

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



Коаксијални колинеарни (CoCo) антенски низ
Дипломски рад

Ментор:
др Слободан Савић, ванредни професор

Кандидат:
Урош Луковић, 2016/0569

Београд, септембар 2023.

Садржај

САДРЖАЈ	I
1. УВОД	1
2. СОСО АНТЕНА	2
2.1. АНТЕНЕ	2
2.2. АНТЕНСКИ НИЗ	2
2.3. СОСО АНТЕНА	3
3. РАЧУНАРСКО МОДЕЛОВАЊЕ АНТЕНЕ	5
3.1. СоСо АНТЕНА ОД ДВА СЕГМЕНТА КОАКСИЈАЛНОГ ВОДА	6
3.2. СоСо АНТЕНА ОД ЧЕТИРИ СЕГМЕНТА КОАКСИЈАЛНОГ ВОДА	7
3.3. СоСо АНТЕНА ОД ШЕСТ СЕГМЕНАТА КОАКСИЈАЛНОГ ВОДА	8
3.4. СоСо АНТЕНА ОД ОСАМ СЕГМЕНАТА КОАКСИЈАЛНОГ ВОДА	9
3.5. СоСо АНТЕНА ОД ДЕСЕТ СЕГМЕНАТА КОАКСИЈАЛНОГ ВОДА	10
3.6. ДИСКУСИЈА	11
4. ИЗРАДА ПРОТОТИПА	14
4.1. МЕРЕЊЕ КОЕФИЦИЈЕНТА РЕФЛЕКСИЈЕ	15
5. ЗАКЉУЧАК	18
ЛИТЕРАТУРА	19
СПИСАК СКРАЋЕНИЦА	20
СПИСАК СЛИКА	21
СПИСАК ТАБЕЛА	22

1. Увод

Телекомуникациона индустрија је последњих деценија остварила велики скок у свом технолошком развоју. Све већи број људи који користи услуге телекомуникационих оператера, хидрометеоролошке и сателитске станице, а у новије време и појава паметних градова и аутомобила чији сензори комуницирају путем радио таласа, само су неки од разлога који су довели до све веће употребе и развоја разних типова антена. Тема овог дипломског рада је коаксијални колинеарни (енгл. Coaxial Colinear - CoCo) антенски низ (у даљем тексту CoCo антена). CoCo антена, коју је осмислио Н. Wheeler [1], а детаљније описали W. L. Ecklund и В. В. Balsley [2] користи се у многим радарским и комуникационим система, као што је мезо-страто-тропосферски (МСТ) радар на Аљасци, који је сачињен од 256 одвојених CoCo антена направљених од коаксијалног кабла [3].

Рад је подељен у неколико поглавља: у другом поглављу ће бити изложен кратак преглед теорије антена, антенских низова и, наравно, CoCo антене. Треће поглавље је посвећено рачунарском моделовању антене, четврто изради прототипа и мерењу истог, а пето закључку.

Дизајн и анализа ове антене урађени су у софтверском пакету WIPL-D Pro v18 [4].

2. *COCO* антена

2.1. Антене

Предајне антене, генерално, обезбеђују прелаз са вођеног таласа на талас у слободном простору, док пријемне антене имају обрнуту улогу – обезбеђују прелаз са слободног електромагнетског таласа на вођени електромагнетски талас. Главни задатак антена је да што већи део енергије која долази од предајника трансформишу у енергију слободног електромагнетског таласа (предајне антене) или да извуку што већи део енергије таласа који наилази и проследи га пријемнику (пријемне антене). На основу теореме реципроцитета, свака антена може радити и као предајна и као пријемна [5].

Основни параметри који описују антене су [6]:

- **Карактеристична функција зрачења** је бездимензиона комплексна функција правца. Она одређује зависност интензитета, фазе и поларизације електричног поља антене од правца.
- **Дијаграм зрачења** представља зависност интензитета електричног поља од сферних координата θ и φ , на сфери великог полупречника r .
- **Директивност** је величина која карактерише усмереност дијаграма зрачења антене и дефинише се као:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\text{интензитет зрачења у посматраном правцу}}{\text{средња вредност интензитета зрачења}}$$

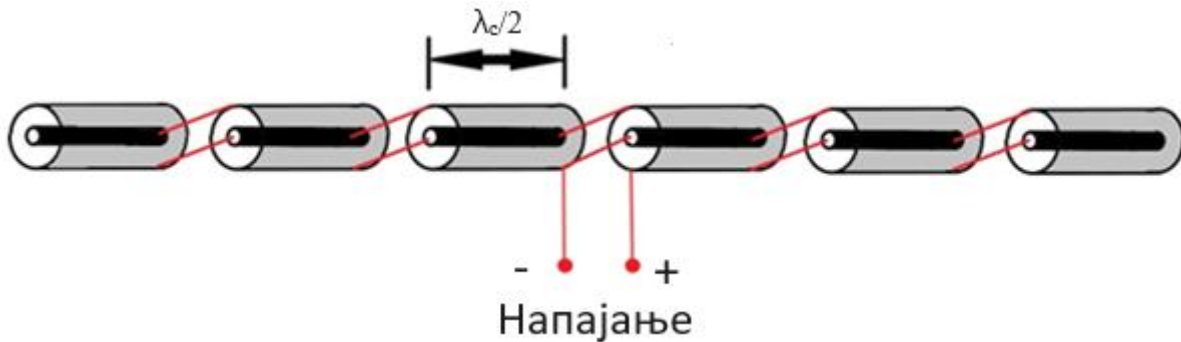
- **Добитак антене** се дефинише као однос интензитета зрачења антене у неком правцу, према максималном интензитету зрачења референте антене, под условом да се обе напајају истом снагом P_0 .
- **Ширина главног снопа** је угао између праваца на којима интензитет зрачења опадне за половину своје максималне вредности (3 dB). Овај параметар је значајан код усмерених антена.

2.2. Антенски низ

Антенски низ је систем сачињен од неколико истих или сличних антена. Осим тога, антенски низ може бити елемент другог антенског низа. Разликујемо неколико категорија антенских низова на основу расподеле елемената. Антенски низ код кога су елементи расподељени дуж једне линије назива се колинеарни, ако су елементи постављени по равној површини добијамо планарни, а у случају да су елементи распоређени по кружници добијамо циркуларни антенски низ. Уколико су сви елементи низа једнаки и налазе се на једнаком растојању и струје свих елемената су исте амплитуде и константног фазног помераја од елемента до елемента, добијамо униформни антенски низ. Повећање усмерености, потискивање зрачења у нежељеним правцима (формирањем нуле у дијаграму зрачења), потискивање бочних листова, и подешавањем ефективних вредности и фаза струја напајања су неки од разлога широке примене антенских низова [6,7].

2.3. CoCo антена

CoCo антена се састоји од низа сегмената коаксијалног вода дужине $\lambda_c/2$, где је λ_c таласна дужина у воду. Суседне секције су електрички везане унакрсним повезивањем суседних елемената на сваком споју, тј. спољашњи и унутрашњи проводник су повезани са унутрашњим и спољашњим проводником, респективно. Таквом везом добијамо да се електромагнетски талас простире и унутар вода и по његовој површини. Модел CoCo антене приказан је на слици 2.1.



