

Primena slobodnog softvera za elektromagnetsko modelovanje

Miodrag Tasić

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

tasic@etf.bg.ac.rs

Rezime: Softver za elektromagnetsko modelovanje nezaobilazan je alat mikrotalasnih inženjera, a značajan je i studentima kurseva iz oblasti elektromagnetike, antena i mikrotalasa. Na internetu je dostupan izvestan broj otvorenih softvera za ovu namenu. Odabrali smo jedan takav softver, baziran na FDTD (*Finite Difference Time Domain*) metodi, uverili se u njegove mogućnosti i predstavljamo ga u ovom radu. U kratkim crtama osvetljavamo i nastanak klasične elektromagnetike i principe rada FDTD metode, koja oličava esenciju oblasti – direktno rešavanje Maksvelovih jednačina.

Ključne reči: elektromagnetsko modelovanje; slobodan softver; antene; rasejači.

I. Uvod

Oblast pod nazivom klasična elektromagnetika zasnovana je na tzv. Maksvelovim jednačinama, izloženim u znamenitom radu iz 1864. godine [1]. Predviđanja Maksvelove teorije prvi je eksperimentalno potvrdio Herc 1888. godine [2], a jednačinama je moderan oblik podario Hevisajd [3]. Maksvelove jednačine opisuju vezu između elektromagnetskog polja, njegovih izvora i osobina okolne sredine. Naime, tokom stotinak godina druge polovine osamnaestog i prve polovine devetnaestog veka, zapažanje da pojedina tela međusobno deluju silom dovelo je do otkrića svojstva naelektrisanosti. Sile koje među naelektrisanim telima u mirovanju i kretanju deluju nazvane su električnim i magnetskim silama. Da bi se „objasnilo“ ovo dejstvo „na daljinu“, uveden je koncept električnog i magnetskog polja, kao posrednika. Tako naelektrisanja, nepokretna i pokretna (struje), „postaju“ izvor elektromagnetskog polja. Taj uzbudljiv period opisan je u Vitakerovoj monumentalnoj knjizi [2].

Premda je šezdesetih godina dvadesetog veka došlo do produblivanja spoznaje o elektromagnetskim pojavama i uveden je tzv. standardni model za opisivanje inercije svih poznatih čestica, klasična elektromagnetika i danas predstavlja pouzdan alat za analizu elektromagnetskih pojava u prirodi, izuzev onih na nivou čestica [4]. Moderni servisi za zemaljsku i satelitsku komunikaciju, radari za vojne i civilne potrebe, medicinski uređaji na bazi stvaranja mikrotalase slike i senzori za najrazličitije potrebe i dalje se uspešno projektuju primenom klasične elektromagnetske teorije. U tu svrhu potrebno je rešiti Maksvelove jednačine u nekom obliku, tj. izvršiti elektromagnetsku analizu. Za realne probleme rešenje se ne može dobiti u analitičkom obliku, pa se primenjuje numeričko rešavanje.

Elektromagnetsko modelovanje je postupak izrade geometrijskog modela strukture od interesa, opis elektromagnetskih osobina te strukture, zadavanje

odgovarajuće pobude i elektromagnetska analiza tako definisanog problema. Elektromagnetska analiza može se sprovesti u vremenskom ili frekvencijskom domenu, a rešavaju se diferencijalne ili integralne jednačine elektromagnetskog polja. Rešavanjem diferencijalnih jednačina elektromagnetskog polja direktno dobijamo vektore tog polja. Tipična metoda ove vrste je Metoda konačnih elemenata (*FEM-Finite Elements Method*). Rešavanjem integralnih jednačina elektromagnetskog polja dobijamo izvore (struje i naelektrisanja) tog polja. Tipična metoda ove vrste je Metoda momenata (*MoM-Method of Moments*). Svaka od metoda ima svoje prednosti i nedostatke [5].

Pored komercijalnih softvera za elektromagnetsko modelovanje, postoji i izvestan broj slobodnih softvera ovoga tipa. Ovde ćemo prikazati OpenEMS [6], otvoren (GNU GPL) softver za elektromagnetsko modelovanje korišćenjem FDTD (*Finite Difference Time Domain*) metode. Rad je u nastavku organizovan na sledeći način: u poglavlju dva izložićemo osnove FDTD metode, u poglavlju tri opisaćemo rad sa OpenEMS softverom, u poglavlju četiri prikazaćemo rezultate numeričke analize korišćenjem OpenEMS softvera i u petom poglavlju dajemo zaključak.

