



# Bežični prijenos snage

**dr. sc. Maja Škiljo**

**Dani FESB-a 2014.**

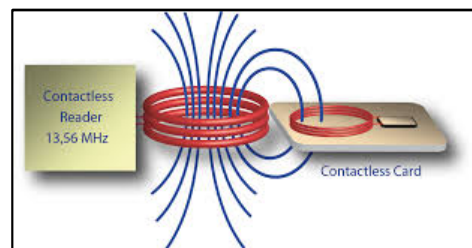
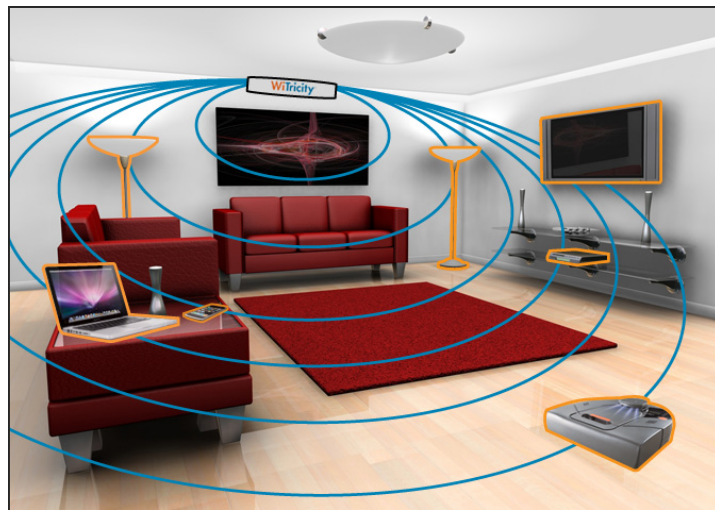


# Uvod

- **Bežični prijenos energije**
- **Tipovi bežičnog prijenosa energije:**
  - prijenos u bliskom induktivnom polju antena
  - prijenos u bliskom zračćem polju antena
  - prijenos u dalekom polju antena
- **Ubrzani razvoj istraživanja, tehnologije i standarda za bežični prijenos energije:**
  - Wireless Power Consortium, Alliance for Wireless Power, WiTricity, SPS (Solar Power Satellite) sustavi; posebna izdanja časopisa, konferencije, tehnički forumi i organizacije na temu WPT-a

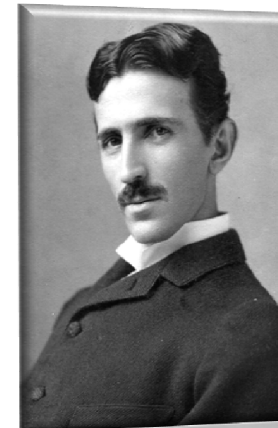
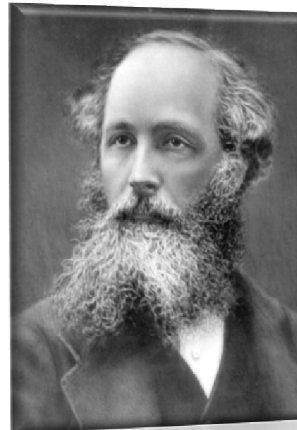
# Uvod

- **Primjena WPT sustava u bliskom polju antena:**
  - medicinski uređaji ugrađeni u tijelo, električni automobili i mali elektronički uređaji (senzori, mobiteli, tableti,...), RFID, NFC,...



# Uvod

- **Michael Faraday** – elektromagnetska indukcija
- **James Clerk Maxwell** – ujedinjenje električne i magnetske sile
- **Heinrich Rudolf Hertz** – prvi eksperimentalni dokaz postojanja elektromagnetskih valova
- **Nikola Tesla** – fundamentalna eksperimentalna istraživanja prijenosa energije radio valovima



# Uvod

(Povijest)



a)



b)



c)

*Slika 1. Teslini eksperimenti u Colorado Springsu:*

- a) fotografija izmjene električne energije između Teslinih zavojnica*
- b) rezonantni bežični prijenos na srednju udaljenost i*
- c) na kratku udaljenost između Teslinog Colorado Springs odašiljača i petlje.*

# Uvod

- **Bežični prijenos snage:**
  - Popularizacija WPT-a (tim s MIT-a)
  - Fundamentalne granice WPT-a (Lee,Nam)
  - Analiza WPT-a na temelju modova (Tak, Park)
  - Postizanje maksimalnih performansi dizajnom antene (Yoon)
- **Dizajn električki malih antena:**
  - Fundamentalna analiza električki malih antena (Wheeler, Chu)
  - Analitička rješenja polja sferne heliks antene (Mei)
  - Metoda višestrukog savijanja antenskih izdanaka (Best, Lee)
  - Optimalni dizajn električki male antene (Best)
- **Propagacijski kanal sustava bežičnog prijenosa snage:**
  - Utjecaj predmeta na neefikasan WPT sustav (Yuan)
  - Teoretska granica sustava antena s dielektričnim sfernim omotačem (Yoon)
  - Razvoj metodologije za procjenu izloženosti ljudi zračenju WPT sustava (Christ)

# Električni male antene i njihova sprega

(Fundamentalna analiza na temelju teorije krugova)