Слика 2.1. Модел CoCo антене.

Када струја побуде тече кроз један сегмент коаксијалног вода фаза ће јој се променити за 180° , јер је дужина вода једнака $\lambda_c/2$, али због унакрсног повезивања унутрашњег и спољашњег проводника промениће се за још 180° . Због карактеристичне дужине и специфичног повезивања фаза сваког сегмента је иста. Како се сваки сегмент напаја струјом у фази, тако ће и зрачење сваког елемента у далеком пољу да се сабира у правцу управном на осу низа. Зрачење је омнидирекционо у равни нормалној на осу низа. CoCo антена има само једну тачку напајања, на средини, што представља њену главну предност. Када имамо антенски низ који се састоји од n CoCo антена са n елемената, укупно имамо n^2 дипола који се напајају на n места, док $n \times n$ антенски низ дипола има исти број елемената, n^2 , али и n^2 тачака напајања [8, 9].

На димензије антене утичу: дужина једног сегмента, број сегмената који се користе и растојање између сегмената. Растојање између сегмената најчешће није велико. Прво ће бити анализирана дужина једног сегмента. Таласну дужину можемо одредити применом једначине

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.1)$$

где је c брзина светлости у вакууму ($c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$), а f радна учестаност за коју је антена пројектована. У табели 2.1 је дат приказ дужине једног сегмента CoCo антене у зависности од примене, тј. учестаности, сматрајући да је релативна пермитивност диелектрика 2,1. Веза између таласне дужине у слободном простору и таласне дужине у воду дата је као

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.2)$$

где је ϵ_r релативна пермитивност диелектрика коаксијалног вода.

Показано је да добитак антене расте са порастом броја сегмената, међутим, најбољи однос добитка и дужине антене се остварује када се користе 4 сегмента коаксијалног вода [10].

Табела 2.1. Карактеристике CoCo антене у зависности од примене.

	GSM		UMTS		LTE		Wi-Fi	
Фреквенција [GHz]	0,9	1,8	0,9	2,1	0,8	1,8	2,4	5,0
Таласна дужина у слободном простору [m]	0,333	0,167	0,333	0,143	0,375	0,167	0,125	0,060
Половина таласне дужине у слободном простору [m]	0,167	0,083	0,167	0,071	0,188	0,083	0,063	0,030
Дужина сегмента [m]	0,115	0,058	0,115	0,049	0,129	0,058	0,043	0,021

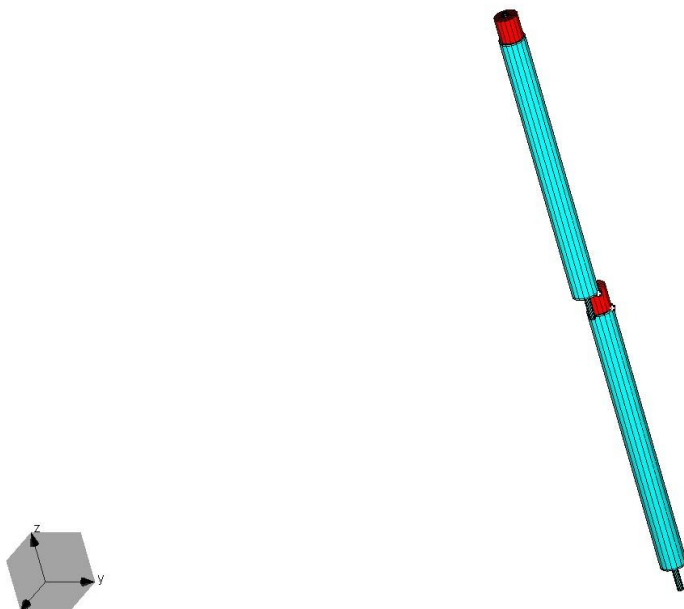
3. Рачунарско моделовање антене

Антиена ће бити пројектована за Wi-Fi фреквенцијски опсег, што значи да ће централна учестаност бити 2,4 GHz. За израду антене биће искоришћен полусавитљив коаксијални вод RG-402, са тефлоном као диелектриком, чија је релативна пермитивност $\epsilon_r = 2,1$. Коаксијални вод ће радити у режиму униформног колонеарног низа полуталасних дипола нападаних у фази [8]. Дужина једног сегмента, по формулама (2.1) и (2.2), је 42 mm, а полупречник унутрашњег и спољашњег проводника су 0,455 mm и 1,79 mm, респективно.

Сада када смо одредили димензије једног сегмента, можемо у програму WIPL-D креирати модел који ће бити експлоатисан ради утврђивања потребних параметара за прављење антене.

Направљен је модел у коме је анализирана СоСо антиена са 2, 4, 6, 8 и 10 елемената и са различитим растојањима између суседних елемената, из опсега од 2 mm до 10 mm са кораком од 2 mm. Кључни параметри по којима смо поредили резултате су били модул улазног коефицијента рефлексije у dB и коефицијент рефлексije у Smith-овом дијаграму.

На слици 3.1. приказан је почетни модел СоСо антене, сачињен од 2 сегмента коаксијалног вода.



Слика 3.1. Основни модел СоСо антене у софтверском пакету WIPL-D.

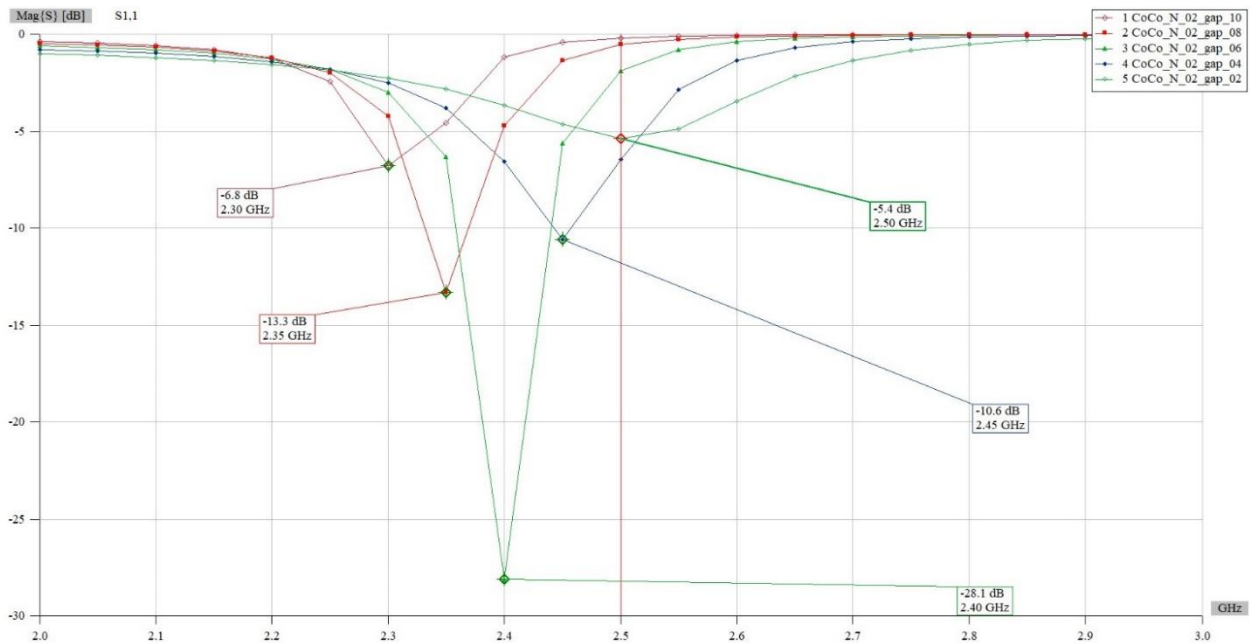
Овом приликом учињена је мала модификација. Са доње стране сегмента унутрашњи проводник је продужен за дужину која одговара размаку између суседних сегмената. Такође, за исто растојање са горње стране сегмента продужени су диелектрик и унутрашњи

проводник. Тиме смо добили да се веза између сегмената остварује, директно, повезивањем проводника коаксијалног вода.