II. FDTD Metoda

FDTD metoda, u slobodnom prevodu metoda konačnih razlika u vremenskom domenu, je iterativni postupak za rešavanje Maksvelovih jednačina, prikazanih na slici 1.

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}_i + \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon} \\ \operatorname{div} \mathbf{H} &= 0\end{aligned}$$

Slika 1. Maksvelove jednačine za izotropnu linearnu sredinu

Cilj je odrediti vektore električnog i magnetskog polja, \mathbf{E} i \mathbf{H} , ukoliko su poznati parametri sredine: permitivnost ε , permeabilnost μ i specifična provodnost σ , te vektor gustine pobudnih struja \mathbf{J}_i . Ako se pretpostavi da su sva polja i svi izvori u početnom trenutku nula, u okviru FDTD metode mogu se posmatrati samo prve dve jednačine sa slike 1 [7]. One se, na određeni način, vremenski i prostorno diskretizuju i koriste za računanje vektora polja \mathbf{E} i \mathbf{H} u iterativnoj šemi. Najčešće se koristi šema koju je predložio Yee [8], a u kojoj se prostor od

interesa prekrrije pravougaonom mrežom, u čijim se tačkama izračunavaju vektori polja. Pozicioniranje ove mreže i njena gustina su od izuzetnog značaja za FDTD analizu. Kriterijum za okončanje iterativnog postupka zavisi od pobude: ako je pobuda prostoperiodična, potrebno je da se u sistemu uspostavi ustaljen režim, a ako je u pitanju Gausov impuls, energija u sistemu treba da iščezne.

FDTD analiza može se sprovesti samo u konačnom prostoru (zbog ograničenosti računarskih resursa). Ako se analizirana struktura prirodno nalazi u slobodnom prostoru (npr. predajna antena), neophodno je simulirati iščezavanje elektromagnetskog talasa u beskonačnosti. To se postiže apsorpcionim tehnikama, od kojih su najčešće Murova (ABC) [9] i PML [10]. Objekat od interesa se okruži apsorpcionim slojem čiji je zadatak da talas koji nailazi oslabi, a da istovremeno obezbedi da se taj talas ne reflektuje.

Ako se traže veličine koje se definišu na velikom rastojanju od analizirane strukture (daleko polje antena i rasejača), pribegava se izračunavanju ekvivalentnih izvora elektromagnetskog polja, na odabranoj površi koja okružuje analiziranu strukturu u zoni bliskog polja (near field). Zatim se ti izvori koriste za izračunavanje polja na vrlo velikim rastojanjima (eng. *far field*) [11].

III. OpenEMS softver

OpenEMS [6] je otvoren softver za elektromagnetsko modelovanje. Podržani su operativni sistemi Windows i Linux. Program ne poseduje grafički interfejs za modelovanje, već se model opisuje skriptom, a kao platforma se koriste Matlab ili Octave [12], otvoren softver koji je alternativa Matlab-u. Budući da govorimo o otvorenom softveru, u nastavku ćemo koristiti Octave.

OpenEMS se može preuzeti sa adrese <http://openems.de/start/index.php>. U verziji za Windows nema klasične instalacije, dovoljno je da se preuzeta arhiva raspakuje na željenu lokaciju - mi biramo folder "openEMS" na disku "C". Da bi se otpočelo sa radom, potrebno je samo da se OpenEMS subfolder sa m-fajlovima ("matlab") doda u Octave putanju m-fajlova, sa `addpath('C:\openEMS\matlab')`. Svaki openEMS model priprema se u vidu jednog Octave skripta – niza naredbi za opis modela, pokretanje elektromagnetske analize i pregled i skladištenje rezultata. (Skriptovi se snimaju u fajlove sa ekstenzijom ".m") Pored specijalizovanih OpenEMS m-funkcija, u skriptu se koriste uobičajene Octave strukture i operacije. U "openEMS" folderu nalaze se i izvršni fajlovi za grafički prikaz modela (AppCSXCAD), elektromagnetsku analizu (openEMS) i transformaciju bliskog u daleko polje (nf2ff). Pomenimo da se na OpenEMS sajtu, u sekciji Tutorials, mogu naći primeri skriptova za modelovanje tipičnih struktura, kao i uputstvo za upotrebu softvera (*Online manual*), koji daju osnov za početak rada. Ipak, u vezi sa mnogim detaljima korisnik će morati da „konsultuje“ izvorni kod openEMS m-funkcija i da tako proba da dođe do određenih zaključaka.

