

24. Seminar Radijske Komunikacije

# Postopki računalniške simulacije anten s praktičnimi zgledi

Matjaž Vidmar

LSO, FE, Ljubljana, 5.–7.2.2020

# Seznam prosojnic: Postopki računalniške simulacije anten s praktičnimi zgledi

- 1 – Maxwellove enačbe v časovnem in frekvenčnem prostoru
- 2 – Odvodi skalarnih in vektorskih funkcij
- 3 – Neposredna rešitev Maxwellovih enačb
- 4 – Skalarni in vektorski potencial
- 5 – Zakasnjeni potenciali
- 6 – Preprosta antenska naloga
- 7 – Integralska enačba
- 8 – Momentni postopek MoM (Method of Moments)
- 9 – Neobremenjena in obremenjena tanka žica
- 10 – Tanka kovinska ploskev
- 11 – Tanka dielektrična plošča
- 12 – Kovinsko telo neničelne prostornine
- 13 – Končne razlike (elementi) v časovnem ali frekvenčnem prostoru
- 14 – Primerjava postopkov reševanja elektromagnetnih nalog
- 15 – Orodja za reševanje antenskih nalog
- 16 – Zgodovina orodja Numerical Electromagnetics Code (NEC)
- 17 – Opis preproste antene (simetrični enovalovni dipol) za NEC2
- 18 – Prikaz rezultatov s programom xnecview (Linux)
- 19 – Monopol nad ravnino mase iz žic (prikaz 4nec2 - Windows)
- 20 – Monopol nad ravnino mase iz krp (prikaz 4nec2 - Windows)
- 21 – Monopol nad obrnjenimi krpami (prikaz 4nec2 - Windows)

\*\*\*\*\*

## Časovni prostor

Ampère  $\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Faraday  $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Gauss  $\text{div } \vec{D} = \rho$

## Frekvenčni prostor $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow j\omega$

Ampère  $\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + j\omega \epsilon \vec{E}$

Faraday  $\text{rot } \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}$

Gauss  $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$

## Preprosta snov

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

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

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

*Diferencialna  
oblika v  
elektrodinamiki!*

## Smerni odvod

$$\text{grad } T = \nabla T = \vec{1}_{q_1} \frac{1}{h_1} \frac{\partial T}{\partial q_1} + \vec{1}_{q_2} \frac{1}{h_2} \frac{\partial T}{\partial q_2} + \vec{1}_{q_3} \frac{1}{h_3} \frac{\partial T}{\partial q_3}$$

## Izvornost

$$\text{div } \vec{F} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial (h_2 h_3 F_1)}{\partial q_1} + \frac{\partial (h_1 h_3 F_2)}{\partial q_2} + \frac{\partial (h_1 h_2 F_3)}{\partial q_3} \right]$$

## Vrtinčenje

$$\text{rot } \vec{F} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \begin{vmatrix} h_1 \vec{1}_{q_1} & h_2 \vec{1}_{q_2} & h_3 \vec{1}_{q_3} \\ \frac{\partial}{\partial q_1} & \frac{\partial}{\partial q_2} & \frac{\partial}{\partial q_3} \\ h_1 F_1 & h_2 F_2 & h_3 F_3 \end{vmatrix}$$

Koordinate

$q_1, q_2, q_3$

Faktorji skale

(Lamé)

$h_1, h_2, h_3$

*Antenska naloga: izvori  $\vec{J}, \rho \rightarrow$  polja  $\vec{E}, \vec{H}$*

*Gostota prevodniškega toka  $\vec{J}$  [A/m<sup>2</sup>]*

*Gostota elektrine  $\rho$  [As/m<sup>3</sup>]*

*Laplace  $\Delta \vec{F} = \text{grad}(\text{div} \vec{F}) - \text{rot}(\text{rot} \vec{F})$*

*Valovna enačba za  $\vec{E}$  [V/m]*

$$\Delta \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = j \omega \mu \vec{J} + \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \rho$$

*Valovna enačba za  $\vec{H}$  [A/m]*

$$\Delta \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = -\text{rot} \vec{J}$$

3 – Neposredna rešitev Maxwellovih enačb

*Uporabno v  
prostoru brez  
izvorov*

$$\vec{J} = 0 \quad \rho = 0$$

*oziroma v*

*izgubni snovi*

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}$$

Skalarni potencial  $V[V]$

Vektorski potencial  $\vec{A}[Vs/m]$

Izračun polja:

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \text{grad } V$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad \vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A}$$

Lorenzova izbira:  $\text{div } \vec{A} = -j\omega \mu \epsilon V$

$$\Delta \vec{A} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{A} = -\mu \vec{J}$$

$$\Delta V + \omega^2 \mu \epsilon V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Valovno  
število

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$$

Valovni  
enačbi za  
potenciala  
imata  
analitsko  
rešitev!

