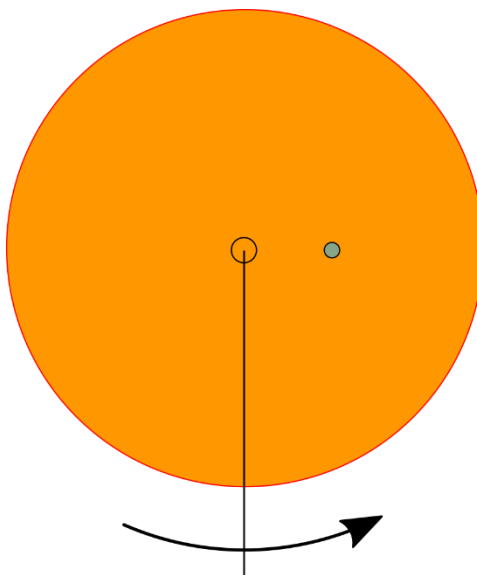
Слика 3.2.2 Упоредни приказ коефицијента рефлексије добијених мерењем и симулацијом у Смитовом дијаграму.

Са слика 3.2.1 и 3.2.2 се види да резултати мерења одступају од симулације, а највише на централној учестаности, где је разлика од 10 dB до 15 dB. Разлог томе углавном лежи у малим грешкама приликом прављења антене. Мала одступања од димензија и вишак лема на спојевима су само неки од параметара који су могли довести до благих деградација параметара антене.

### 3.3. Мерење коефицијената трансмисије и формирање дијаграма зрачења

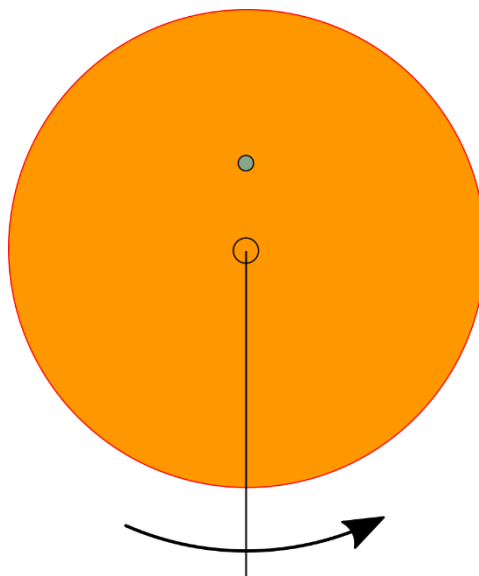
За потребе мерења коефицијента трансмисије, коришћено је антенско мерно место у оквиру Лабораторије за антене и простирање (соба 63) Електротехничког факултета. Коефицијент трансмисије, или параметар  $s_{21}$ , означава меру преноса сигнала између два приступа мреже, што захтева формирање двопрístupне мреже. У ту сврху, искоришћене су обе антене, па је мерење урађено на двопрístupној мрежи коју чине обе антене. За мерење коефицијента трансмисије једне антене, направљена су 3 мерења, при чему је параметар који се мења оријентација предајне антене према пријемној:

1. Коефицијент трансмисије се посматра у равни која садржи правац максималног зрачења, при чему су предајна и пријемна антена оријентисане на исти начин, а предајна антена се ротира као што је приказано на слици 3.3.1. На тој слици сиви кружић означава приступ (SMA конектор).
2. Коефицијент трансмисије се посматра у равни која садржи правац максималног зрачења, при чему су предајна и пријемна антена оријентисане на исти начин, а предајна антена се ротира као што је приказано на слици 3.3.2. На тој слици сиви кружић означава приступ (SMA конектор).
3. Крос-поларизациона поставка, где је предајна антена постављена и ротира се као у поставци један, док је пријемна антена постављена као у поставци 2.



Слика 3.3.1. Приказ профила почетног положаја предајне антене на носачу и смера ротације носача током мерења у поставци 1.





Слика 3.3.2. Приказ профила почетног положаја предајне антене на носачу и смера ротације носача током мерења у поставци 2.

На сликама 3.3.1 и 3.3.2 приказани су профили поставке предајне антене на носачу приликом мерења, као и смер ротације носача приликом мерења. Обе слике су приказане из погледа са доње стране антене, односно у задњи део рефлектора, дуж осе носача. Код поставки 1 и 2, положаји пријемне антене су исти као почетни положаји предајне антене са слика 3.3.1 и 3.3.2. Код кросполаризационе поставке (поставке 3), једна антена је имала положај и смер ротације са слике 3.3.1, а друга је имала положај као почетни положај са слике 3.3.2. Носач пријемне антене није ротирао приликом мерења.