U skriptu koji opisuje elektromagnetski model potrebno je definisati: strukturu modela, pobudu, FDTD Grid (mrežu tačaka za računanje elektromagnetskog polja korišćenjem FDTD metode) sa graničnim uslovima, kriterijume za okončanje elektromagnetske analize i rezultate analize. Formalno, sve ovo definišemo u okviru dva objekta: objekat koji sadrži informacije o tipu analize ("FDTD") i objekat koji sadrži informacije o strukturi ("CSX").

Strukturu modela čine geometrijski opis i podaci o korišćenim materijalima. Na raspolaganju je nekoliko geometrijskih primitiva, koje opisuju dvodimenzionalne (2D) ili trodimenzionalne (3D) objekte. Izdvajamo: Box (2D ili 3D), Sphere (3D), Cylinder (3D), Polygon (2D) i Polyhedron (3D). Primitiva Box zadaje se sa dve dijagonalne tačke (AddBox), pa može biti i pravougaonik i paralelepiped. Primitivom Polygon može se opisati proizvoljan 2D, a primitivom Polyhedron proizvoljan 3D objekat, tako da se, teorijski, mogu opisati proizvoljni oblici. Prilikom kreiranja, svaku primitivu moguće je skalirati, translirati, rotirati, ili sve to istovremeno, korišćenjem transformacione matrice. Pored toga, moguće je definisati koordinatni sistem u kojem je primitiva definisana (Dekartov ili cilindrični) i tako odstupiti od globalnog koordinatnog sistema za pojedine primitive. Za svaku primitivu zadaje se prioritet – ako se dve ili više primitiva prostorno preklapaju, smatra se da taj deo prostora ispunjava primitiva sa najvišim prioritetom (najvećim zadatim brojem za prioritet). Za svaku geometrijsku primitivu mora se zadati materijal (AddMaterial). Savršeno provodan materijal dobio je rezervirano ime "Metal" (AddMetal), a za druge materijali moraju se zadati ime i parametri. Osnovni parametri su oni prikazani na slici 1: permitivnost, permeabilnost i (specifična) električna provodnost, uz dodatak magnetske provodnosti, koja nije fizička veličina, ali se pod određenim uslovima može uvrstiti u jednačine i koristiti za dobijanje rešenja. Postoje i parametri za disperzivne materijale-mi se u numeričkim eksperimentima njima nismo bavili, a ima ih previše da bismo ih ovde nabrajali.

Pobuda se odlikuje oblikom u vremenskom domenu i fizičkom izvedbom. U vremenskom domenu moguće su Gausova pobuda (SetGaussExcite), koja se zadaje centralnom učestanošću u spektru Gausovog impulsa i 20 dB graničnom učestanošću i prostoperiodična (SetSinusExcite) pobuda. U smislu fizičke izvedbe razlikujemo pobudu poljem i pobudu putem portova (pristupa). Pobuda poljem može biti „standardna“ (AddExcitation), gde se u delu prostora zadaje električno ili magnetsko polje, ili pobuda ravnim talasom (AddPlaneWaveExcite), gde se zadaje pravac prostiranja i smer vektora polja pobudnog ravnog elektromagnetskog talasa. Za obe pobude poljem definiše se oblast dejstva putem Box primitive. Portovi su realizovani pomoću naponskih i strujnih sonde i drugih potrebnih elemenata i materijala. Portovi omogućavaju razdvajanje incidentnog i reflektovanog signala, tj. određivanje refleksije (za proizvoljni port) i transmisije (između različitih portova). Koncentrisani port (AddLumpedPort) simulira tačkasti

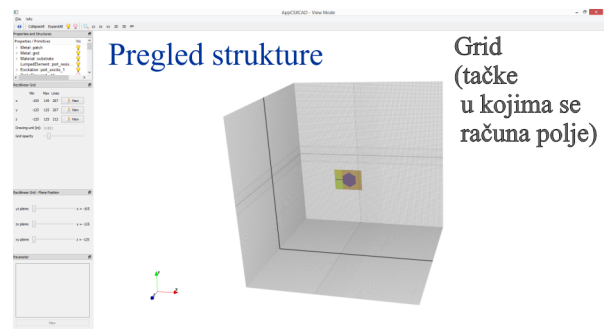
izvor i treba da je definisan u domenu čija je maksimalna dimenzija mnogo manja od radne talasne dužine. Pored toga, postoje portovi prilagođeni za mikrotrakaste vodove (AddMSLPort), kružne (AddCircWaveGuidePort) i pravougaone (AddRectWaveGuidePort) talasovode. Nakon izvršene elektromagnetske analize potrebno je pokrenuti potprogram za računanje napona i struja na portovima, u vremenskom i frekvencijskom domenu.