- **Električni male antene**

- Efikasnost zračenja:

$$\eta_{rad} = \frac{R_{rad}}{R_{loss} + R_{rad}}$$

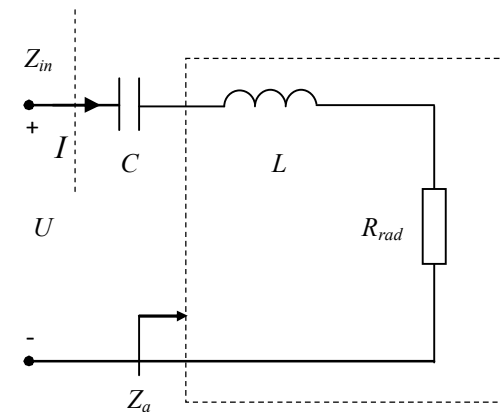
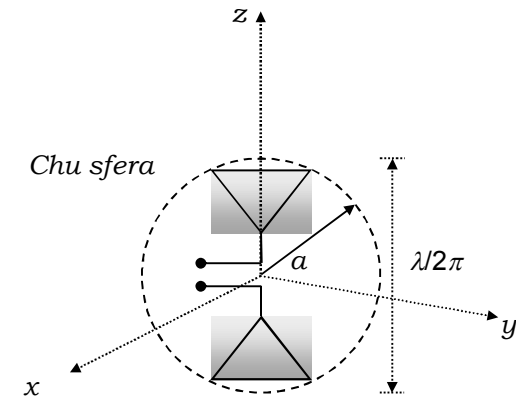
- Faktor dobrote:

$$Q_{rad} = \frac{\omega L}{R_{rad}} \Rightarrow Q_{Wheeler_{min}} = \frac{1}{(\beta a)^3}$$

- Faktor dobrote realne električni male antene s omskim gubicima:

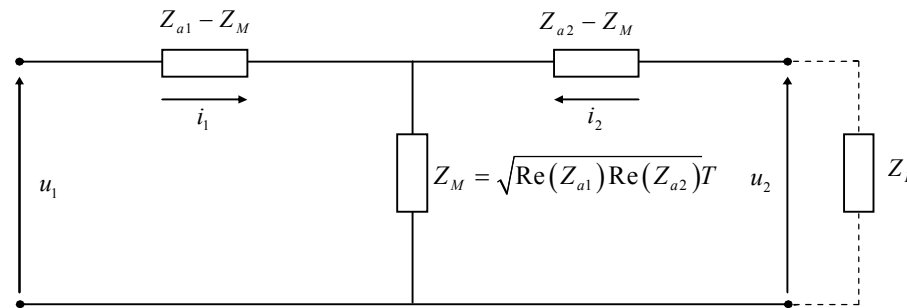
$$Q_{uk} = \frac{\omega L}{R_{rad} + R_{loss}} = \eta_{rad} Q_{rad}$$

$$\eta_{rad} = 1 \Rightarrow Q_{uk_{maks}} = Q_{rad}$$



# Električni male antene i njihova sprega

(Antenski model na temelju teorije sfernih modova)



- Z-matrica:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{a1} & \sqrt{\text{Re}(Z_{a1})\text{Re}(Z_{a2})}T \\ \sqrt{\text{Re}(Z_{a1})\text{Re}(Z_{a2})}T & Z_{a2} \end{bmatrix}$$

- Koeficijent prijenosa snage između dvije različite antene:

$$T = \sqrt{\eta_1 \eta_2} \frac{1 + \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}{\sqrt{(1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2)}} \cdot \left( A'_{10,10} + \frac{\sqrt{\alpha_1} + \sqrt{\alpha_2}}{1 + \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}} B'_{10,10} \right)$$

$$A'_{10,10} = \frac{3}{2} \cos \theta_1 \left\{ -\sin^2 \theta_0 \frac{1}{jkr_0} + (3 \cos^2 \theta_0 - 1) \times \left[ \frac{1}{(jkr_0)^2} + \frac{1}{(jkr_0)^3} \right] \right\} e^{-jkr_0} + \frac{3}{4} \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \phi_0) \sin 2\theta_0 \times \left\{ \frac{1}{jkr_0} + 3 \left[ \frac{1}{(jkr_0)^2} + \frac{1}{(jkr_0)^3} \right] \right\} e^{-jkr_0}$$

$$B'_{10,10} = -j \frac{3}{2} \sin \theta_1 \sin(\phi_1 - \phi_0) \sin \theta_0 \times \left\{ \frac{1}{jkr_0} + \frac{1}{(jkr_0)^2} \right\} e^{-jkr_0}$$



# Električki male antene i njihova sprega

(Antenski model na temelju teorije sfernih modova)

## Maksimalni prijenos snage

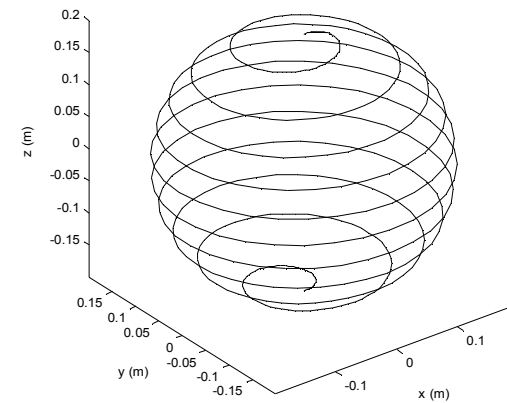
- Ulazna impedancija odašiljačke antene:  $Z_{in} = Z_{a1} - \frac{Z_M^2}{Z_{a2} + Z_L}$
- Efikasnost prijenosa snage PTE:  $PTE = \frac{P_L}{P_{in}} = \left| \frac{Z_M}{Z_{a2} + Z_L} \right|^2 \frac{\text{Re}(Z_L)}{\text{Re}(Z_{in})}$
- Postupak prilagođenja:  $\frac{\partial PTE}{\partial [\text{Im}(Z_L)]} = 0$        $\frac{\partial PTE}{\partial [\text{Re}(Z_L)]} = 0$
- Optimalni teret i maksimalni PTE:

