

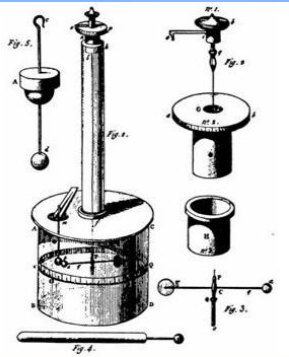
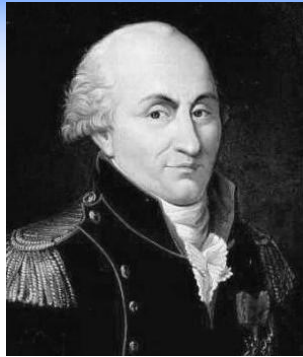
# Primena slobodnog softvera za elektromagnetsko modelovanje

Miodrag Tasić  
([tasic@etf.rs](mailto:tasic@etf.rs))

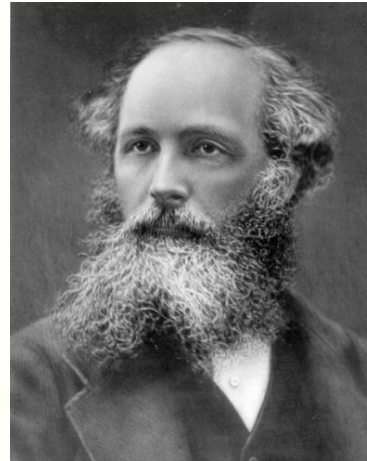
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

---

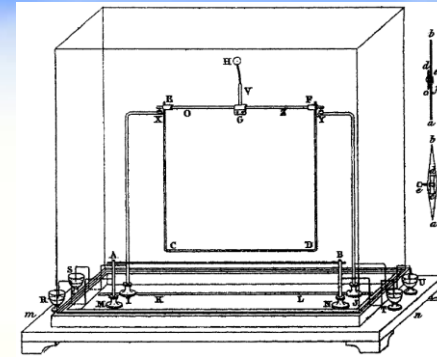
# Nastanak Elektromagnetike



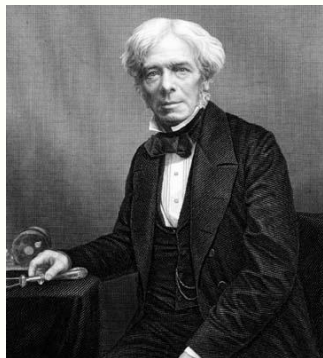
Coulomb, 1785



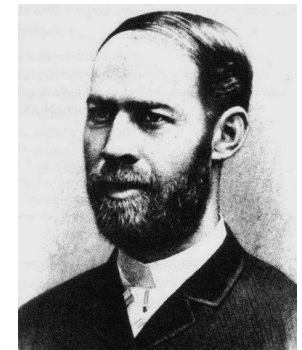
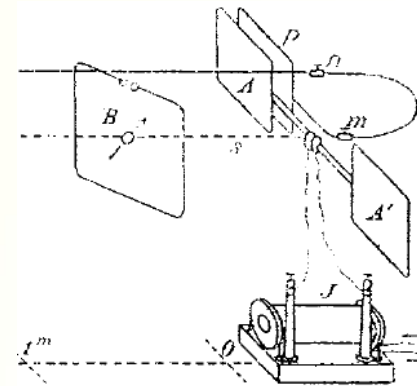
Maxwell, 1864



Ampere, 1826



Faraday, 1831



Hertz, 1888

# Maksvelove jednačine

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_i + \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