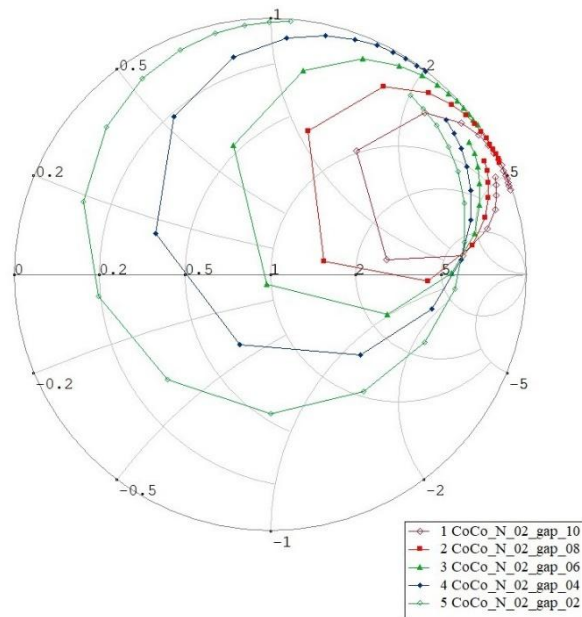
3.1. СоСо антена од два сегмента коаксијалног вода

У овом делу ће бити приказани резултати СоСо антене која се састоји од два сегмента коаксијалног вода. Укупна дужина антене је од 94 mm до 108 mm.

На слици 3.2 је приказана зависност модула улазног коефицијента рефлексије симулиране СоСо антене за различита растојања између елемената. Можемо приметити да је, по питању модула улазног коефицијента рефлексије, антена са међусобним размаком сегмената од 6 mm доста добро прилагођена са коефицијентом рефлексије од -28,1 dB на централној учестаности која је једнака пројектованој. Антене са осталим размацима имају минимум коефицијента рефлексије на учестаностима блиским пројектованој централној учестаности.



Слика 3.2. Модул улазног коефицијента рефлексије за СоСо антену са 2 сегмента.

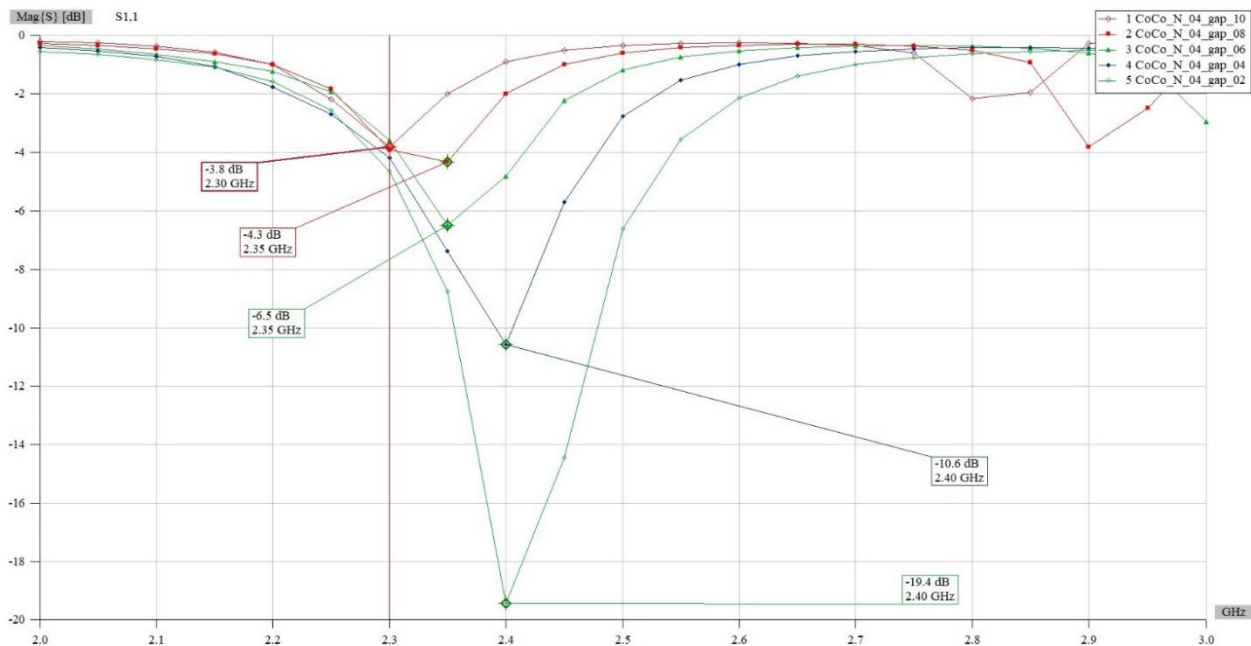


Слика 3.3. Улазни коефицијент рефлексије за CoCo антену са 2 сегмента приказан у Smith - овом дијаграму.

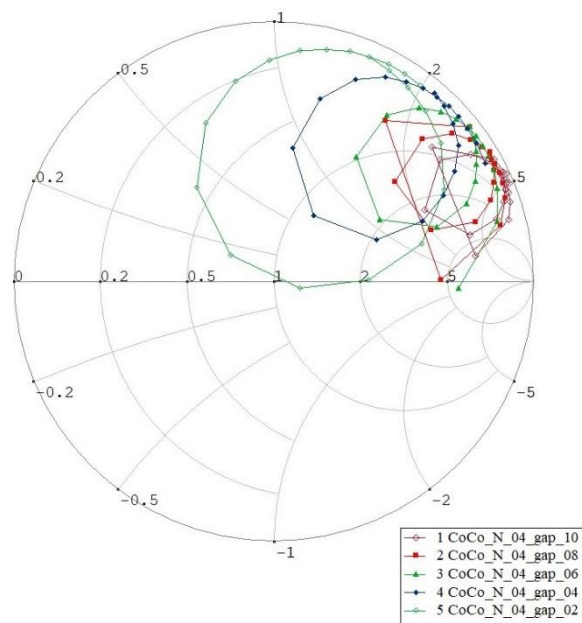
3.2. CoCo антена од четири сегмента коаксијалног вода

У овом делу ће бити приказани резултати за CoCo антену која се састоји од четири сегмента коаксијалног вода. Укупна дужина антене је од 184 mm до 224 mm.

