

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на X седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду, одржаној 12.09.2018. године, одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације

*„Асиметрични резонатори као елементи јединичних ћелија  
једнодимензионалних метаматеријала“,*

кандидата Војислава Милошевића, након прегледа дисертације подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Биографски подаци

Војислав Милошевић је рођен 5.4.1986. у Београду, где је похађао основну школу и након ње Математичку гимназију, коју је завршио 2005. године. Током школовања био је добитник више награда на националним такмичењима из физике и математике. По завршетку средње школе уписао је основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, одсек за Телекомуникације, смер Микроталасна техника. Током студија био је стипендиста Републичке фондације за младе таленте. Основне студије завршио је 2009. године са просечном оценом 9,09, након чега је започео дипломске-мастер студије на истом факултету, модул Микроталасна техника, које је окончао 2012. године са просечном оценом 9,57. Исте године уписао је докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер Квантна оптика и ласери.

На Институту за физику запослен је од 01.01.2010. године. Био је ангажован на следећим пројектима финансираним од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја

- TP-11009 «Дуал-банд и три-банд микроталасна кола и антене базирани на метаматеријалима за комуникационе системе нове генерације» (2008 – 2010. године)
- TP-32024 «Реконфигурабилне, мултибанд и скениране антене на бази метаматеријала за бежичне комуникационе системе и сензоре» (од 2011. г.)
- ИИИ-045016 «Генерисање и карактеризација нанофотонских функционалних структура у биомедицини и информатици» (од 2011. г.)

Такође је учествовао на три пројекта билатералне сарадње

- PRI-AIBSE-2011-1119 «Reconfigurable and Multiband Devices and Antennas Based on Innovative Metamaterial Concepts» (Универзитет у Севиљи, Шпанија, 2011 – 2012. г.)
- 5G-MultiScan «Advanced Multi-Beam and Scanning Antennas for 5G and Radar Applications» (Технички универзитет у Карлсруеу, Немачка, 2018 – 2019. г.)
- «Површином подстакнута Раманова спектроскопија као метода праћења концентрације неорганичких нутријената у морској води» (Институт за биологију мора, Котор, Црна Гора, 2016 – 2018. г.)

Као аутор или коаутор има четири рада у међународним часописима (од тога два категорије M21), 34 цитата према бази SCOPUS, преко двадесет учешћа на домаћим (M63) и

међународним конференцијама (M33), и четири техничка решења категорије M85. Такође је први аутор поглавља објављеног у међународној монографији M14.

Војислав Милошевић добитник је награде „Проф. Александар Маринчић“ 2013. године за најбољи рад у области микроталасне технике, технологије и система. Добитник је награде за најбољи студентски рад у својој области на конференцији ЕТРАН 2013. и ЕТРАН 2017. године.

## 2. Опис тезе

### 2.1. Тема и циљеви

Метаматеријали представљају вештачке композитне структуре са електромагнетским карактеристикама које се не могу наћи у природи, као што су негативан индекс преламања, индекс преламања близак нули или пак велике вредности пермеабилности или пермитивности. Њихове карактеристике су превасходно последица њихове метално-диелектричне структуре, а не хемијског састава материјала од кога су састављени. Због јединичних ћелија које су знатно мање од таласне дужине понашају се као ефективно хомогена средина. Типично се реализују периодичним понављањем минијатуризованих резонантних елемената, и омогућавају контролу ефективних параметара (индекс преламања, диелектрична пермитивност, магнетна пермеабилност, таласна импеданса) у одређеним границама, због чега су погодни за различите примене у микроталасној техници и оптици.

Посебну класу представљају једнодимензионални метаматеријали за вођење електромагнетних таласа, базирани на трансмисионим водовима или таласоводима. Они омогућавају измену особина вођеног таласа, што је основа њихове примене у многим практичним микроталасним склоповима као што су филтри, мреже за прилагођење, померачи фазе, антене итд.

Циљ истраживања био је реализација једнодимензионалних метаматеријала са асиметричним резонатором, као и развој метода за њихову карактеризацију и моделовање. Испитиване су могућности њихове практичне примене. Под асиметричним резонаторима подразумевају се они који не поседују централну равну симетрије. Показано је да се у таквим резонаторима могу побудити додатни резонантни модови у односу на симетричан случај.

### 2.2. Садржај и резултати

Докторска теза „Асиметрични резонатори као елементи јединичних ћелија једнодимензионалних метаматеријала“ Војислава Милошевића написана је на 134 стране, садржи 6 поглавља и 94 референце.