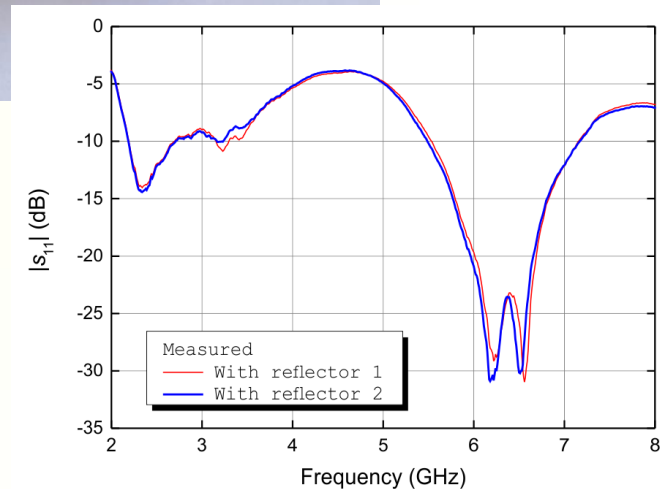
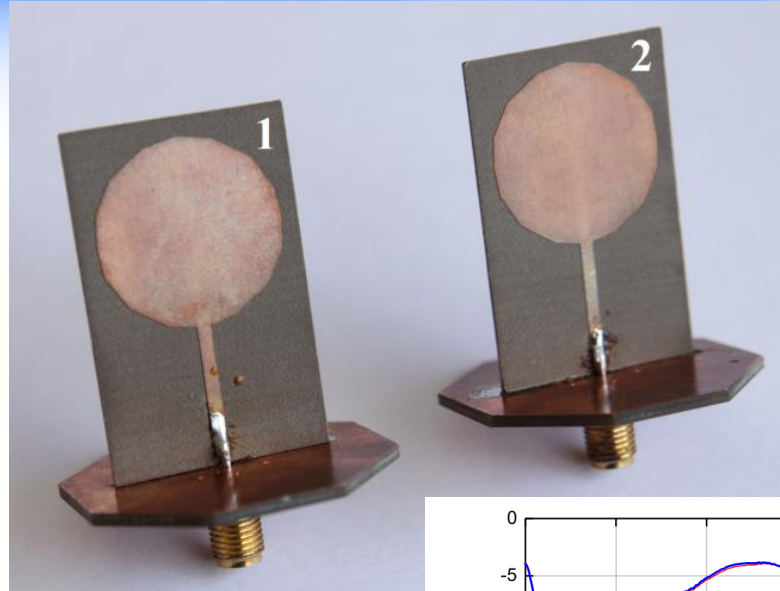
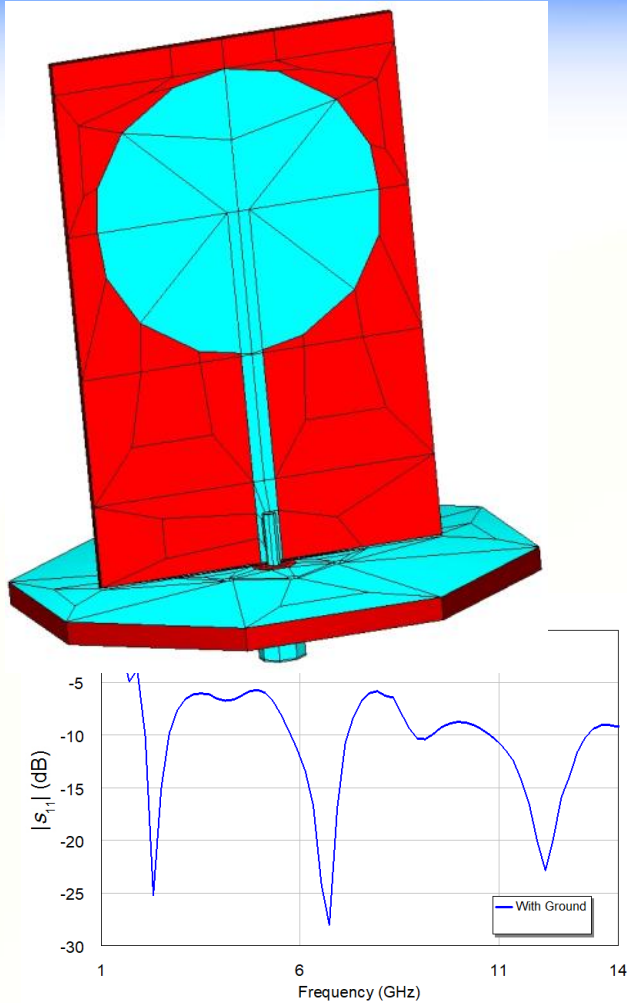
$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0$$