Антене су постављене на међусобној удаљености  $d = 283$  cm приликом овог мерења. Овај параметар нам је од значаја приликом рачунања коефицијента трансмисије. Коефицијент трансмисије ћемо израчунати применом Фрисове формуле. Основна форма ове формуле је:

$$\frac{P_p}{P_0} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R, \quad (3.3.1)$$

где је  $\lambda$  таласна дужина на централној учестаности, и она износи  $\lambda = 122,45$  mm,  $P_p$  и  $P_0$  су снага коју пријемна антена предаје прилагођеном пријемнику и снага коју генератор предаје предајној антени, респективно, а  $G_T$  и  $G_R$  су добици предајне и пријемне антене, респективно. Формула (3.3.1) подразумева да су антене прилагођене, да су им поларизације усклађене, као и да је правац максималног зрачења једне антене усмерен ка другој антени.

Полазећи од претпоставке да су антене приближно идентичне, можемо узети да су параметри  $G_T$  и  $G_R$  једнаки, па ћемо их на даље означавати са  $G$ . Такође, с обзиром на то да се  $s$  параметри дефинишу као количници интензитета одређених сигнала, можемо рећи да је количник интензитета сигнала на пријему и интензитета сигнала на предаји, заправо параметар  $s_{21}$ . Како је интензитет заправо корен снаге, лако се показује да је количник снага на предаји и пријему заправо квадрат модула коефицијента трансмисије. Међутим, треба напоменути да ово важи само у ситуацији када су антене прилагођене на одговарајуће приступе. Имајући у виду ове претпоставке, можемо формирати следећу једначину

$$|s_{21}|^2 = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G^2 \quad (3.3.2)$$

Из једначине (3.3.2), може се одредити појачање антена када су оне прилагођене на одговарајуће приступе. Са обзиром на то да су посматране антене неприлагођене, имамо реалан случај где појачање антене у Фрисовој формули треба заменити погонским појачањем антене, које се дефинише на следећи начин:

$$G_{Tp} = G \cdot (1 - |s_{11}|^2) \quad (3.3.3)$$

$$G_{Rp} = G \cdot (1 - |s_{22}|^2) \quad (3.3.4)$$

где се једначина (3.3.3) односи на предајну, а једначина (3.3.4) на пријемну антену. Како су антене по угледу на почетну претпоставку идентичне, сматраћемо да је параметар  $s_{11}$  једнак параметру  $s_{22}$ . Имајући овај податак у виду, уврштавањем једначина (3.3.3) и (3.3.4) у једначину (3.3.2), добијамо коначан облик Фрисове формуле који се користи када су антене неприлагођене, а који гласи:

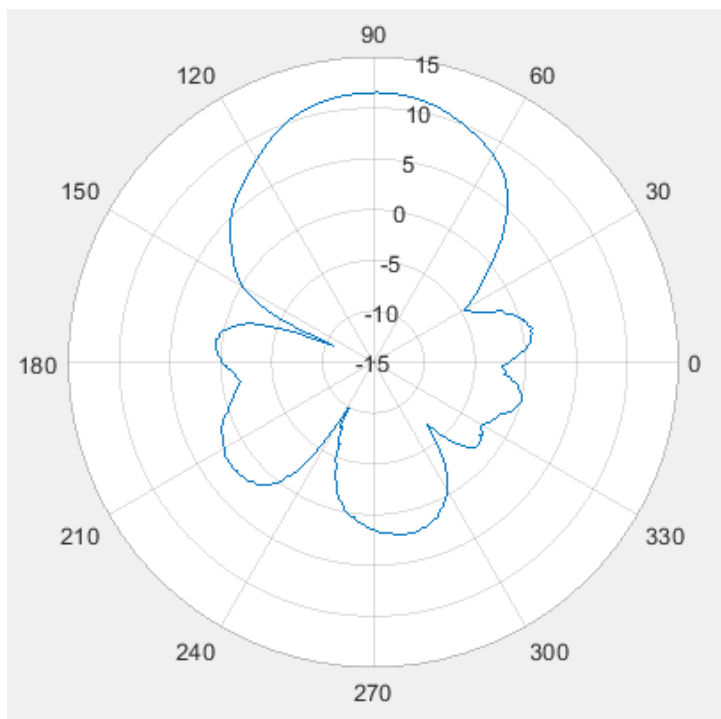
$$|s_{21}|^2 = \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \cdot G \cdot (1 - |s_{11}|^2) \right]^2 \quad (3.3.5)$$

одакле се добија коначна вредност параметра  $G$ :