На слици 3.4 је приказана зависност модула улазног коефицијента рефлексије симулиране CoCo антене за различита растојања између елемената. Можемо приметити да антена, са размаком између суседних сегмената од 2 mm, остварује минимум модула коефицијента рефлексије на 2,4 GHz чија је вредност од -19,4 dB. Такође, и антена са размаком између суседних сегмената од 4 mm минимум модула коефицијента рефлексије има на 2,4 GHz који износи -10,6 dB. Резултати за остале приказане моделе показују лошије перформансе.



Слика 3.4. Модул улазног коефицијента рефлексије за CoCo антену са 4 сегмента.

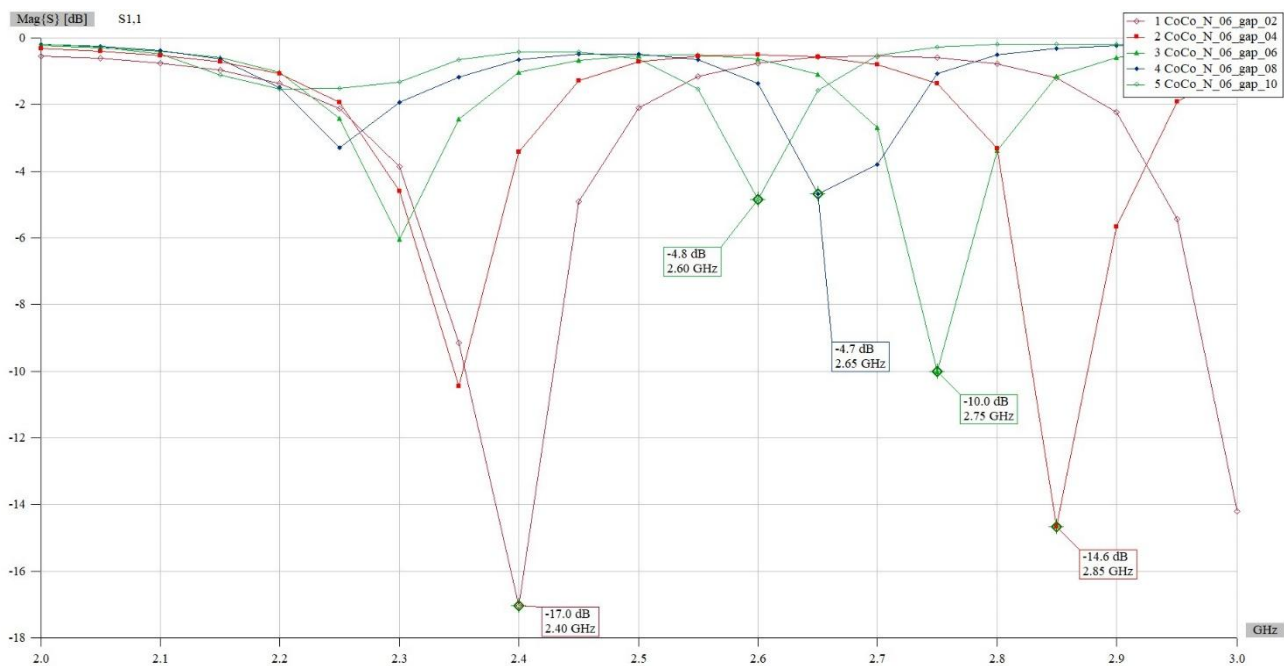


Слика 3.5. Улазни коефицијент рефлексије за CoCo антену са 4 сегмента приказан у Smith - овом дијаграму.

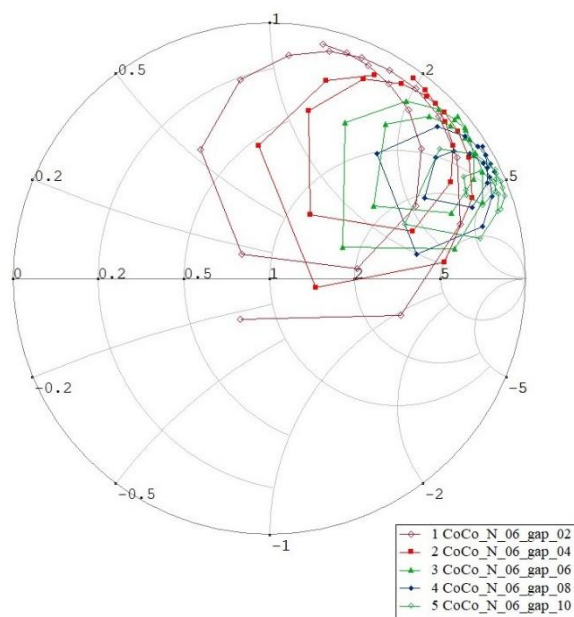
3.3. CoCo антена од шест сегмената коаксијалног вода

У овом делу ће бити приказани резултати CoCo антене која се састоји од шест сегмената коаксијалног вода. Укупна дужина антене је од 274 mm до 330 mm.

На слици 3.6 је приказана зависност модула улазног коефицијента рефлексије симулиране CoCo антене за различита растојања између елемената. У овом скупу модела, антена са размаком између сегмената од 2 mm достиже минимум на 2,4 GHz и он износи -17 dB. Остали модели антена имају лошије перформансе.



Слика 3.6. Модул улазног коефицијента рефлексије за CoCo антену са 6 сегмената.

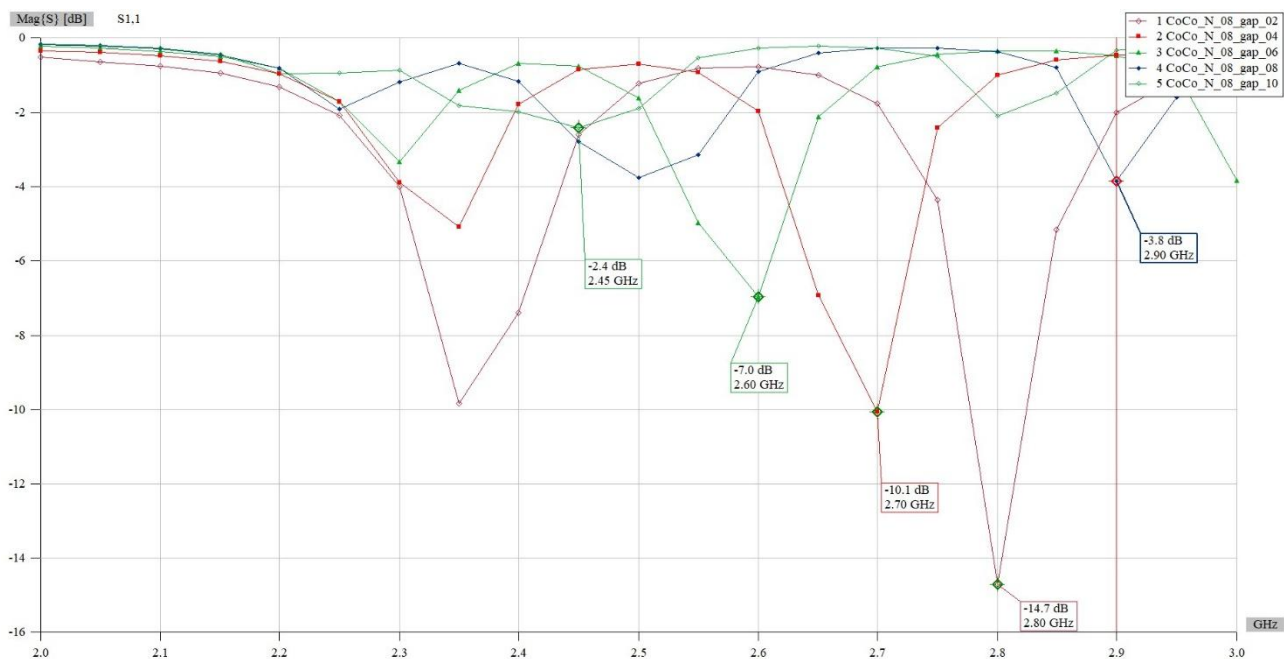


Слика 3.7. Улазни коефицијент рефлексије за CoCo антену са 6 сегмената приказан у Smith - овом дијаграму.