*Oddajnik* ( $\vec{r}'$ )

*Prazen prostor*  
 $J(\vec{r})=0$   $\rho(\vec{r})=0$

$$\text{div } \vec{J} + j \omega \rho = 0$$

$\vec{r}' \equiv \textit{koord.vira}$

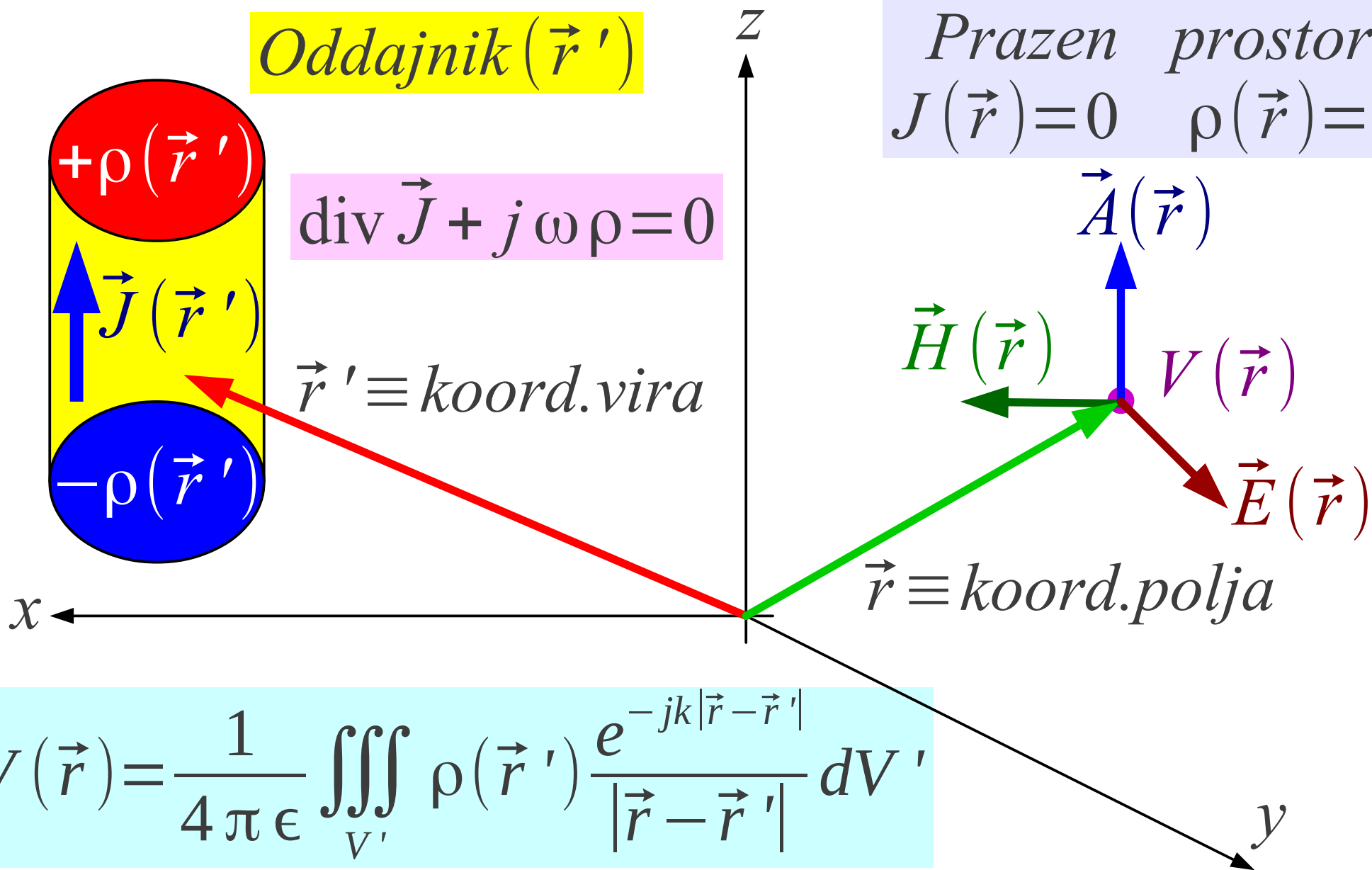
$\vec{r} \equiv \textit{koord.polja}$

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_{V'} \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV'$$