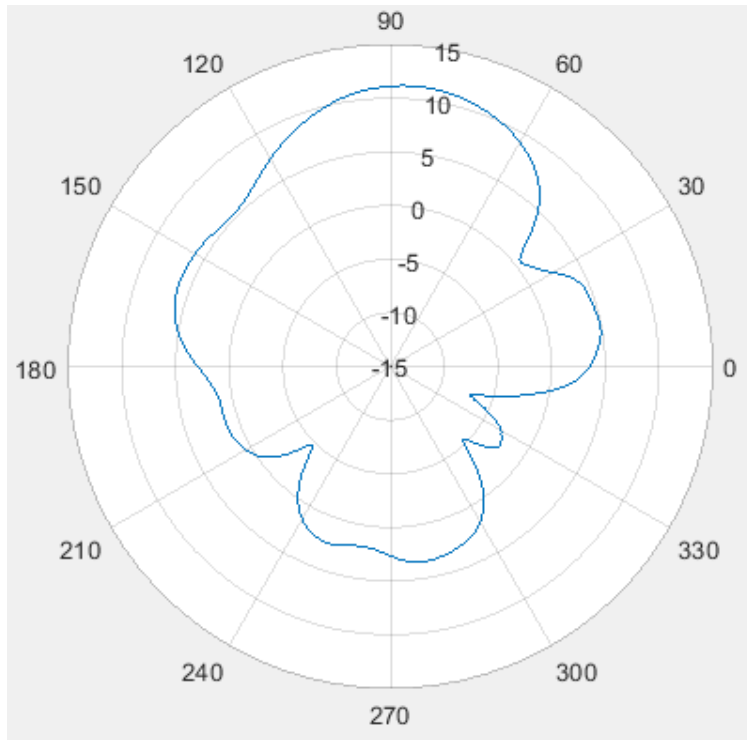
$$G = \frac{4\pi d |s_{21}|}{\lambda(1 - |s_{11}|^2)}. \quad (3.3.6.)$$

На основу једначине (3.3.6.) и измереног коефицијента трансмисије  $s_{11}$  прорачунаће се добитак антена.

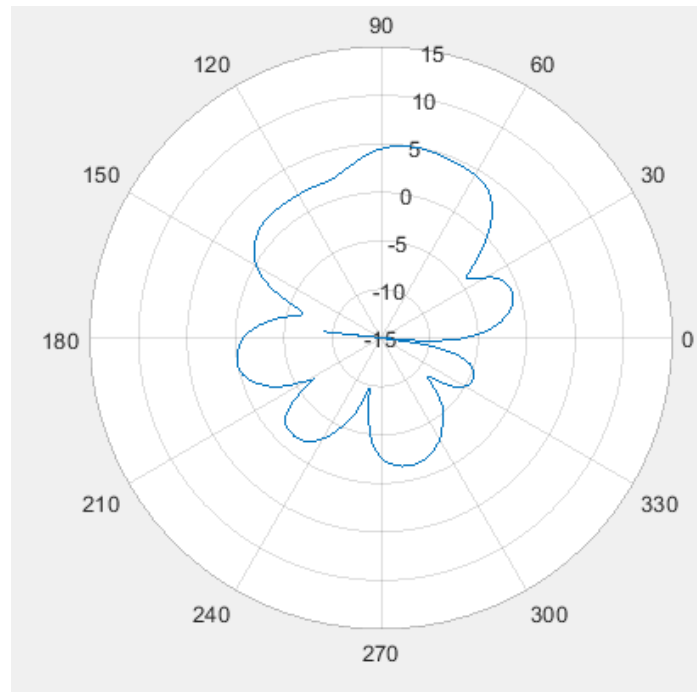
На наредних неколико слика биће приказани резултати мерења добитка антене, који су добијени скалирањем резултата измерених коефицијента трансмисије коришћењем једначине (3.3.6.).



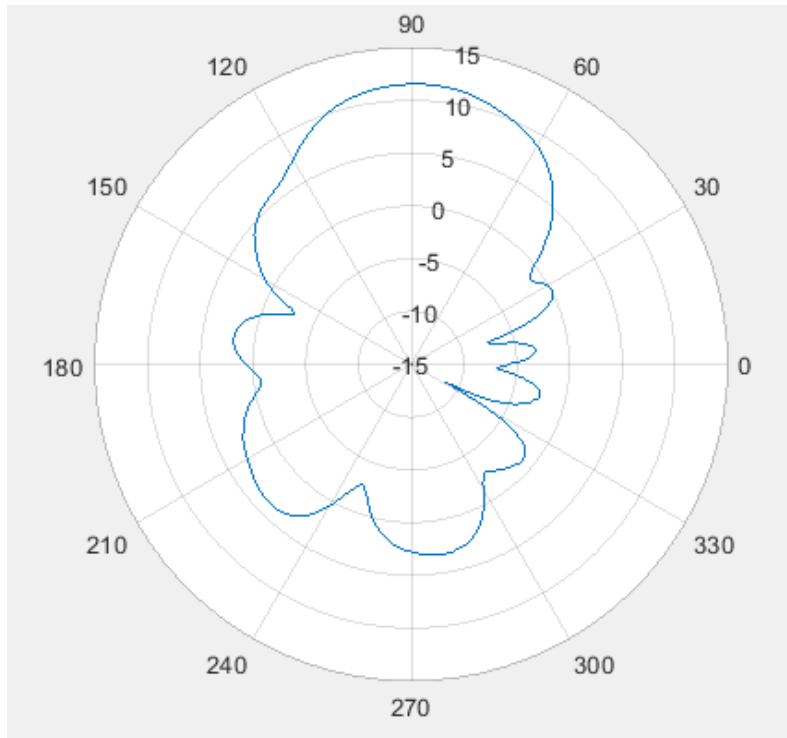
Слика 3.3.3. Измерени добитак антене 1 за сценарио 1.