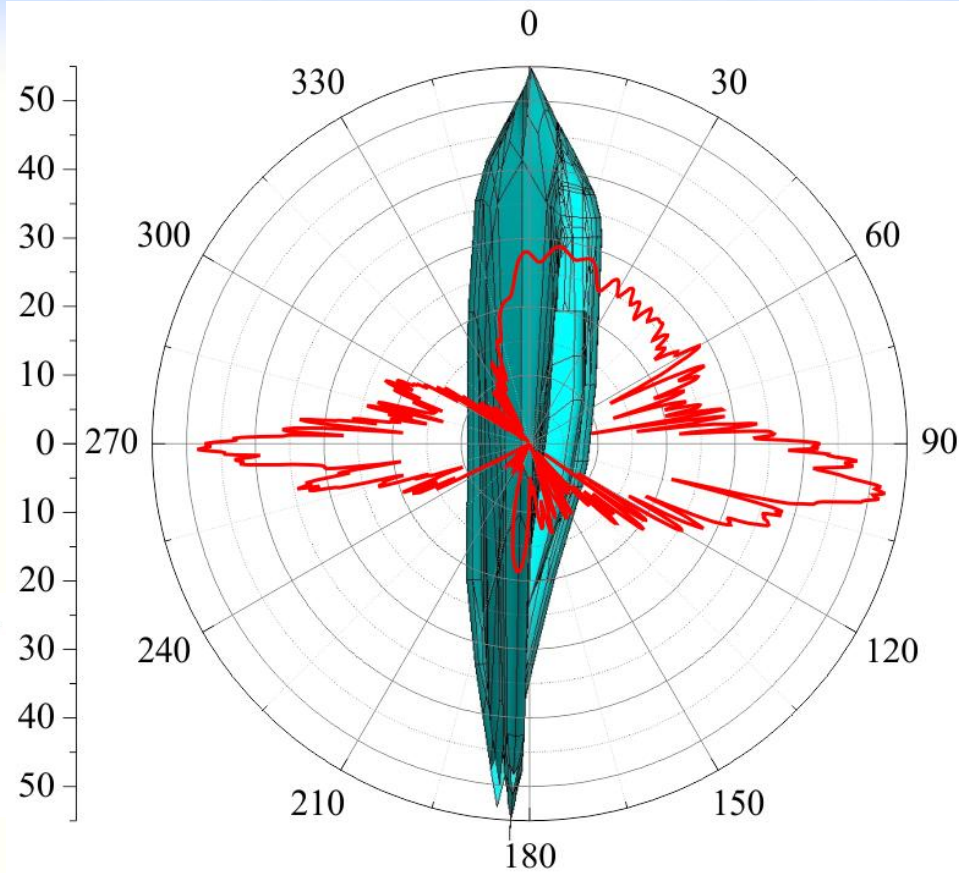
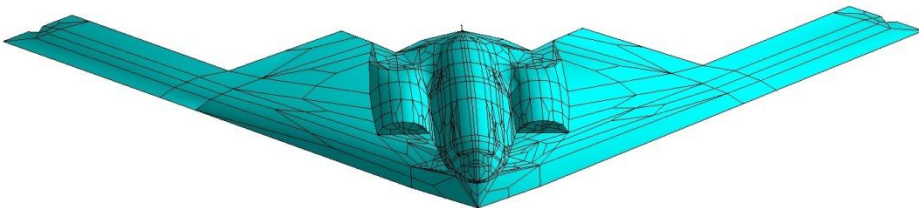
# FDTD (Finite Difference Time Domain)

- FDTD je iterativni postupak za rešavanje Maksvelovih jednačina
- One se vremenski i prostorno diskretizuju i koriste za računanje vektora polja **E** i **H**
- Izbor mreže i njena gustina su veoma važni
- Simulacija iščezavanje elektromagnetskog talasa apsorpcionim tehnikama
- Near-field to far-field transformacija

# Elektromagnetsko (EM) modelovanje



# Elektromagnetsko modelovanje 2



# OpenEMS - Otvoren softver za EM modelovanje korišćenjem FDTD

- Preuzimanje sa adrese <http://openems.de>
- Podržani su Windows i Linux OS
- Nema grafički interfejs, koristi se skript
- Kao platforma se koriste Matlab ili Octave
- Skript sadrži OpenEMS i Octave m-funkcije
- Prikaz modela (AppCSXCAD), EM analiza (openEMS) i blisko u daleko polje (nf2ff)
- Delimično uputstvo i Tutorial-i