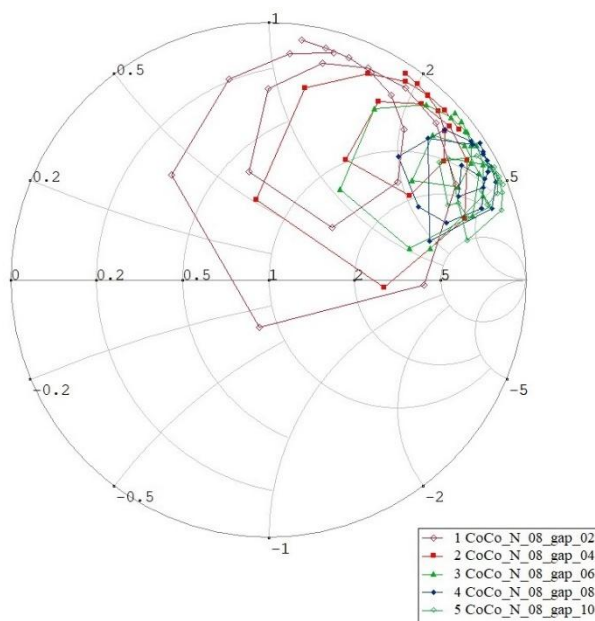
3.4. CoCo антена од осам сегмената коаксијалног вода

У овом делу ће бити приказани резултати CoCo антене која се састоји од осам сегмената коаксијалног вода. Укупна дужина антене је од 364 mm до 436 mm.

На слици 3.8 је приказана зависност модула улазног коефицијента рефлексије симулиране CoCo антене за различита растојања између елемената. Појава која се десила и код модела са шест елемената овде је још више дошла до изражаја. Наиме, на већини модела централна учестаност је нешто виша од номиналне, чак код неких модела може се приметити да је на две, или више, учестаности минимум достигао запажене резултате.



Слика 3.8. Модул улазног коефицијента рефлексије за CoCo антену са 8 сегмената.

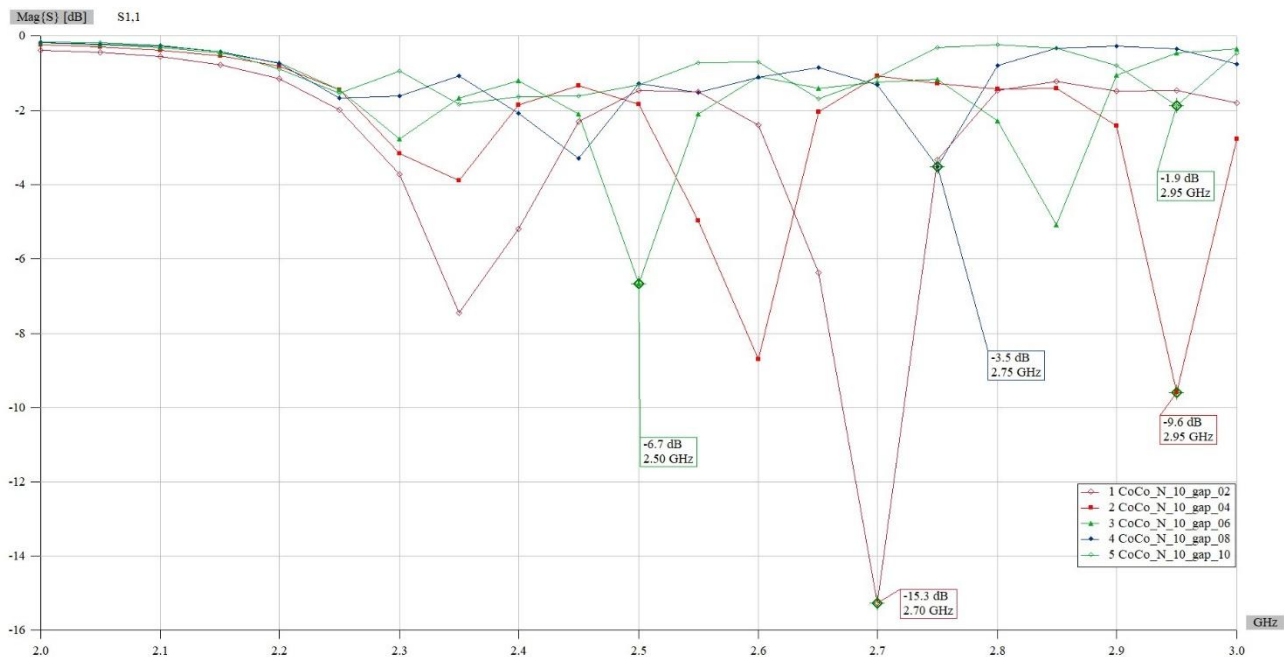


Слика 3.9. Улазни коефицијент рефлексије за CoCo антену са 8 сегмената приказан у Smith - овом дијаграму.

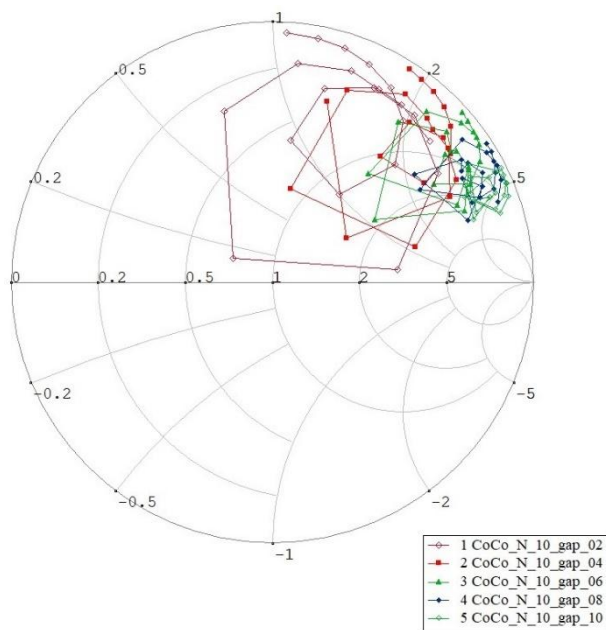
3.5. CoCo антена од десет сегмената коаксијалног вода

У овом делу ће бити приказани резултати CoCo антене која се састоји од десет сегмената коаксијалног вода. Укупна дужина антене може бити од 452 mm до 542 mm.