FDTD Grid je mreža tačaka-diskretizovani prostor za primenu FDTD metode. Ovde govorimo o pravougaonoj mreži tačaka, a openEMS omogućava i rad u cilindričnim koordinatama (tj. cilindričnu mrežu). Finija mreža (sa manjim prostornim korakom) obezbeđuje tačniju analizu, ali i povećava CPU vreme i memorijsko zauzeće, pa je nužno pronaći kompromis. Ne preporučuje se korak manji od desetine talasne dužine. Premda je najlakše formirati uniformnu mrežu, ona nije i najefikasnija. Naime, u blizini razdvojnih površi metala i dielektrika postoji brza promena elektromagnetskog polja, koja zahteva finiju mrežu. Softver nudi mogućnost kreiranja uniformnih linija za mrežu (SmoothMeshLines), ali dozvoljava korisniku da ručno doda linije po želji, ili da se pokrene automatsku detekciju kritičnih delova strukture i dodavanje linija (DetectEdges). Nakon što se sve linije generišu u promenljivoj "mesh" (koja sadrži nizove brojeva-linija "x", "y" i "z"), treba kreirati mrežu (DefineRectGrid) - ovo je jedina funkcija u kojoj se definiše jedinica za dužinu, u kojoj su zadate sve geometrijske dimenzije. Mreža se mora zatvoriti graničnim površima, kojih ima četiri vrste. PEC se koristi ako je neka granična površ savršeno provodna, PMC se postavlja samo u ravni simetrije (ako želimo da iskoristimo simetriju), a MUR [9] i PML [10] su apsorpcione površi za simulaciju slobodnog prostora, o kojima smo govorili ranije.

Kriterijumi za okončanje elektromagnetske analize zadaju se pri inicijalizaciji "FDTD" objekta (InitFDTD). Jedan je maksimalan broj vremenskih koraka "NrTs" (vremenski razmak između koraka određuje se automatski), a drugi "EndCriteria", broj koji pokazuje u kojoj meri je energija iščezla (ako je pobuda Gausov impuls), odnosno u kojoj meri je uspostavljen ustaljeni režim (ako je pobuda prostoperiodična). Analiza se završava ako je broj koraka veći od zadatog maksimalnog broja koraka, ili ako je tekući EndCriteria manji od zadatog. U praksi, orijentacione vrednosti za NrTs su oko 20000, a za EndCriteria oko $1e-4$.

Izlazni rezultati mogu biti direktni (elektromagnetsko polje u tačkama FDTD grida) i indirektni (sve veličine od interesa koje se mogu izračunati korišćenjem direktnih rezultata). Ako je potrebno izračunati dijagram zračenja antene ili rasejano polje, pre početka analize potrebno je zadati površ po kojoj se računa blisko polje (CreateNF2FFBox). Na osnovu izračune i nailazeće snage moguće je izračunati radarski odraz objekta. Ako su kao pobuda definisani portovi, nakon FDTD analize pokreće se dodatna obrada portova (calcPort) za izračunavanje incidentnih i reflektovanih napona portova, na osnovu kojih se mogu izračunati s-parametri (koji su od velikog značaja pri analizi uređaja poput antena i filtara).

Pre pokretanja openEMS analize, potrebno je model snimiti u fajl (WriteOpenEMS), nakon čega se može vizuelno proveriti model (CSXGeomPlot), kao na slici 2.