$$X_L^{opt} = \frac{1}{2} \text{Re}[Z_{a2}] \text{Im}[T^2] - \text{Im}[Z_{a2}] \quad R_L^{opt} = \text{Re}[Z_{a2}] \sqrt{1 - \text{Re}[T^2]} - \frac{1}{4} \text{Im}^2[T^2]$$

$$PTE_{\text{maks}} = \frac{|T|^2}{2 - \text{Re}[T^2] + \sqrt{4 \{1 - \text{Re}[T^2]\} - \text{Im}^2[T^2]}}$$

# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

- **Osnovni zahtjevi za primjenu u bežičnom prijenosu snage:**
  - što veća efikasnost zračenja električki male antene
  - što niža rezonantna frekvencija
- **Sferna helikoidna antena**
  - potpuno analitičko rješenje elektromagnetskog polja
  - ekvivalentna sferna zavojnica
  - geometrija koja najbolje iskorištava zadani volumen

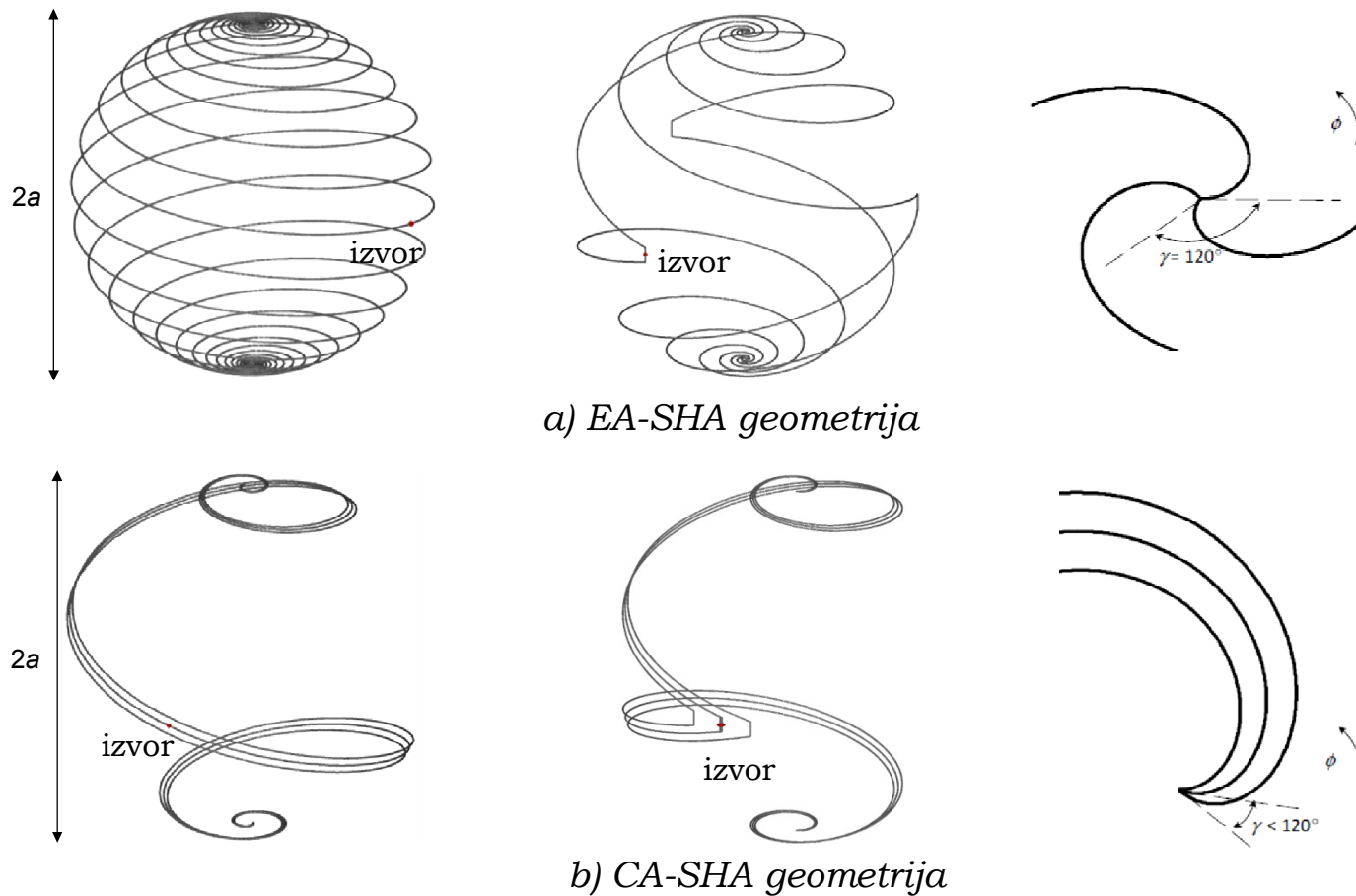


# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

- **Metode povećanja efikasnosti zračenja**
  - hlađenje vodiča
  - metoda višestruko savijenih antenskih izdanaka
- **Proračun sferne heliks antene za bežični prijenos snage**
  - predložena dva dizajna sferne helikoidne antene
- **Utjecaj propagacijskog kanala na performanse bežičnog prijenosa**
  - utjecaj idealnog i realnog tla
  - analiza problema elektromagnetske kompatibilnosti sustava

# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

(Višestruko savijena sferna helikoidna antena)



Slika 16. Primjeri izdvojenih geometrija SHA s tri izdanka.

# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

(Višestruko savijena sferna helikoidna antena)

## Pretpostavljeni primjer:

- jednostavan prijelnik malih dimenzija- mala efikasnost zračenja
- veliki odašiljač s visokom efikasnosti zračenja

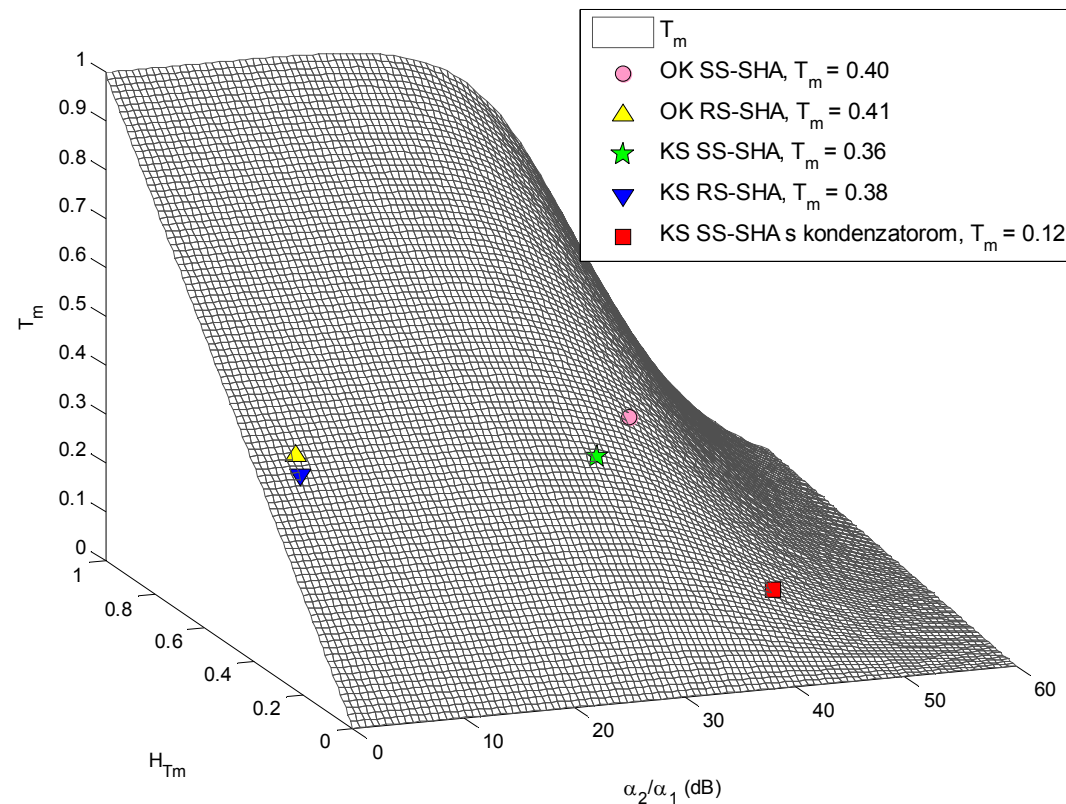
SHA s jednim izdankom	$a$ (cm)	$\psi(^{\circ})$	$f_{rez}$ (MHz)	$\beta_{rez}a$	$R_{rad}(\Omega)$	$\eta_{rad}(\%)$	$\alpha$
OK SS-SHA	2.5	3.64	162.1	0.085	0.40	30.8	0.44
OK RS-SHA	2.5	2.83	162.0	0.085	0.43	22.9	3e-4
KS SS-SHA	2.5	1.95	161.9	0.085	0.38	19.9	0.14
KS RS-SHA	2.5	1.63	160.5	0.085	0.61	20.1	5e-5
KS SS-SHA s $C = 2.8$ pF	2.5	7.50	162.3	0.085	0.23	6.3	2.23

SHA s tri izdanka	$a$ (cm)	$\gamma(^{\circ})$	$y(^{\circ})$	$f_{rez}$ (MHz)	$\beta_{rez}a$	$R^{rad}$ (W)	$KSV(50 \Omega)$	$\eta_{rad}(\%)$	$\alpha$
EASS-SHA	10	120	15.9	161.5	0.34	56.44	1.18	95.5	0.36
EASS-SHA	5	120	7.2	160.4	0.17	13.98	3.00	83.8	0.45
CASS-SHA	5	10	7.5	158.8	0.17	47.73	1.23	77.4	0.40
CARS-SHA	5	15	6.2	162.3	0.17	38.90	1.34	72.4	1.2e-4

Tablica 3. Rezonantne karakteristike SHA s jednim i tri izdanka.

# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

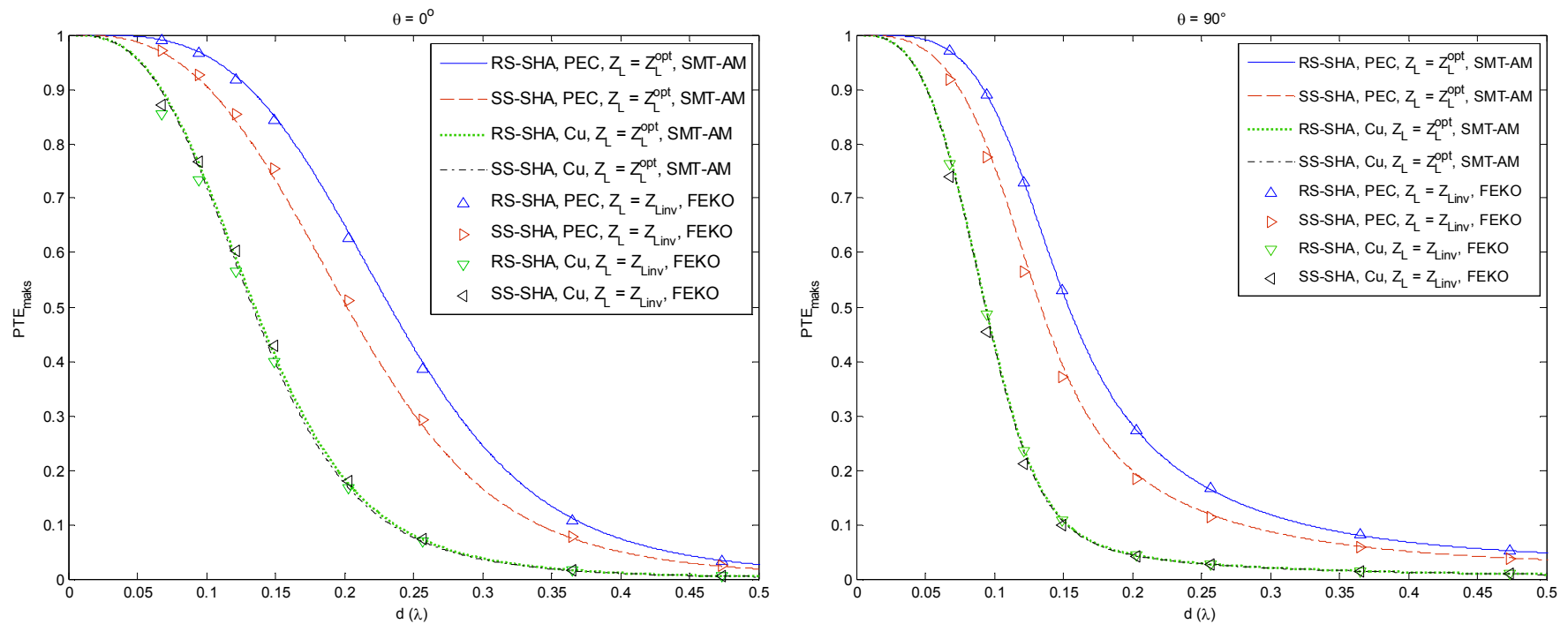
(Višestruko savijena sferna helikoidna antena)



Slika 19. Koeficijent  $T_m$  u ovisnosti o faktoru efikasnosti zračenja  $H_{Tm}$  i neusklađenosti modova  $\alpha_2/\alpha_1$  za odašiljač CARS-SHA s tri izdanka.

# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

(Višestruko savijena sferna helikoidna antena)