На слици 3.10 је приказана зависност модула улазног коефицијента рефлексије симулиране CoCo антене за различита растојања између елемената. Можемо приметити да не добијемо одговарајуће резултате и да нам ниједан модел није прилагођен на номиналну учестаност од 2,4 GHz.



Слика 3.10. Модул улазног коефицијента рефлексије за CoCo антену са 10 сегмената.



Слика 3.11. Улазни коефицијент рефлексије за CoCo антену са 10 сегмената приказан у Smith - овом дијаграму.

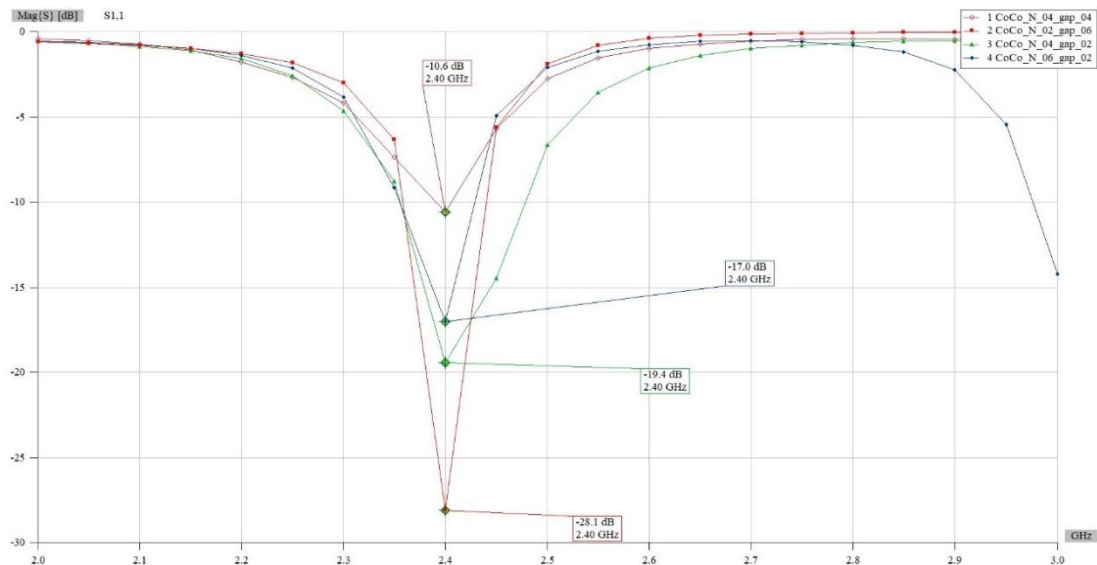
3.6. Дискусија

Из свих рачунарских симулација, издвојени су резултати и изабрано је неколико модела који су упоредно посматрани, да би се закључило који је најбољи кандидат за израду. То су следећи модели:

- CoCo антена са 2 елемента и међусобним размаком од 6 mm
- CoCo антена са 4 елемента и међусобним размаком од 2 mm
- CoCo антена са 4 елемента и међусобним размаком од 4 mm

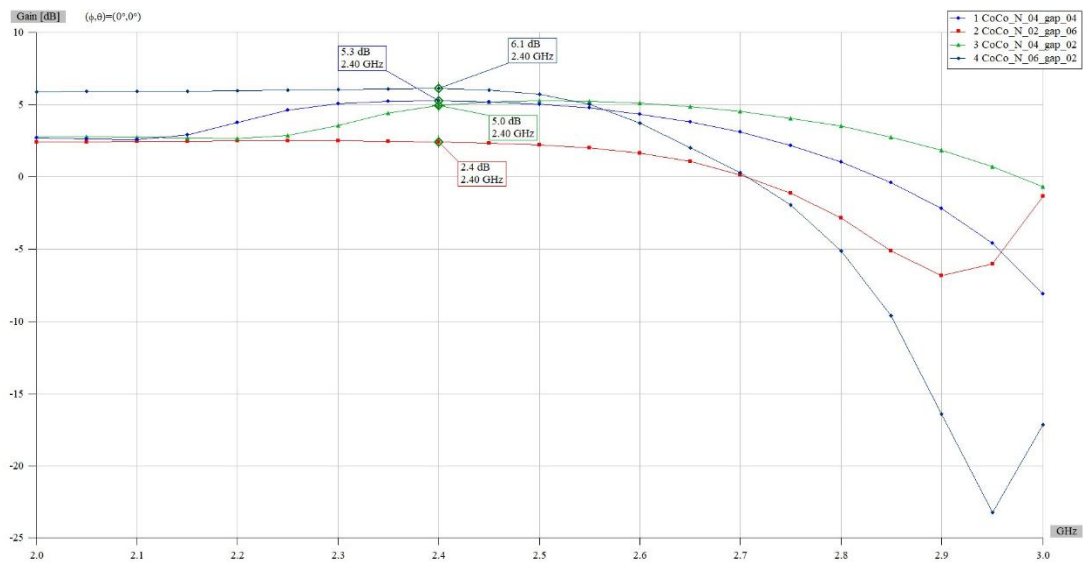
- СоСо антена са 6 елемената и међусобним размаком од 2 mm

На слици 3.12 је приказана зависност модула улазног коефицијента рефлексије наведених антена.



Слика 3.12. Модул улазног коефицијента рефлексије пробраних модела.

На слици 3.13 је приказана зависност добитка у правцу главног зрачења од учестаности наведених антена.



Слика 3.13. Зависност добитка од учестаности код пробраних модела.

Како сви одабрани модели антена имају задовољавајуће вредности по питању коефицијента рефлексије, у обзир треба узети још неколико параметара, а то су димензије антене, добитак антене и комплексност израде.

СоСо антена са 2 сегмента и размаком између сегмената од 6 mm има најбољу вредност модула улазног коефицијента рефлексије од -28,1 dB. Остварени добитак ове антене износи 2,4 dB у правцу нормалном на осу низа. Поред лошег добитка, недостатак овог модела је и комплексност израде. Са слике 3.2, видимо да уколико дође до грешке у изради, због несавршености алата којим се вод сече, модул улазног коефицијента рефлексије расте.

CoCo антена од 6 сегмената са размаком између сегмената од 2 mm, има задовољавајућу вредност модула улазног коефицијента рефлексије (-17,0 dB) и најбољи добитак од 6,1dB. Међутим због комплексности израде и највеће дужине, која је 274 mm, није погодна за израду.

CoCo антена од 4 сегмента са размаком између сегмената од 2 mm има бољи модул улазног коефицијента рефлексије (-19,4 dB) од антене са размаком 4 mm (-10,6 dB), али има мањи пропусни опсег, што нам може представљати проблем јер при изради може доћи до померања централне учестаности. Антена са размаком 4 mm остварила мало бољи добитак (5,3 dB) него антена са размаком 2 mm (5,0 dB).

Из наведених разлога, за израду прототипа је искоришћен модел са 4 сегмента и размаком између суседних елемената од 4 mm.