Slika 2. Vizuelni pregled openEMS modela

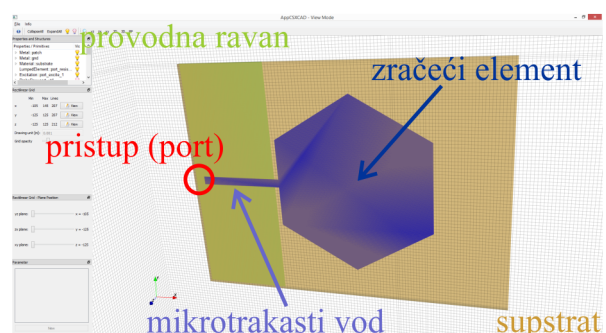
Nakon pokretanja openEMS analize (RunOpenEMS) u Octave tabu Command Window može se pratiti napredak iterativne analize. Analiza se može prekinuti pre postizanja izlaznih kriterijuma ubacivanjem fajla sa imenom "ABORT" u folder sa openEMS projektom.

Po okončanoj analizi, može se izvršiti prikaz rezultata korišćenjem slobodnog softvera ParaView [13], ili se rezultati mogu obraditi, prikazati i snimiti pomoću Octave naredbi i dodatnih openEMS funkcija.

IV. Numerički primeri

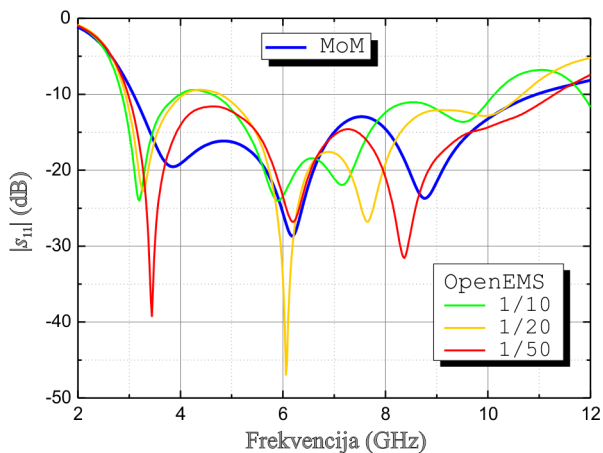
Razmotrićemo dva primera, slična onima iz openEMS tutorial-a: UWB štampanu antenu (UWB Radar) i sferni metalni rasejač (Metal Sphere RCS). Rezultate dobijene openEMS analizom uporedili smo sa identičnim rezultatima dobijenim MoM analizom korišćenjem bazisnih funkcija višeg reda [14]. Za openEMS izlazni kriterijum koristili smo $NrTs=20000$ i $EndCriteria=1e-4$.

Model UWB antene [15] u openEMS-u prikazan je na slikama 2 i 3. Korišćena je opcija "DetectEdges", pa je mreža gušća na pojedinim mestima. Zračeci element i vod modelovani su jednom primitivom Polygon, a svi ostali elementi primitivom Box. Za napajanje je iskorišćen koncentrisani port od 50 W, postavljen između kraja mikrotrakastog voda i provodne ravni, sa Gausovim impulsom centralne i granične učestanosti 6 GHz.