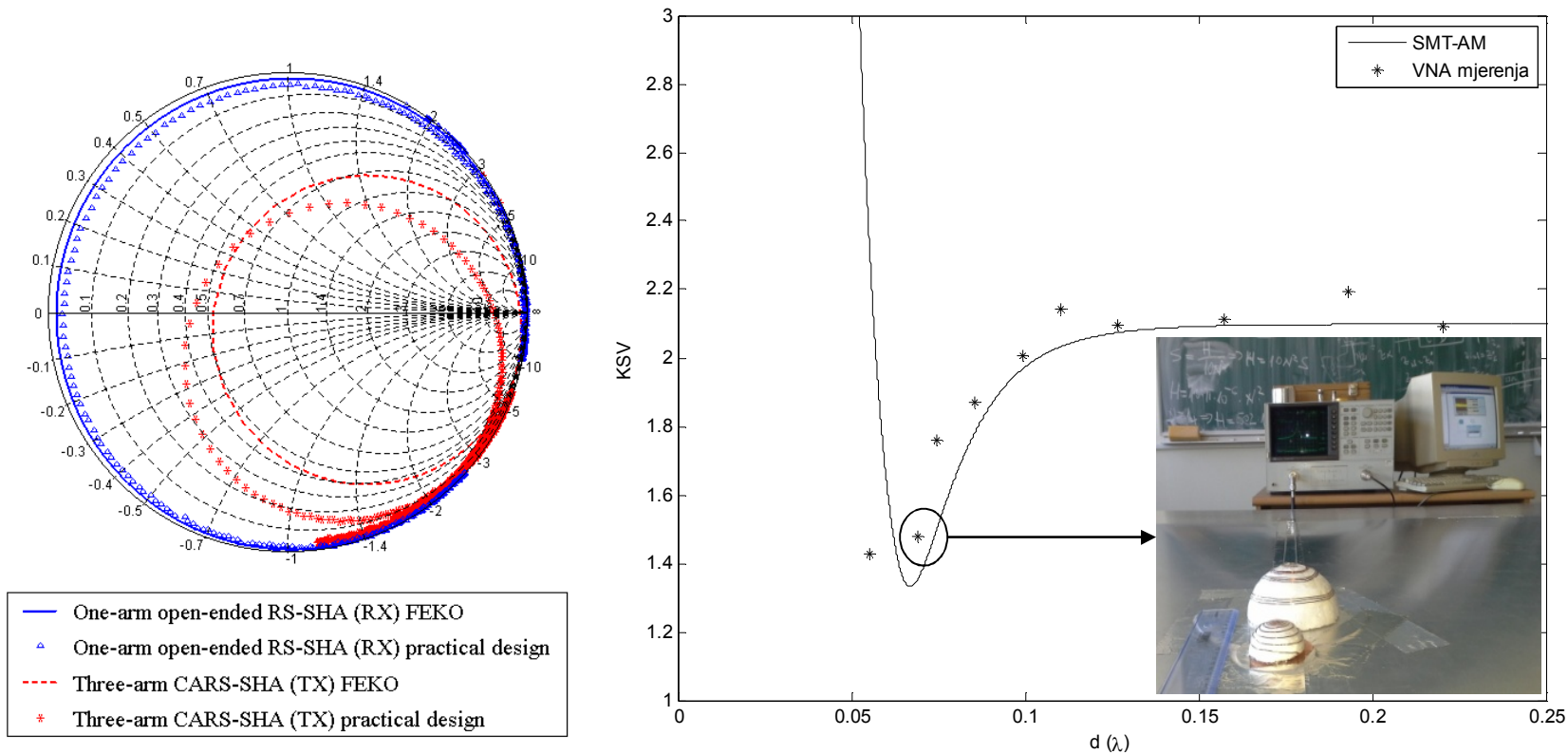
a) koaksijalni položaj antena

b) kolinearni položaj antena

Slika 20.  $PTE_{maks}$  za OK SHA prijamnike i odašiljač CARS-SHA s tri izdanka na 162.3 MHz.

# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

*(Višestruko savijena sferna helikoidna antena)*

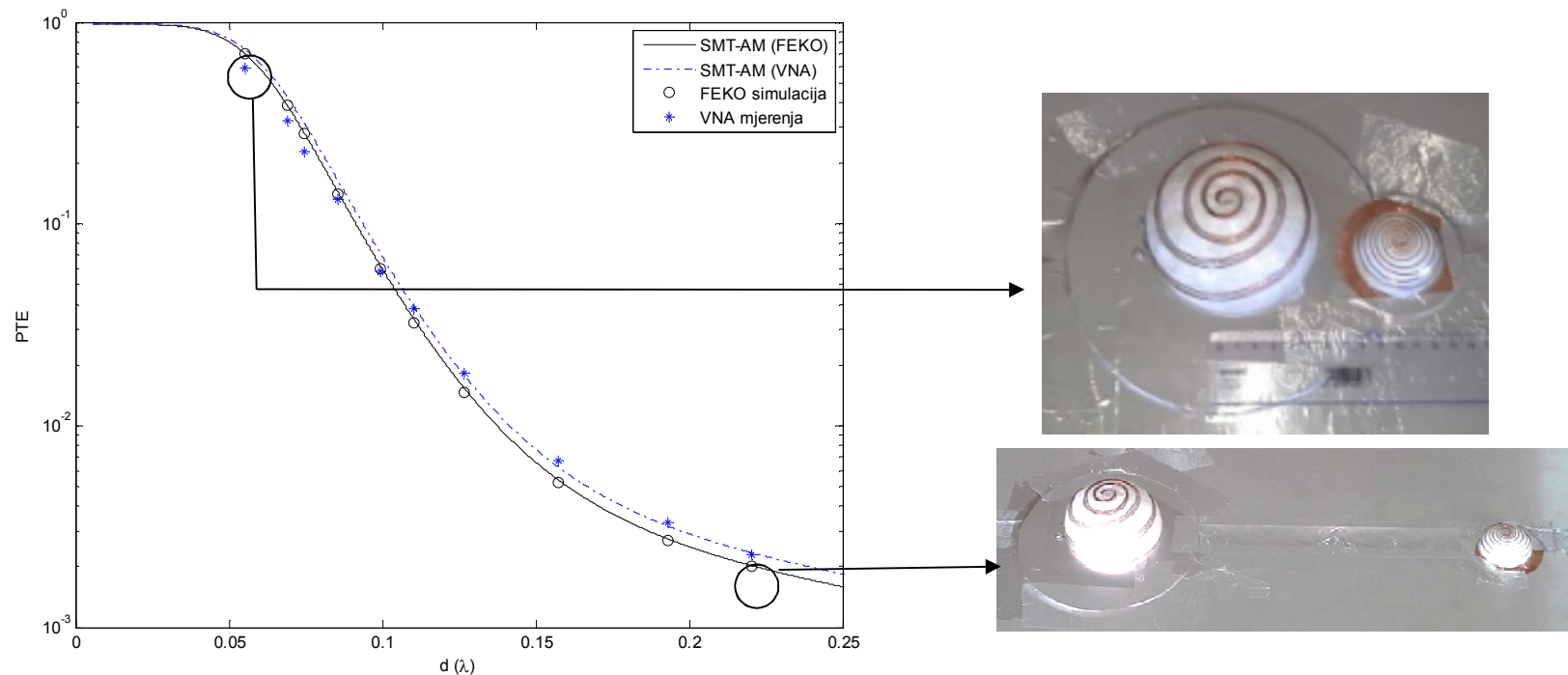


M. Škiljo and Z. Blažević, "Spherical helices for resonant wireless power transfer", International Journal of Antennas and Propagation, 2013, Vol. 2013, 1-12, 2013.