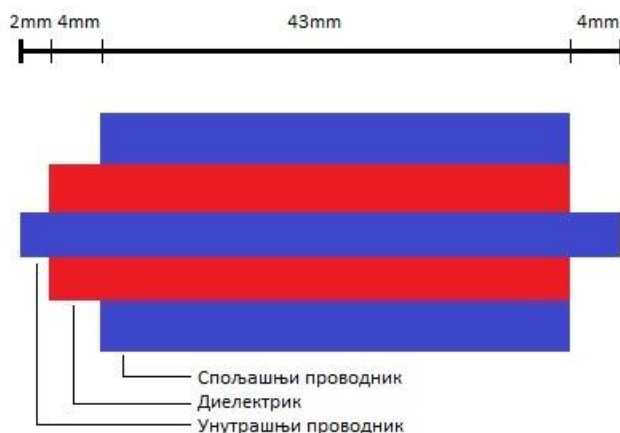
4. Израда прототипа

Након завршених рачунарских симулација које су помогле при одабиру оптималног решења, направљена је антена у Лабораторији за основе електротехнике Електротехничког факултета (слика 4.1). Најбоље резултате је дала симулирана антена са четири елемента и растојањем између елемената од 4 mm, што је и искоришћено за пројектовање.



Слика 4.1. Прототип антене.

Попречни пресек једног сегмента пројектоване антене је приказан на слици 4.2. Са слике се може видети да је дужина сегмента пројектоване антене 53 mm.



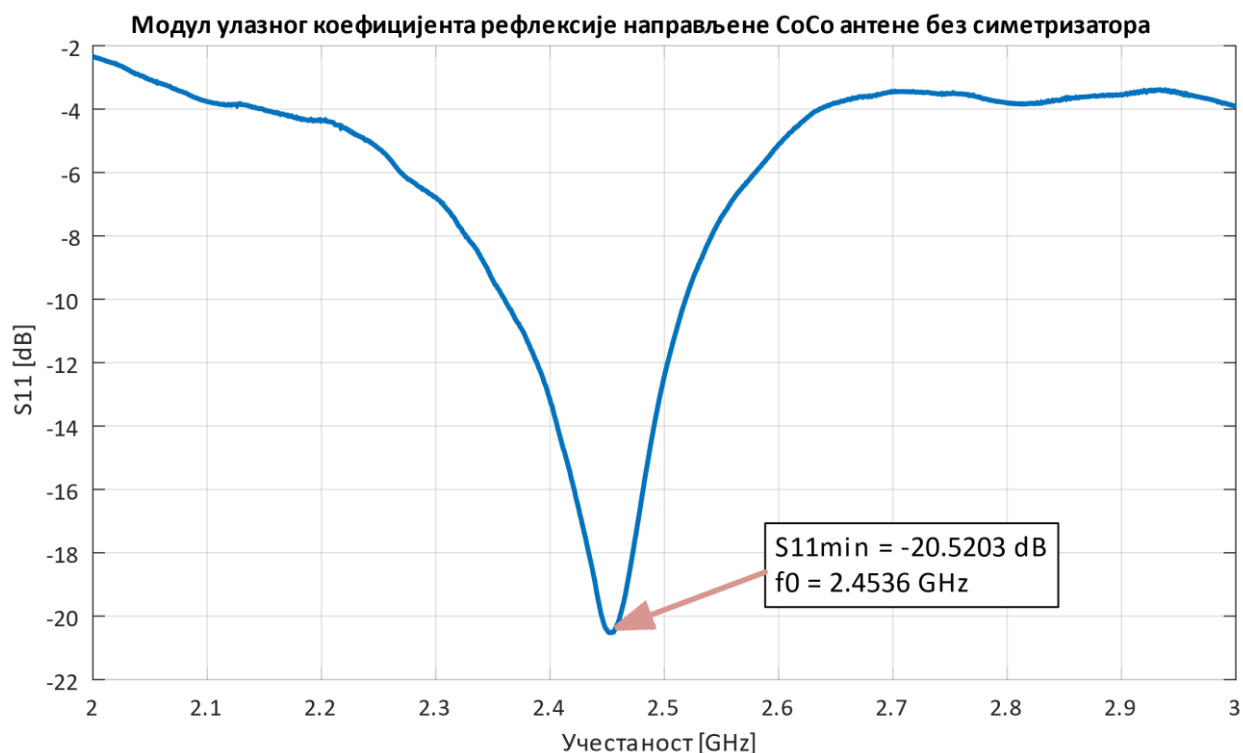
Слика 4.2. Попречни пресек сегмента пројектоване антене.

Димензије израђене антене су за нијансу веће од теоријских, ради обезбеђивања маргине за грешку приликом израде. Сваки сегмент је ручно исечен и припремљен за повезивање, које је спроведено лемљењем. Такође, скинут је спољашњи изолатор ради лакшег лемљења.

Након повезивања сва четири елемента, антена је показала задовољавајућу крутост па није било потребе да се конструкција прототипа додатно учвршћује помоћу материјала, који не би утицали значајније на расподелу струје у антени.

4.1. Мерење коефицијента рефлексije

Као што је у уводу наведено, за мерење параметара антене, коришћен је анализатор мрежа *Agilent N5227A*. Наравно, пре самог мерења урађена је *SOLT* (енг. *Short Open Load Through*) једноприступна калибрација уређаја.

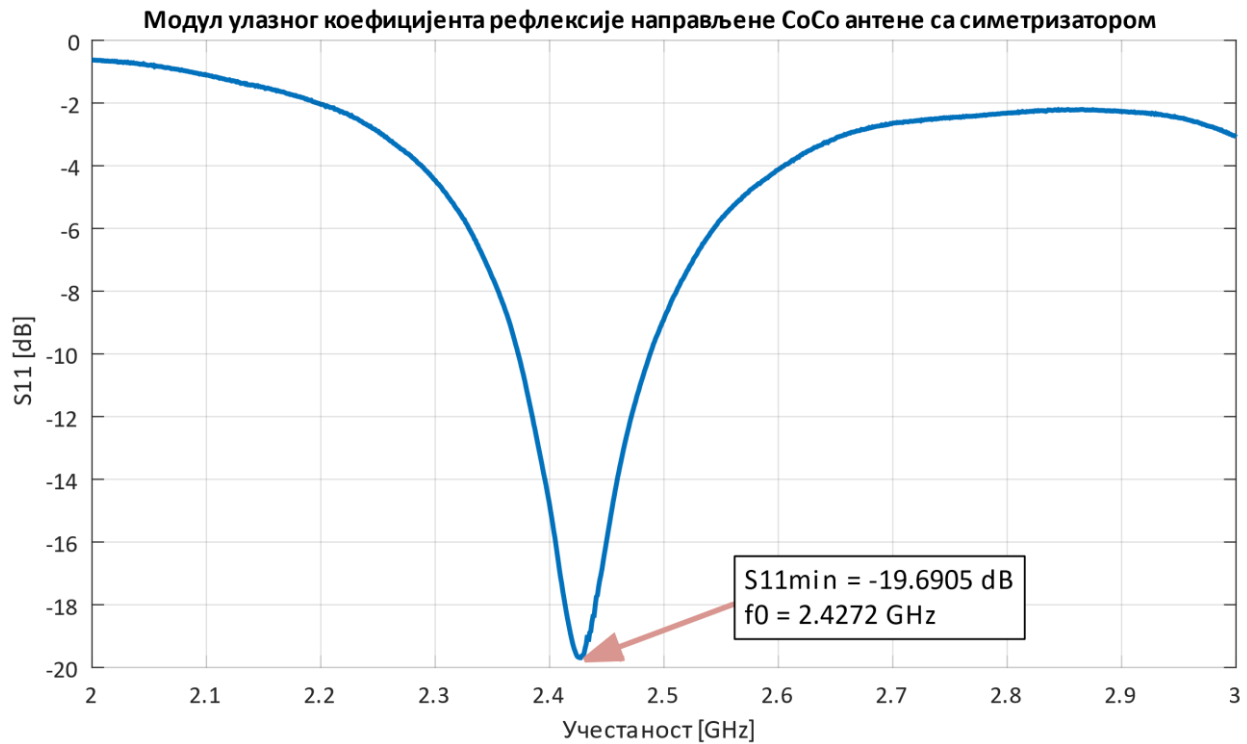


Слика 4.3. Модул улазног коефицијента рефлексије СоСо прототипа без симетризатора