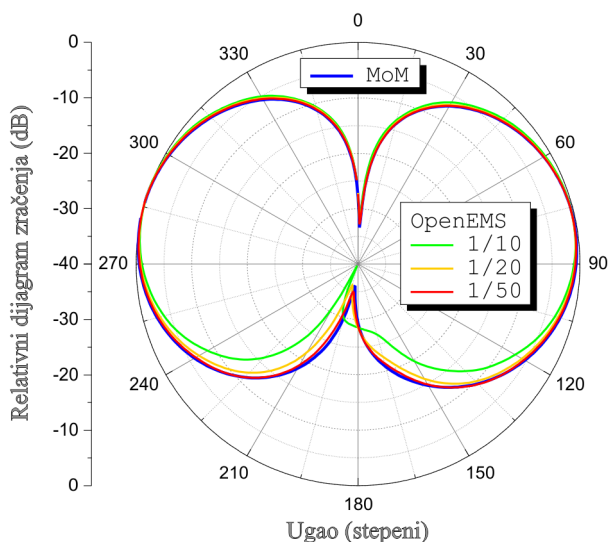


Slika 3. Model UWB štampane antene u openEMS-u

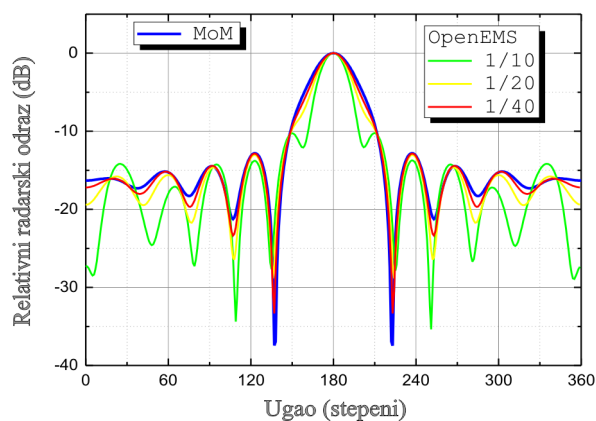
Parametar s_{11} prikazan je na slici 4. Smanjenjem koraka FDTD Grid-a (sa $1/10$ na $1/50$ talasne dužine u vakuumu) openEMS rezultat približava se MoM rezultatu, ali daljim smanjivanjem koraka (na $1/70$, nije na slici) ne dolazi do većih promena. Imajući u vidu da je



Slika 4. s11 parametar UWB antene – poređenje openEMS i MoM



Slika 5. Dijagram zračenja UWB antene – poređenje openEMS i MoM



Slika 6. Radarski odraz metalne sfere – poređenje openEMS i MoM

reč o veoma širokopojasnoj anteni, možemo reći da je poklapanje rezultata zadovoljavajuće. Relativni dijagram zračenja UWB antene u E-ravni, na 6 GHz, prikazan je na slici 5. Ovde već korak od 1/20 talasne dužine daje zadovoljavajuće rezultate.

Relativni radarski odraz metalne sfere u vakuumu, čiji je poluprečnik jednak talasnoj dužini (pobuda je ravan prostoperiodičan linijski polarizovan elektromagnetski talas), prikazan je na slici 6. Smanjenjem koraka FDTD Grid-a (sa 1/10 na 1/40 talasne dužine) openEMS rezultat približava se MoM rezultatu. Poklapanje rezultata pri koraku 1/40 talasne dužine je odlično.

V. Zaključak

Slobodan softver za elektromagnetsko modelovanje openEMS omogućava analizu antena, filtara i drugih mikrotalasnih sklopova, raznih vodova, talasovoda i proizvoljnih rasejača. Integriran je sa drugim otvorenim softverima: modelovanje se obavlja putem Octave skripta, rezultate je moguće pregledati korišćenjem ParaView-a, a najavljena je i verzija koja će koristiti Phython. Numerički primeri koje smo sprovedli pokazuju dobro poklapanje sa MoM rezultatima, koje smatramo referentnim. Softver za rešavanje Maksvelovih jednačina koristi FDTD metodu, na čiju tačnost značajno utiče gustina FDTD mreže i pozicioniranje njenih linija. O kreiranju ove mreže, kao i o mnogim drugim detaljima, brine prevashodno korisnik, što je potencijalno i vrlina i mana ovog softvera. Utisak je, ipak, da veštom korisniku openEMS može biti veoma dobar alat za elektromagnetsko modelovanje.

Literatura

- [1] J. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic field," Scientific Papers, pp. 459-512, 1864.
- [2] E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Longmans, Green, and Co., London, 1910.
- [3] O. Heaviside, *Electromagnetic Theory*, Vol. I, The Electrician - Printing and Publishing Company Ltd., London, 1893.
- [4] J. Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley&Sons, Inc., New York, 1999.
- [5] A. Peterson, S. Ray, and R. Mittra, *Computational Methods For Electromagnetics*, IEEE Press, New York, 1998.
- [6] T. Liebig, openEMS – *Open Electromagnetic Field Solver*, available at <http://openEMS.de>.
- [7] K. S. Kunz, R. J. Luebbers, *The Finite-Difference: Time-Domain Method for Electromagnetics*, pp. 12, CRC Press, 1993.
- [8] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May 1966.
- [9] G. Mur, "Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1981.
- [10] J-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of computational physics*, 114(2):185-200, 1994.
- [11] A. Ludwig, "Near-field far-field transformations using spherical-wave expansions," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, no. 2, pp. 214-220, March 1971.
- [12] <https://www.gnu.org/software/octave/> [pristupljeno 10.09.2019]
- [13] <https://www.paraview.org/> [pristupljeno 10.09.2019]
- [14] B. M. Kolundžija and A.R. Djordjević, *Electromagnetic modeling of composite metallic and dielectric structures*, Boston, Artech House, 2002.
- [15] X. Gong, L. Tong, Y. Tian, and B. Gao, "Design of a Microstrip-Fed Hexagonal Shape UWB Antenna with Triple Notched Bands," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 62, 77-87, 2016.