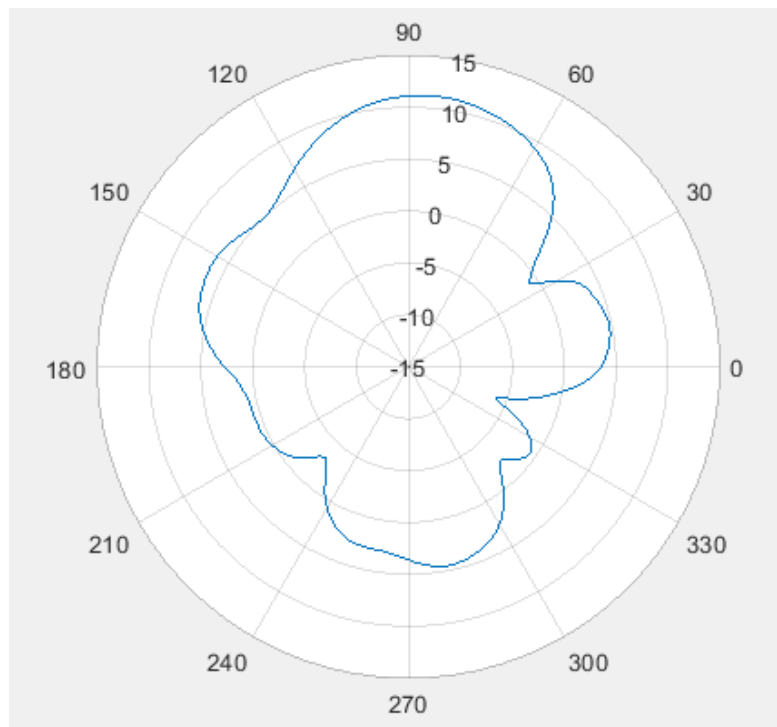
Слика 3.3.4. Измерени добитак антене 1 за сценарио 2.



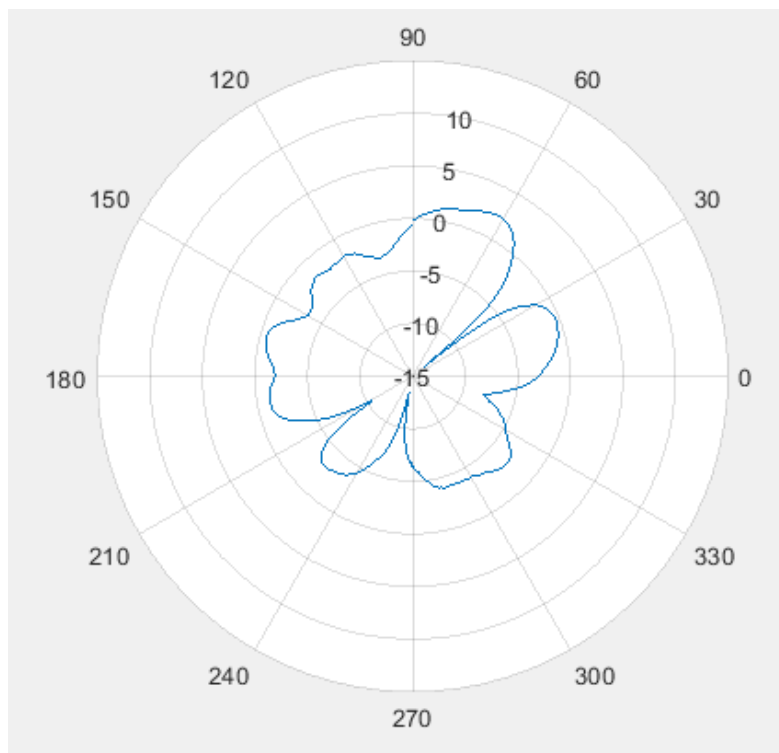
Слика 3.3.5. Измерени добитак антене 1 за сценарио 3.