Добијени модул улазног коефицијента рефлексије приказан је на слици 4.3. Видимо да постоји благо одударање од номиналне централне учестаности.

Добијена крива је показала одређену нестабилност приликом померања антене, и преласком руке преко кабла који повезује антену и анализатор па је као решење тог проблема реализовано унапређење прототипа у виду додавања симетризатора.

Симетризатор или балун је електронски уређај или коло које врши прелазак са балансираног система на небалансирани, и обрнуто. На пример, када се симетрична антена, која би требала да се напаја двојичним водом, повезује на генератор који има коаксијални излаз, захтева се употреба симетризатора. Употреба симетризатора у овом случају решава проблем паразитских струја по спољашњости коаксијалног вода које би довеле до тога да и он почне да зрачи [5].



Слика 4.4. Модул улазног коефицијента рефлексије СоСо прототипа са симетризатором

На слици 4.4 је приказан коефицијент рефлексије након додавања симетризатора. Тиме су уклоњене сметње које су биле уочене раније и померање централне учестаности ка дефинисаној вредности од 2,4 GHz . На слици 4.4 такође видимо да је у целом опсегу од интереса коефицијент рефлексије задовољавајући. Под опсегом од интереса подразумевамо да је коефицијент рефлексије у опсегу од 2,37 до 2,48 GHz.

5. Закључак

У овом раду је пројектован и направљен CoCo антенски низ за рад у Wi-Fi 2,4 GHz фреквенцијском опсегу. Почевши од теоријске анализе CoCo антене, преко рачунарских симулација, дошло се до адекватног модела, чији је прототип успешно израђен и тестиран.

Параметри антене су установљени кроз велики број симулација у којима су циљни критеријуми били коефицијент рефлексije и добитак. Као компромисно решење између наведених критеријума и димензија антене, изабран је модел са четири елемента и растојањем између елемената од 4 mm.

Израђени прототип антене је премерен на анализатору мрежа, при чему су резултати добијени мерењем били задовољавајући. Ради унапређења стабилности карактеристике коефицијента рефлексije, на прототип антене успешно је додат симетризатор. Након свих додатих унапређења, коефицијент рефлексije CoCo антене на учестаности 2,4272 GHz износи -19,6905 dB.

Теме започете у оквиру овог дипломског рада могле би се проширити фазираним антенским низовима.

Литература

- [1] H. Wheeler, "A vertical antenna made of transposed sections of coaxial cable," 1958 IRE International Convention Record, New York, NY, USA, 1956, pp. 160-164, doi: 10.1109/IRECON.1956.1150466.
- [2] B. Balsley and W. Ecklund, "A portable coaxial collinear antenna," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 20, no. 4, pp. 513-516, July 1972, doi: 10.1109/TAP.1972.1140233.
- [3] B. B. Balsley, W. L. Ecklund, D. A. Carter and P. E. Johnston, "The MST radar at poker flat, Alaska," in Radio Science, vol. 15, no. 2, pp. 213-223, March-April 1980, doi: 10.1029/RS015i002p00213.
- [4] WIPL-D, WIPL-D Pro v18, <https://wipl-d.com/products/wipl-d-pro/>
- [5] A. Đorđević, D. Tošić, Mikrotalasna tehnika, 1. izdanje, Akademska misao, Beograd, 2006.
- [6] M. B. Dragović, Antene i prostiranje radio talasa – 3. izdanje, Akademska misao, 2003.
- [7] A. Đorđević, Elektromagnetika, 2. izdanje, Akademska misao, Beograd, 2012
- [8] Notaroš, Branislav M., Miroslav Djordjević, and Zoya Popović. "Generalized CoCo Antennas.
- [9] T. Judasz, W. Ecklund and Ben Balsley, "The coaxial collinear antenna: Current distribution from the cylindrical antenna equation," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 35, no. 3, pp. 327-331, March 1987, doi: 10.1109/TAP.1987.1144095.
- [10] Q. Wang, X. -L. Yang, Y. -T. Li, Z. -B. Li and S. -T. Chen, "Design of a high gain and low sidelobe coaxial collinear antenna array," 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), Chengdu, China, 2011, pp. 26-28, doi: 10.1109/ICCP.2011.6092208.

Списак скраћеница

COCO	Coaxial Colinear
SOLT	Short Open Load Through

Списак слика

Слика 2.1. Модел СоСо антене.	3
Слика 3.1. Основни модел СоСо антене у софтверском пакету WIPL-D.....	5
Слика 3.2. Модул улазног коефицијента рефлексije за СоСо антену са 2 сегмента.	6
Слика 3.3. Улазни коефицијент рефлексije за СоСо антену са 2 сегмента приказан у Smith - овом дијаграму.	7
Слика 3.4. Модул улазног коефицијента рефлексije за СоСо антену са 4 сегмента.	8
Слика 3.5. Улазни коефицијент рефлексije за СоСо антену са 4 сегмента приказан у Smith - овом дијаграму.	8
Слика 3.6. Модул улазног коефицијента рефлексije за СоСо антену са 6 сегмената.	9
Слика 3.7. Улазни коефицијент рефлексije за СоСо антену са 6 сегмената приказан у Smith - овом дијаграму.	9
Слика 3.8. Модул улазног коефицијента рефлексije за СоСо антену са 8 сегмената.	10
Слика 3.9. Улазни коефицијент рефлексije за СоСо антену са 8 сегмената приказан у Smith - овом дијаграму.	10
Слика 3.10. Модул улазног коефицијента рефлексije за СоСо антену са 10 сегмената.	11
Слика 3.11. Улазни коефицијент рефлексije за СоСо антену са 10 сегмената приказан у Smith - овом дијаграму.	11
Слика 3.12. Модул улазног коефицијента рефлексije пробраних модела.	12
Слика 3.13. Зависност добитка од учестаности код пробраних модела.	12
Слика 4.1. Прототип антене.	14
Слика 4.2. Попречни пресек сегмента пројектоване антене.	15
Слика 4.3. Модул улазног коефицијента рефлексije СоСо прототипа без симетризатора.....	16
Слика 4.4. Модул улазног коефицијента рефлексije СоСо прототипа са симетризатором.....	17

Списак табела

Табела 2.1. Карактеристике СоСо антене у зависности од примене.	4
--	---