# Opis EM modela

- Struktura modela
- Pobuda
- FDTD Grid (mrežu tačkaka za računanje EM polja FDTD metodom) sa graničnim uslovima
- Kriterijumi za okončanje EM analize
- Rezultati EM analize
- Objekti "FDTD" (analiza) i "CSX" (struktura)



# Struktura modela

- Geometrijski opis i korišćeni materijali
- Box (2D ili 3D), Sphere (3D), Cylinder (3D), Polygon (2D) i Polyhedron (3D)
- Prostorno preklapanje i prioritet
- Mora se zadati materijal (AddMaterial)
- Rezervisano ime "Metal" (AddMetal)
- Permitivnost, permeabilnost i specifična provodnost

# Pobuda

- Oblik u vremenskom domenu i fizička izvedba
- Gausova pobuda (SetGaussExcite) i prostoperiodična pobuda (SetSinusExcite)
- Pobuda poljem i pobuda putem portova
- Pobuda poljem (AddExcitation) i pobuda ravnim talasom (AddPlaneWaveExcite)
- Koncentrisani (AddLumpedPort), mikrotrakasti (AddMSLPort), talasovodni (AddCircWaveGuidePort, AddRectWaveGuidePort)

# FDTD Grid

- Diskretizovani prostor za primenu FDTD metode
- Pravougaona ili cilindrična mreža
- Finija mreža daje tačniju analizu, ali i povećava CPU vreme i memorijsko zauzeće
- Uniformne linije (SmoothMeshLines), ručno i automatsko dodavanje linija (DetectEdges), kreiranje mreže (DefineRectGrid)
- Mreža se mora zatvoriti graničnim površima, kojih ima četiri vrste: PEC, PMC, MUR i PML

# Kriterijumi za okončanje EM analize

- Zadaju se pri inicijalizaciji "FDTD" obj. (InitFDTD)
- "NrTs" - maksimalan broj vremenskih koraka (vremenski razmak između koraka određuje se automatski)
- "EndCriteria " - broj koji pokazuje u kojoj meri je iščezla energija (ako je pobuda Gausov impuls), odnosno u kojoj meri je uspostavljen ustaljeni režim (ako je pobuda prostoperiodična)
- U praksi vrednosti za NrTs su oko 20000, a za EndCriteria oko  $1e-4$

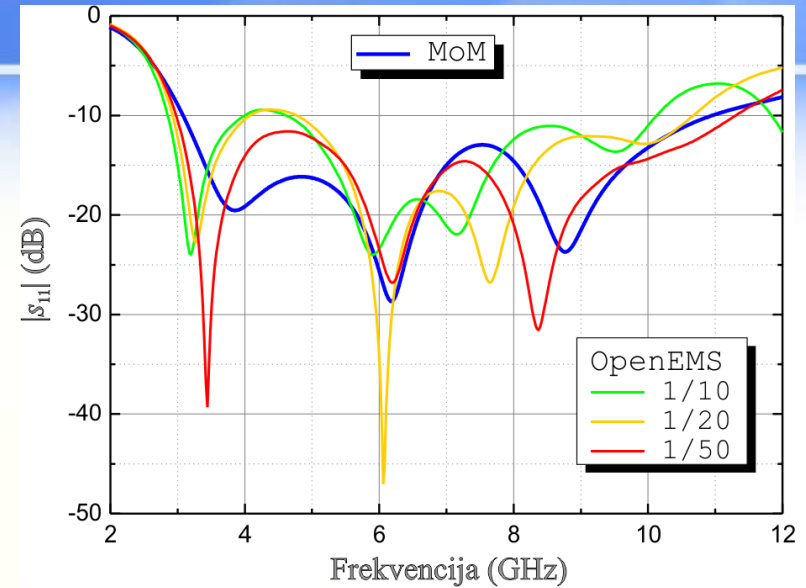
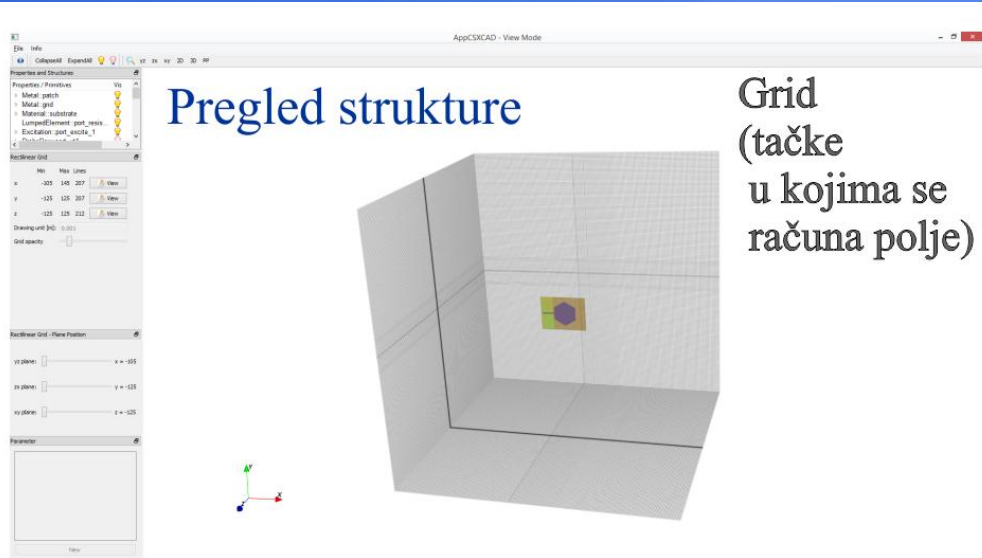
# Rezultati EM analize