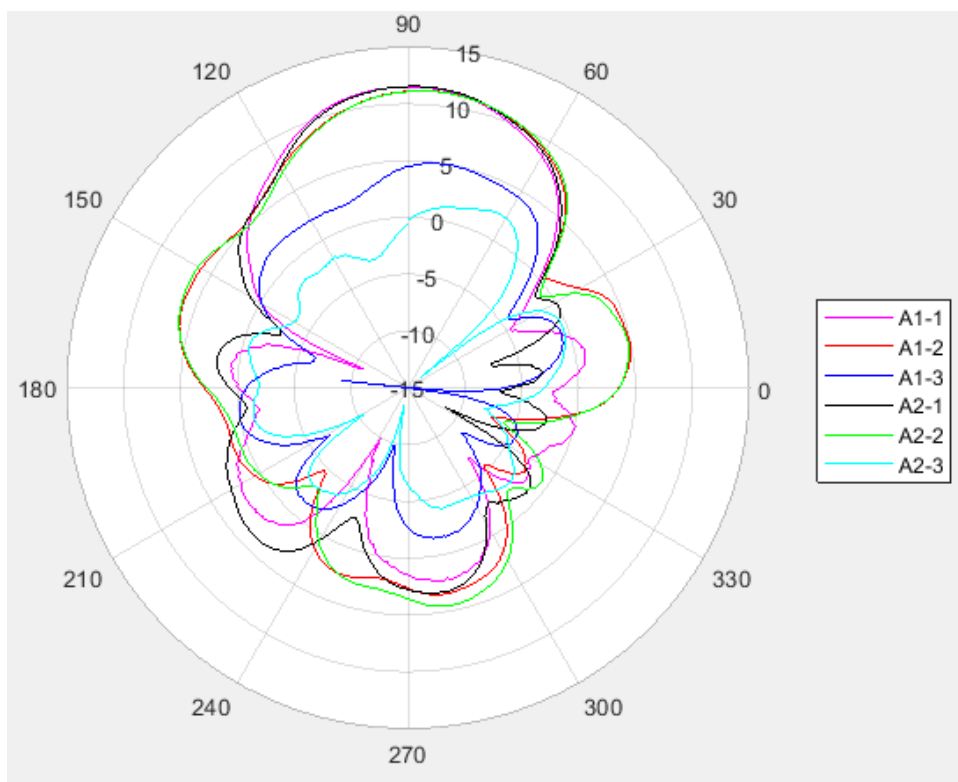
**Слика 3.3.6. Измерени добитак антене 2 за сценарио 1.**



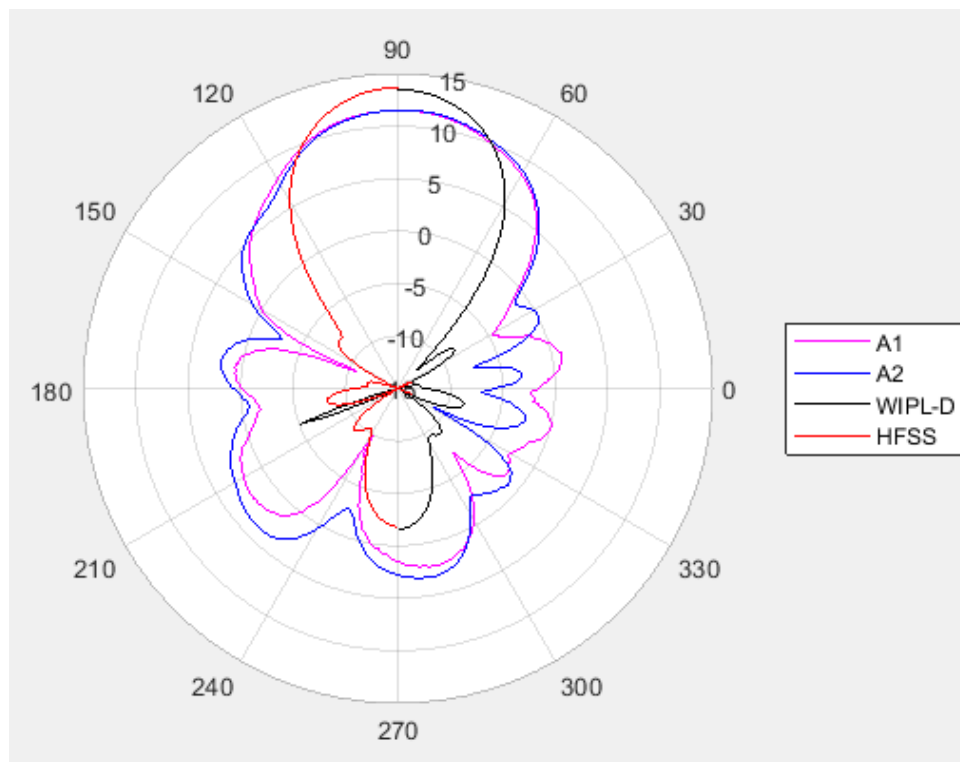
**Слика 3.3.7. Измерени добитак антене 2 за сценарио 2.**



Слика 3.3.8. Измерени добитак антене 2 за сценарио 3.