# Proračun sferne helikoidne antene za bežični prijenos snage

(Višestruko savijena sferna helikoidna antena)

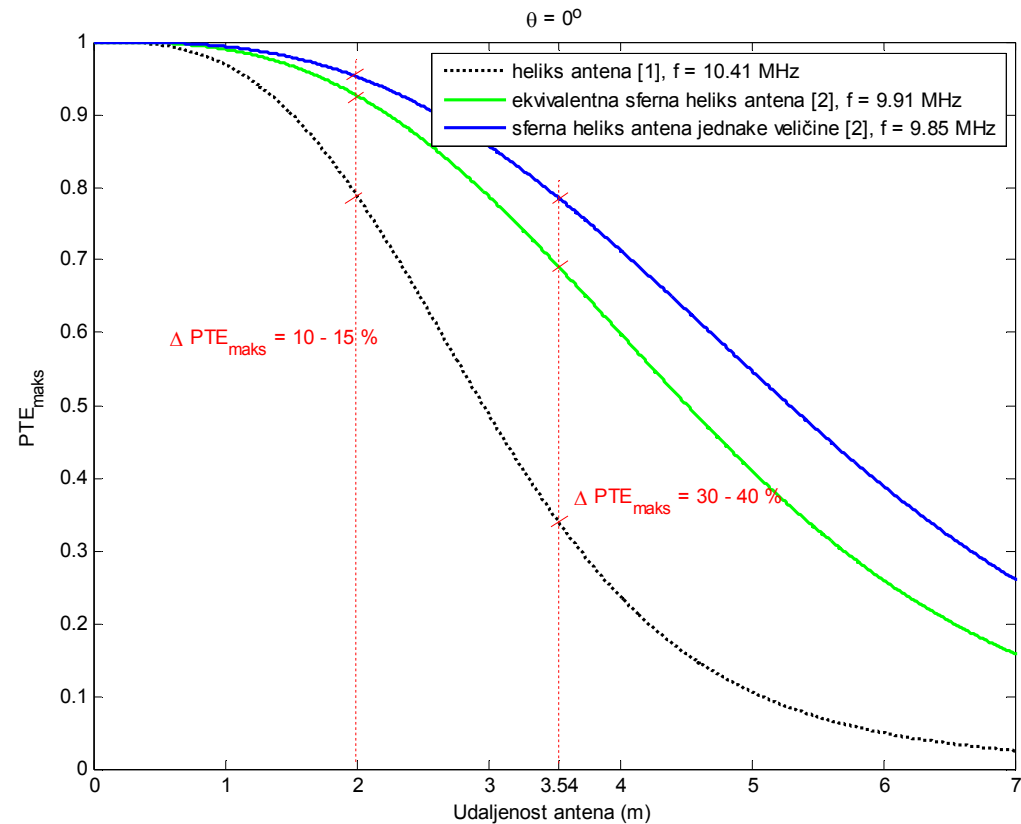


$$PTE_{meas} = \frac{|s_{21}|^2}{1 - |s_{11}|^2}$$

Slika 22. Izmjereni PTE između izrađenih SHA i njegova usporedba sa simulacijom i teorijom na  $f_{rez} = 165.3$  MHz.