Прво поглавље дефинише основне појмове и даје преглед области. У другом поглављу разматра се теорија хомогенизације и карактеризација поступком екстракције ефективних параметара из симулираних или мерених параметара расејања. Показано је како се присуство асиметрије може моделовати помоћу бианизотропног диелектрика. Валидност поступка екстракције потврђена је инверзним поступком, где је симулиран трансмисиони вод урођен у диелектрик одговарајућих параметара. За разлику од класичног поступка (Николсон-Рос-Вир) где је могуће реконструисати само средњу вредност рефлексије, предложена метода омогућава реконструкцију свих параметара расејања [1, 3].

Треће поглавље посвећено је моделовању јединичних ћелија метаматеријала који се састоје од трансмисионих водова спрегнутих са сплит-ринг резонаторима са различитим положајем

процепа, помоћу еквивалентних електричних шема са концентрисаним параметрима. Показано је како се асиметрија може укључити комбиновањем електричне и магнетне спреге. Главни допринос истраживања приказаних у овој глави су предложене измене топологије еквивалентних шема, које драстично проширују фреквенцијски опсег њиховог важења, без повећавања броја непознатих параметара. Такође су дати аналитички изрази који повезују параметре шема са одређеним карактеристичним учестаностима, који се могу искористити за директно одређивање ових параметара, без потребе за нумеричком оптимизацијом [2].

Четврто поглавље демонстрира примену теорије спрегнутих водова за анализу расејања у јединичним ћелијама метаматеријала. Помоћу ње изведени су апроксимативни аналитички облици спектра расејања, који су упоређени са резултатима апроксимације помоћу еквивалентних шема. Показано је да су ова два приступа еквивалентна у ужем фреквенцијском опсегу у околини резонанси [7].

Пето поглавље представља класичну аналогију електромагнетно-индуковане транспаренције (ЕИТ). Разматра се формална аналогија елемената матрице густине у квантном систему са три нивоа са класичним спрегнутим осцилаторима. Дати су примери реализације класичног ЕИТ-а у микроталасним метаматеријалима на бази трансмисионих водова [4]. Напоследку, показује се како се теорија спрегнутих модова може искористити за анализу овог ефекта.

Методе проучаване у поглављима 2 – 5 су примењене за карактеризацију јединичних ћелија које се састоје од планарног микрострип вода спрегнутог са резонаторима типа прстена са процепом (сплит-ринг). Одређен број ових структура је фабрикован и експериментално карактерисан на анализатору мрежа. Једна од примена испитиваних јединичних ћелија реализована је у оквиру исте групе.<sup>1</sup> Закључци, изведени из истраживања у оквиру ове дисертације, сумирани су у шестом поглављу.

### 2.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси су верификовани у следећим публикацијама:

Часописи категорије M21

- [1] V. Milosevic, B. Jokanovic, and R. Bojanic, "Effective Electromagnetic Parameters of Metamaterial Transmission Line Loaded With Asymmetric Unit Cells," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 8, pp. 2761–2772, Aug. 2013. (ISSN: 0018-9480, IF: 2,943, 11 цитата према бази SCOPUS) (Награда „Проф. Александар Маринчић”)
- [2] R. Bojanic, V. Milosevic, B. Jokanovic, F. Medina-Mena, and F. Mesa, "Enhanced Modelling of Split-Ring Resonators Couplings in Printed Circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 8, pp. 1605–1615, Aug. 2014. (ISSN: 0018-9480, IF: 2,243, 16 цитата према бази SCOPUS)

Остали часописи

- [3] V. Milosevic, B. Jokanovic, and R. Bojanic, "Retrieval and validation of the effective constitutive parameters of bianisotropic metamaterials," *Physica Scripta*, vol. 2014, no. T162, p. 014046, 2014. (ISSN: 0031-8949)

---

<sup>1</sup> N. Boskovic, B. Jokanovic, and M. Radovanovic, "Printed Frequency Scanning Antenna Arrays With Enhanced Frequency Sensitivity and Sidelobe Suppression," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 1757–1764, Apr. 2017.

- [4] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, B. Jelenkovic, "Classical Electromagnetically Induced Transparency in Metamaterials", *Microw. Rev.*, vol. 19, br. 2, pp. 76-81, 2013.
- [5] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, "Reconfigurable Delay Lines with Split-Ring Resonators", *Microw. Rev.*, vol. 17, br. 2, pp. 7-12, 2011.
- [6] B. Jokanovic, R. H. Geschke, T. S. Beukman, V. Milosevic, "Metamaterials: Characteristics, design and microwave applications", *SAIEE Africa Research Journal*, Vol. 10, No. 3, Sept. 2010, pp. 82-91, ISSN 1991-1696.