Слика 3.3.9. Упоредни приказ измерених добитака обе антене за све положаје.



Слика 3.3.10. Упоредни приказ измерених добитака обе антене у положају 1 и добитака добијених рачунарском симулацијом.

Са слике 3.3.9 се види да добитак има највећу вредност када су антене поларизоване на исти начин. Са обзиром на то да направљене антене поседују аксијалну симетрију, може се приметити да не постоји круцијална разлика између мерења у равни конектора и равни која је управна на конектор, те максималне вредности добитка у тим случајевима имају једнаку вредност, што увек мора бити задовољено. Такође, максимална вредност у оба ова случаја има већу вредност него при мерењу у кросполаризационој поставци, и та је разлика значајна и износи око 12 dB за прву антену и 7 dB за другу антену. Тај податак иде у прилог чињеници да антене имају веома редуковану моћ пријема сигнала у ортогоналним поларизацијама.

Коришћењем једначине (3.3.6.), лако се показује да добици антена 1 и 2 на централној учестаности износе  $G_1 = 11,94$  dB и  $G_2 = 11,8$  dB, респективно. Са слике 3.3.10 може се уочити да се измерени добитак доста добро поклапа са резултатима симулације, а такође и да је измерена вредност доста близу вредности добијене рачунарском симулацијом.

## 4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду, полазећи од Јаги антене и наслагане микротракасте антене, конструисана је нова антена коју смо назвали диск антена. Том приликом пошло се од основних димензија за конструкцију Јаги антене и наслагане микротракасте антене, на основу којих је конструисан основни модел диск антене.

Параметри диск антене оптимизовани су за различит број паразитних елемената (директора), при чему су критеријуми оптимизације били прилагођење и усмереност антене. На основу великог броја оваквих симулација направљена је процена очекиване усмерености антене од броја директора, а онда је направљен компромисни избор броја директора. Компромис је подразумевао усмереност антене, са једне стране, и сложеност њене конструкције, са друге стране.

Након тога, полазећи од бакарних лимова и шипки направљена су четири прототипа. Резултати мерења и симулација доста добро се поклапају, а успешност овог дизајна огледа се у томе што се ове антене успешно користе за повећање покривености постојеће Wi-Fi мреже.

Највећи проблем у самом раду представљало је добијање почетног дизајна антене. Основни принципи рада засновани су на раду Јаги антене и наслагане микротракасте антене, а полазећи од тих принципа конструисана је диск антена. Сама израда прототипа, од прављење бакарних дискова до процеса лемљења, изискивала је доста времена. У току овог процеса овладано је и техником лемљења помоћу малог бренера, која се ретко користи у области електротехнике.

На основу изведених експеримената и резултата добијених мерењем, може се закључити да је пројекат успешно изведен од почетка до краја као и да је на успешан начин приказан принцип рада антена. Додатно, приликом израде овог пројекта стечена су знања и вештине која ће сигурно бити врло корисна у даљем пословном животу аутора овог рада.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Graf, Rudolf F., ур. (1999). „Antenna”. *Modern Dictionary of Electronics*. Newnes. стр. 29. ISBN 978-0750698665.
- [2] Antena, [1] "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2015.
- [3] Драговић, Момчило Б., “Антене и простирање радио таласа”, 4. издање, Академска Мисао, 2008.
- [4] Uda, S. (December 1925). "[On the Wireless Beam of Short Electric Waves](#)". *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*. Institute of Electrical Engineers of Japan: 1128.
- [5] Yagi, Hidetsu; Uda, Shintaro (February 1926). "[Projector of the Sharpest Beam of Electric Waves](#)". *Proceedings of the Imperial Academy*. Imperial Academy.
- [6] Sarkar, T. K.; Mailloux, Robert; Oliner, Arthur A.; et al. (2006). *History of Wireless*. John Wiley and Sons. pp. 462–466. ISBN 0471783013.
- [7] WIPL-D, WIPL-D Pro v17, <https://wipl-d.com/products/wipl-d-pro/>
- [8] NI, NI AWR 13.0, AWR, 2017, <https://www.awr.com/>
- [9] ANSYS, Ansys HFSS 15.0.0, 2014, ANSYS, <http://www.ansys.com>.
- [10] Mathworks, MATLAB R2017b, 2017, <http://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [11] GNU, GNU Octave, <https://www.gnu.org/software/octave/index>
- [12] GNU, Inkscape, <https://inkscape.org>
- [13] <https://www.keysight.com/zz/en/product/N5227A/pna-microwave-network-analyzer-67-ghz.html>
- [14] Poole, Ian (2010). "[The Yagi Antenna](#)". *Radio-Electronics.com website*. Adrio Communications, Ltd. Retrieved 2011-03-29.
- [15] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Yagi\\_TV\\_antenna\\_1954.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Yagi_TV_antenna_1954.png).
- [16] "[What Is a Yagi Antenna?](#)". *wiseGEEK website*. Conjecture Corp. 2014. Retrieved 18 September 2014.
- [17] Balanis, Constantine A. (2011). *Modern Antenna Handbook*. John Wiley and Sons. pp. 2.17–2.18. ISBN 978-1118209752.
- [18] Wolff, Christian (2010). "[Yagi Antenna](#)". *Radar Basics*. Radartutorial.eu. Retrieved 18 September 2014.
- [19] Скрипте из предмета “Оптимизациони алгоритми у инжењерству” – Генетички алгоритам