- Direktni (EM polje u tačkama FDTD grida) i indirektni (korišćenjem direktnih rezultata)
- Pre početka analize zadaje se površ po kojoj se računa blisko polje (CreateNF2FFBox), a po završenoj FDTD analizi se računa daleko polje (CalcNF2FF)
- Za portove se nakon FDTD analize pokreće dodatna obrada portova (calcPort) za izračunavanje incidentnih i reflektovanih napona portova

# Primer antene

Pregled strukture

Grid  
(tačke  
u kojima se  
računa polje)



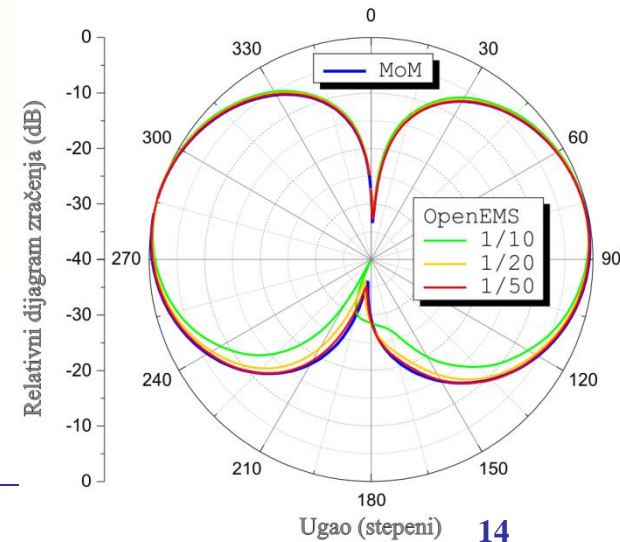
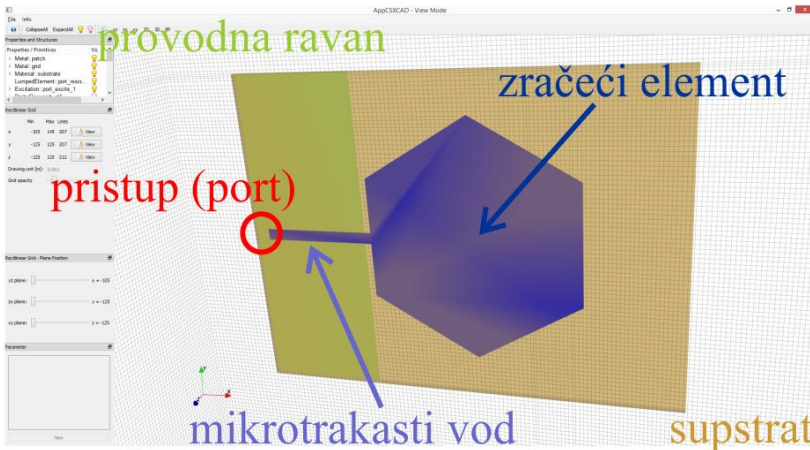
provodna ravan

zračeci element

pristup (port)