Саопштења са конференција штампана у целини

- [7] В. Милошевић, Б. Јокановић, "Параметри расејања за вод спрегнут са асиметричним резонаторима," ЕТРАН 2017. (Најбољи студентски рад у секцији Микроталасна и милиметарска техника).
- [8] В. Милошевић, Р. Бојанић, Б. Јокановић, "Анализа антисиметричних сплит-ринг резонатора спрегнутих са водом помоћу парног и непарног мода," ЕТРАН 2016.
- [9] V. Milosevic, B. Jokanovic, G. Isic, "Coupled-mode Theory Approach for Analysis of Resonant Transmission Line", *Metamaterials* 2015.
- [10] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, "Analytical Model of Transmission Line Metamaterial with Asymmetrically Coupled Split-Ring Resonators", *Metamaterials* 2014.
- [11] R. Bojanic, B. Jokanovic, V. Milosevic, "Enhanced Modelling of Asymmetric Split-Ring-Resonators in Printed Circuits", *Metamaterials* 2014.
- [12] Е. Петронијевић, Б. Јокановић, В. Милошевић, "Електромагнетски индикована транспаренција у асиметричној структури сплит-ринг резонатора у таласоводу", ЕТРАН 2014.
- [13] В. Милошевић, Б. Јокановић, Р. Бојанић, "Аналитичко моделовање коефицијента трансмисије на воду спрегнутом са сплит-ринг резонатором", ЕТРАН 2014.
- [14] Р. Бојанић, В. Милошевић, Б. Јокановић, Ф. Medina, Ф. Mesa, "Моделовање асиметричног сплит-ринг резонатора спрегнутог са микрострип водом помоћу еквивалентне шеме", ЕТРАН 2014.
- [15] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, "Effective Bianisotropic Parameters of Metamaterial Transmission Line", *Metamaterials* 2013.
- [16] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, "Retrieval and validation of the effective constitutive parameters of bianisotropic metamaterials", *Photonica* 2013.
- [17] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, "Tuning EIT-Like Response in Cross Coupled SRRs", *Telsiks* 2013.
- [18] В. Милошевић, Б. Јокановић, Р. Бојанић, "Валидација екстрахованих параметара за асиметричне јединичне ћелије метаматеријала", ЕТРАН 2013. (Најбољи студентски рад у секцији Микроталасна и милиметарска техника).
- [19] Р. Бојанић, Б. Јокановић, В. Милошевић, Ф. Medina, Ф. Mesa, "Еквивалентна шема микрострип вода оптерећеног сплит ринг резонатором са различитим положајем процепа", ЕТРАН 2013.
- [20] R. Bojanic, B. Jokanovic, V. Milosevic, "On the orientation of split-ring resonators excited by guided waves", *Metamaterials* 2012.
- [21] V. Milosevic, B. Jokanovic, R. Bojanic, B. Jelenkovic, "EIT-like response in asymmetrically coupled split ring resonators", *Metamaterials* 2012.
- [22] В. Милошевић, Б. Јокановић, Р. Бојанић, "Generalizovana metoda za ekstrakciju efektivnih parametara kod nesimetričnih struktura", ЕТРАН 2012.
- [23] V. Milosevic, B. Jokanovic, "Resonant Frequencies of Split Ring Resonator in Respect of Angle Between Slits", *Metamaterials* 2011.

- [24] R. Bojanic, B. Jakanovic, V. Milosevic, "Multiband Delay Lines with Reconfigurable Split-Ring Resonators", Telsiks 2011.
- [25] R. Bojanic, B. Jakanovic, V. Milosevic, "Investigation of Group Delay in Transmission Lines Consisting of Reconfigurable Split-Ring Resonators", Photonica 2011.
- [26] Р. Бојанић, Б. Јокановић, В. Милошевић, "Rekonfigurabilne linije za kasnjenje sa split-ring rezonatorima", ЕТРАН 2011.
- [27] В. Милошевић, "Rezonantne učestanosti usamljenih split-ring rezonatora i spregnutih sa mikrostrip vodom u zavisnosti od ugla između procepa", ЕТРАН 2011.
- [28] V. Milosevic, B. Jakanovic, B. Kolundzija, "Microwave stereometamaterials and parameter extraction", 4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2010, 13-16 October, Karlsruhe, pp. 537-539.

На основу претходно изнетих података и анализе докторског рада комисија доноси следећи

## ЗАКЉУЧАК

Докторска теза кандидата Војислава Милошевића, дипломираног електроинжињера, под називом „Асиметрични резонатори као елементи јединичних ћелија једнодимензионалних метаматеријала“ испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Физичког факултета.

Комисија сматра да ова докторска дисертација представља важан и оригинални научни допринос и предлажемо Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри њену јавну одбрану.

Београд, 21. децембар 2018.

### Комисија:

---

др Бранка Јокановић, научни саветник  
Института за физику

---

др Воја Радовановић, редовни професор  
Физичког факултета

---

др Горан Попарић, ванредни професор  
Физичког факултета

---

др Брана Јеленковић, научни саветник  
Института за физику