[20] Скрипте из предмета “Оптимизациони алгоритми у инжењерству” – Градијентни алгоритам

## СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

CNC	<i>Computerized numerical control</i>
SOLT	<i>Short Open Load Through</i>

## СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1.1. Основна конструкција Јаги антене. ....	3
Слика 2.1.2. Типично растојање између елемената и типични габарити елемената. ....	4
Слика 2.2.1. Основни дизајн наслагане микротракасте антене са три проводника. ....	5
Слика 2.2.2. Приказ класичне микротракасте антене у програмском пакету <i>WIPL-D</i> . ....	5
Слика 2.2.3. Приказ наслагане микротракасте антене са три проводника у програмском пакету <i>WIPL-D</i> . ....	6
Слика 2.2.4. Дијаграм зрачења класичне микротракасте антене. ....	6
Слика 2.2.5. Коефицијент рефлексије класичне микротракасте антене. ....	7
Слика 2.2.6. Димензије класичне микротракасте антене након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима. ....	7
Слика 2.2.7. Дијаграм зрачења наслагане микротракасте антене са три проводника. ....	7
Слика 2.2.8. Коефицијент рефлексије наслагане микротракасте антене са три проводника. ....	8
Слика 2.2.9. Димензије наслагане микротракасте антене са три проводника након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима. ....	8
Слика 2.3.1. Основни принцип конструкције диск антене. ....	9
Слика 2.4.1 Почетни дизајн диск антене. Све димензије су у милиметрима. ....	10
Слика 2.4.1.1. Приказ модела диск антене са 3 директора у пакету <i>WIPL-D</i> . ....	11
Слика 2.4.1.2. Дијаграм зрачења антене са 3 директора на централној учестаности, пре оптимизације. ....	12
Слика 2.4.1.3. Коефицијент рефлексије за антену са 3 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације. ....	13
Слика 2.4.1.4. Дијаграм зрачења антене са 4 директора на централној учестаности, пре оптимизације. ....	13
Слика 2.4.1.5. Коефицијент рефлексије за антену са 4 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације. ....	14
Слика 2.4.1.6. Дијаграм зрачења антене са 5 директора на централној учестаности, пре оптимизације. ....	14
Слика 2.4.1.7. Коефицијент рефлексије за антену са 5 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације. ....	15
Слика 2.4.1.8. Дијаграм зрачења антене са 6 директора на централној учестаности, пре оптимизације. ....	15
Слика 2.4.1.9. Коефицијент рефлексије за антену са 6 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације. ....	16
Слика 2.4.1.10. Дијаграм зрачења антене са 7 директора на централној учестаности, пре оптимизације. ....	16
Слика 2.4.1.11. Коефицијент рефлексије за антену са 7 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације. ....	17
Слика 2.4.1.12. Дијаграм зрачења антене са 8 директора на централној учестаности, пре оптимизације. ....	17
Слика 2.4.1.13. Коефицијент рефлексије за антену са 8 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације. ....	18