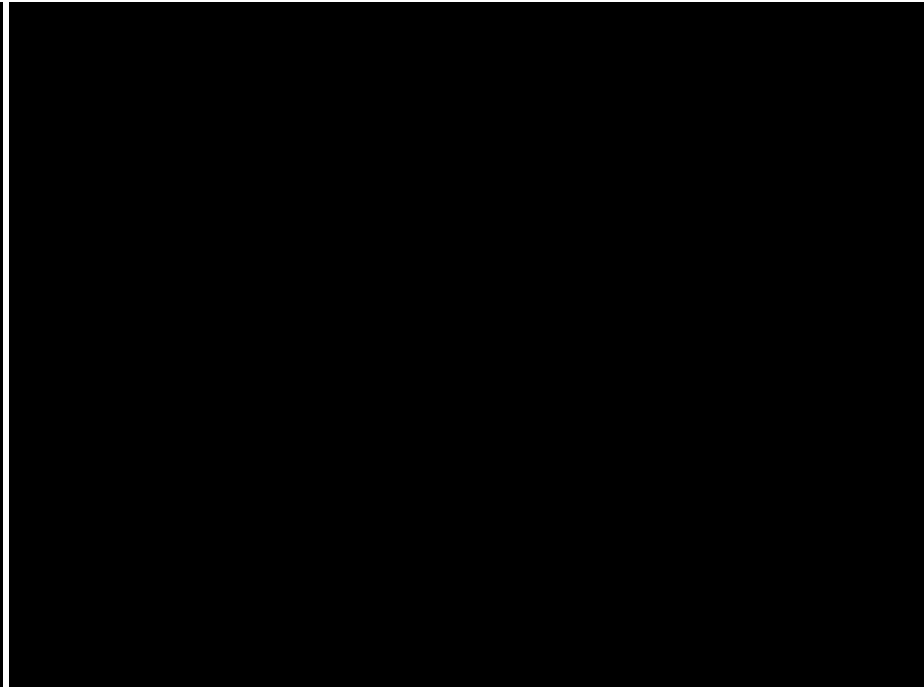
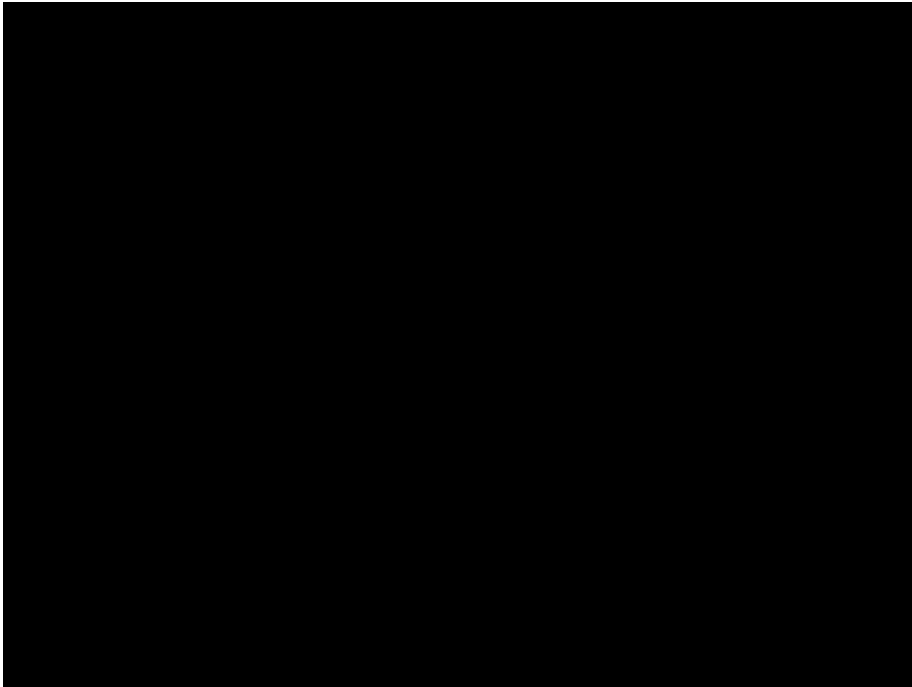
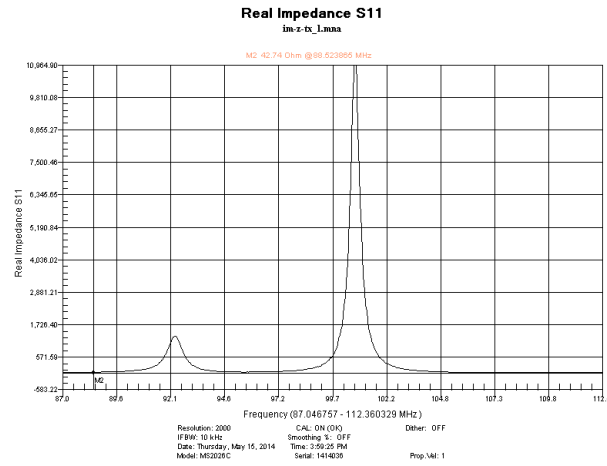
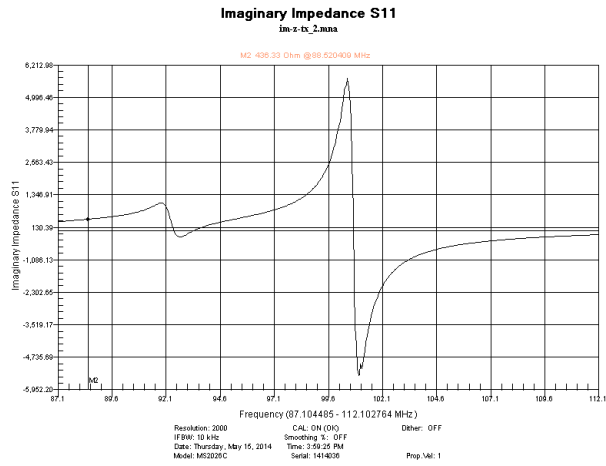
## Usporedba rezultata

- Cilindrična heliks antenna,  $r = 30$  cm,  $h = 20$  cm,  $ka = 0.064$ ,  $\eta_{rad} = 21$  %
- Četverostruko savijena sferna heliks antenna ekvivalentna cilindričnoj prema Wheeleru,  $r = 20.8$  cm,  $ka = 0.044$ ,  $\eta_{rad} = 51$  %
- Četverostruko savijena sferna heliks antenna jednake veličine sfere kao i cilindrična,  $r = 30$  cm,  $ka = 0.064$ ,  $\eta_{rad} = 68$  %



- [1] Kurs A., A. Karalis, R. Moffat, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Sci.*, Vol. 317, 83-86, 2007.
- [2] Škiljo, M., Blažević, Z., "Increasing the radiation efficiency and resistance of electrically small spherical helical antenna for wireless power transfer", Proceedings of SoftCOM 2013, 1-5, 18-20 Sept. 2013.

# Demonstracija- dokaz koncepta



Hvala na pozornosti!