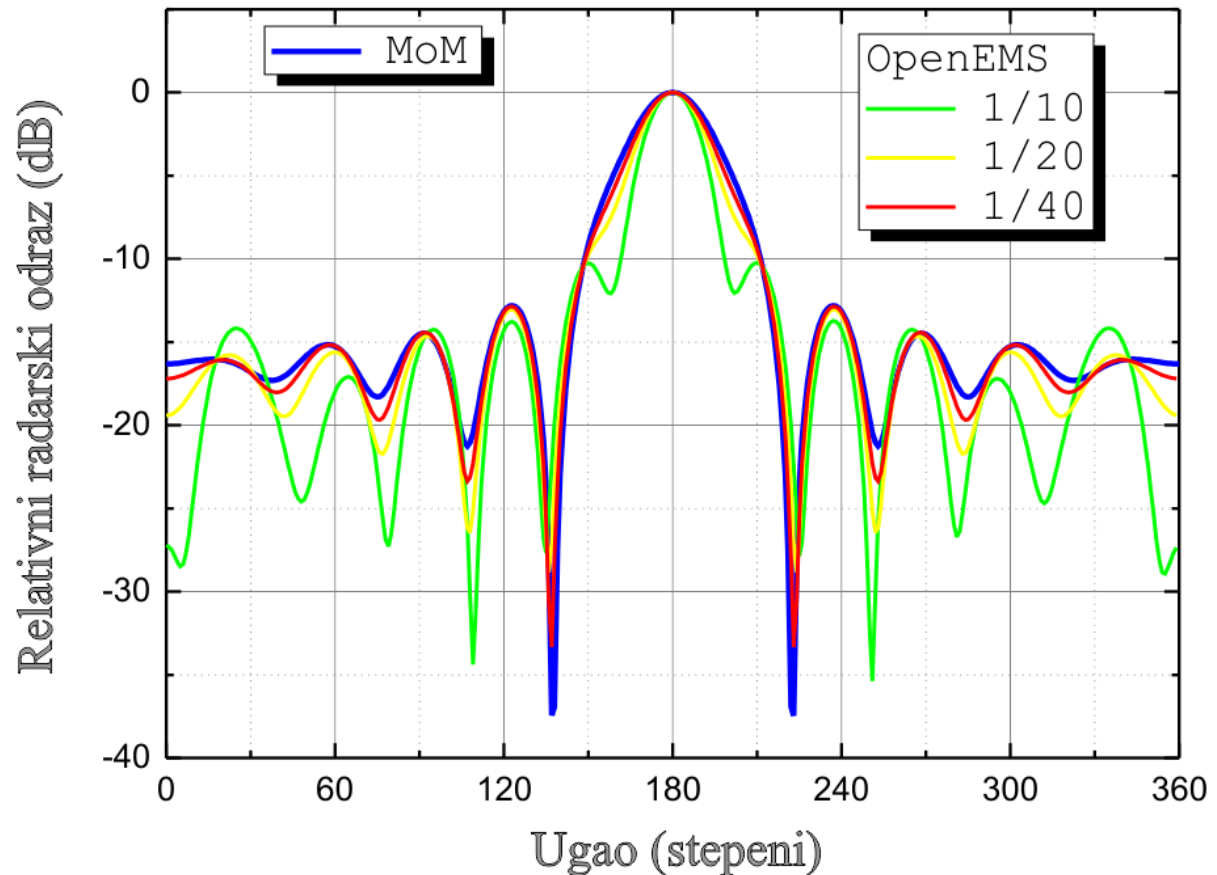
mikrotrakasti vod

supstrat



# Primer rasejača

Relativni radarski odraz metalne sfere u vakuumu, čiji je poluprečnik jednak talasnoj dužini (pobuda je ravnim prostoperiodičnim linijski polarizovanim EM talasom)



# Zaključak

- OpenEMS omogućava elektromagnetsko modelovanje antena, filtara i drugih mikrotalasnih sklopova, raznih vodova i talasovoda i analizu proizvoljnih rasejača
- Numerički primeri koje smo sproveli pokazuju dobro poklapanje sa MoM rezultatima, koje smatramo referentnim
- O kreiranju FDTD mreže, kao i o mnogim drugim detaljima, brine prevažodno korisnik, što je potencijalno i vrlina i mana ovog softvera