Слика 2.4.1.14. Дијаграм зрачења антене са 9 директора на централној учестаности, пре оптимизације.....	18
Слика 2.4.1.15. Коефицијент рефлексије за антену са 9 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.....	19
Слика 2.4.1.16. Дијаграм зрачења антене са 10 директора на централној учестаности, пре оптимизације.....	19
Слика 2.4.1.17. Коефицијент рефлексије за антену са 10 директора у посматраном опсегу учестаности, пре оптимизације.....	20
Слике 2.4.1.18. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 3 директора.....	21
Слика 2.4.1.19. Дијаграм зрачења антене са 3 директора на централној учестаности.....	22
Слика 2.4.1.20. Коефицијент рефлексије за антену са 3 директора у посматраном опсегу учестаности.....	22
Слика 2.4.1.21. Димензије антене са 3 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	22
Слике 2.4.1.22. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 4 директора.....	23
Слика 2.4.1.23. Дијаграм зрачења антене са 4 директора на централној учестаности.....	24
Слика 2.4.1.24. Коефицијент рефлексије за антену са 4 директора у посматраном опсегу учестаности.....	24
Слика 2.4.1.25. Димензије антене са 4 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	24
Слике 2.4.1.26. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 5 директора.....	25
Слика 2.4.1.27. Дијаграм зрачења антене са 5 директора на централној учестаности.....	26
Слика 2.4.1.28. Коефицијент рефлексије за антену са 5 директора у посматраном опсегу учестаности.....	26
Слика 2.4.1.29. Димензије антене са 5 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	26
Слике 2.4.1.30. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 6 директора.....	27
Слика 2.4.1.31. Дијаграм зрачења антене са 6 директора на централној учестаности.....	28
Слика 2.4.1.32. Коефицијент рефлексије за антену са 6 директора у посматраном опсегу учестаности.....	28
Слика 2.4.1.33. Димензије антене са 6 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	28
Слике 2.4.1.34. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 7 директора.....	29
Слика 2.4.1.35. Дијаграм зрачења антене са 7 директора на централној учестаности.....	30
Слика 2.4.1.36. Коефицијент рефлексије за антену са 7 директора у посматраном опсегу учестаности.....	30
Слика 2.4.1.37. Димензије антене са 7 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	30
Слике 2.4.1.38. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 8 директора.....	31
Слика 2.4.1.39. Дијаграм зрачења антене са 8 директора на централној учестаности.....	32
Слика 2.4.1.40. Коефицијент рефлексије за антену са 8 директора у посматраном опсегу учестаности.....	32
Слика 2.4.1.41. Димензије антене са 8 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	32
Слике 2.4.1.42. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 9 директора.....	33
Слика 2.4.1.43. Дијаграм зрачења антене са 9 директора на централној учестаности.....	34
Слика 2.4.1.44. Коефицијент рефлексије за антену са 9 директора у посматраном опсегу учестаности.....	34

Слика 2.4.1.45. Димензије антене са 9 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	34
Слике 2.4.1.46. Ток процеса оптимизације параметара за антену са 10 директора.....	35
Слика 2.4.1.47. Дијаграм зрачења антене са 10 директора на централној учестаности.....	36
Слика 2.4.1.48. Коefицијент рефлексације за антену са 10 директора у посматраном опсегу учестаности.....	36
Слика 2.4.1.49. Димензије антене са 10 директора након процеса оптимизације. Све димензије су у милиметрима.....	36
Слика 2.4.1.50. Графички приказ зависности добитка на централној учестаности од броја директора.....	37
Слика 2.4.1.51. Графички приказ зависности коefицијента рефлексације на централној учестаности од броја директора.....	37
Слика 2.4.2.1. Дизајн диск антене са 5 директора у програмском пакету <i>HFSS</i> .....	38
Слика 2.4.2.2. Димензије диск антене са 5 директора у програмском пакету <i>HFSS</i> .....	38
Слика 2.4.2.3. Дијаграм зрачења антене са 5 директора на централној учестаности $f=2,45$ GHz.....	39
Слика 2.4.2.4. Упоредни приказ дијаграма зрачења антене у поларном дијаграму за главни смер зрачења.....	39
Слика 2.4.2.5. Коefицијент рефлексације за антену са 5 директора добијен у програмском пакету <i>HFSS</i> .....	40
Слика 2.4.2.6. Коefицијент рефлексације за антену са 5 директора у Смитовом дијаграму.....	40
Слика 2.4.2.7. Карактеристична импеданса напојног коаксијалног вода на централној учестаности.....	41
Слика 2.4.2.8. Упоредни приказ дијаграма зрачења добијених из оба програмска пакета.....	42
Слика 2.4.2.9. Упоредни приказ коefицијента рефлексације добијених из оба програмска пакета.....	43
Слика 3.1.1. Приказ прототипа диск антене.....	44
Слика 3.2.1. Упоредни приказ коefицијената рефлексације добијених мерењем и симулацијом.....	45
Слика 3.2.2 Упоредни приказ коefицијента рефлексације добијених мерењем и симулацијом у Смитовом дијаграму.....	45
Слика 3.3.1. Приказ профила почетног положаја предајне антене на носачу и смера ротације носача током мерења у поставци 1.....	46
Слика 3.3.2. Приказ профила почетног положаја предајне антене на носачу и смера ротације носача током мерења у поставци 2.....	47
Слика 3.3.3. Измерени добитак антене 1 за сценарио 1.....	48
Слика 3.3.4. Измерени добитак антене 1 за сценарио 2.....	49
Слика 3.3.5. Измерени добитак антене 1 за сценарио 3.....	49
Слика 3.3.6. Измерени добитак антене 2 за сценарио 1.....	50
Слика 3.3.7. Измерени добитак антене 2 за сценарио 2.....	50
Слика 3.3.8. Измерени добитак антене 2 за сценарио 3.....	51
Слика 3.3.9. Упоредни приказ измерених добитака обе антене за све положаје.....	51
Слика 3.3.10. Упоредни приказ измерених добитака обе антене у положају 1 и добитака добијених рачунарском симулацијом.....	52