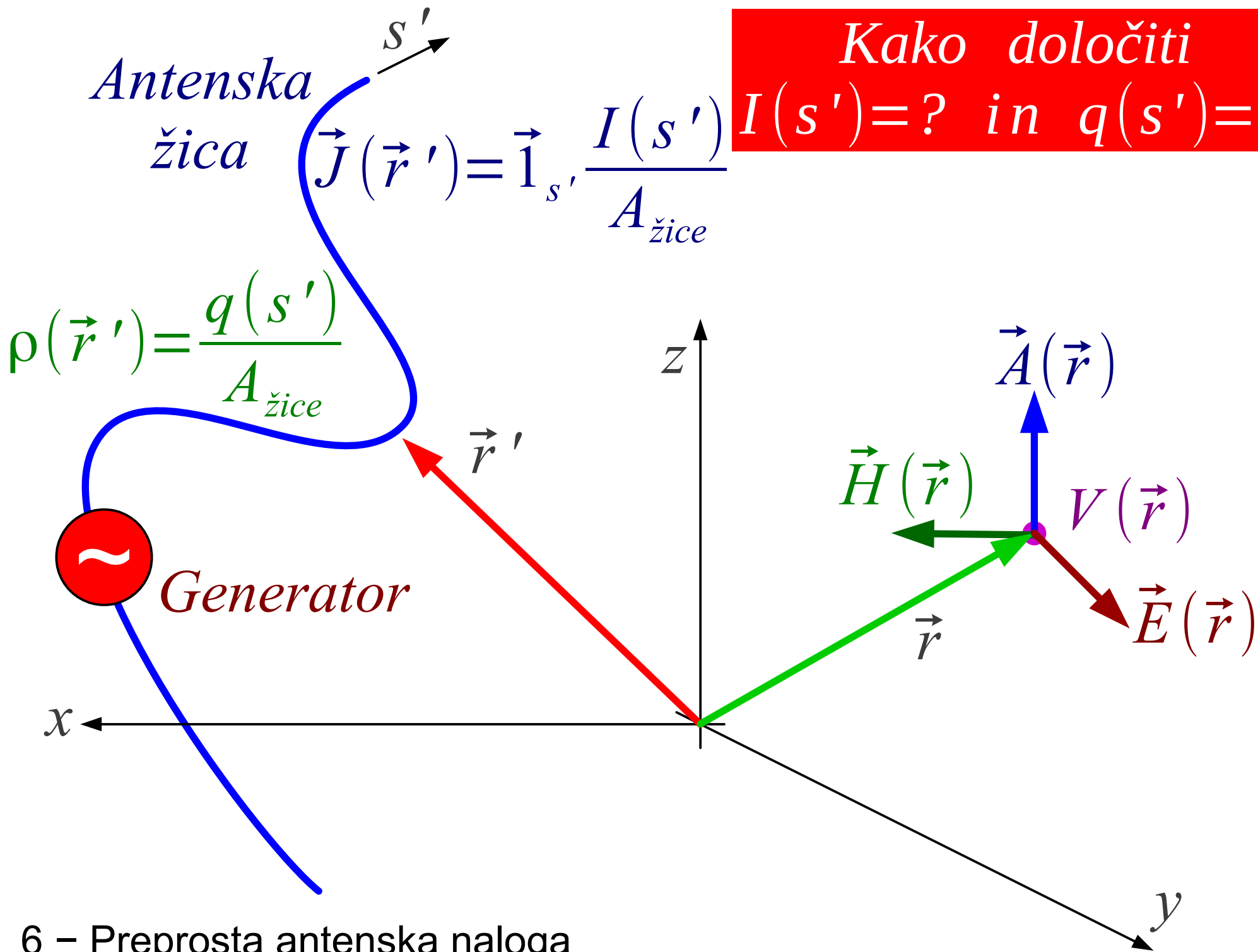
$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

5 - Zakasneni potenciali

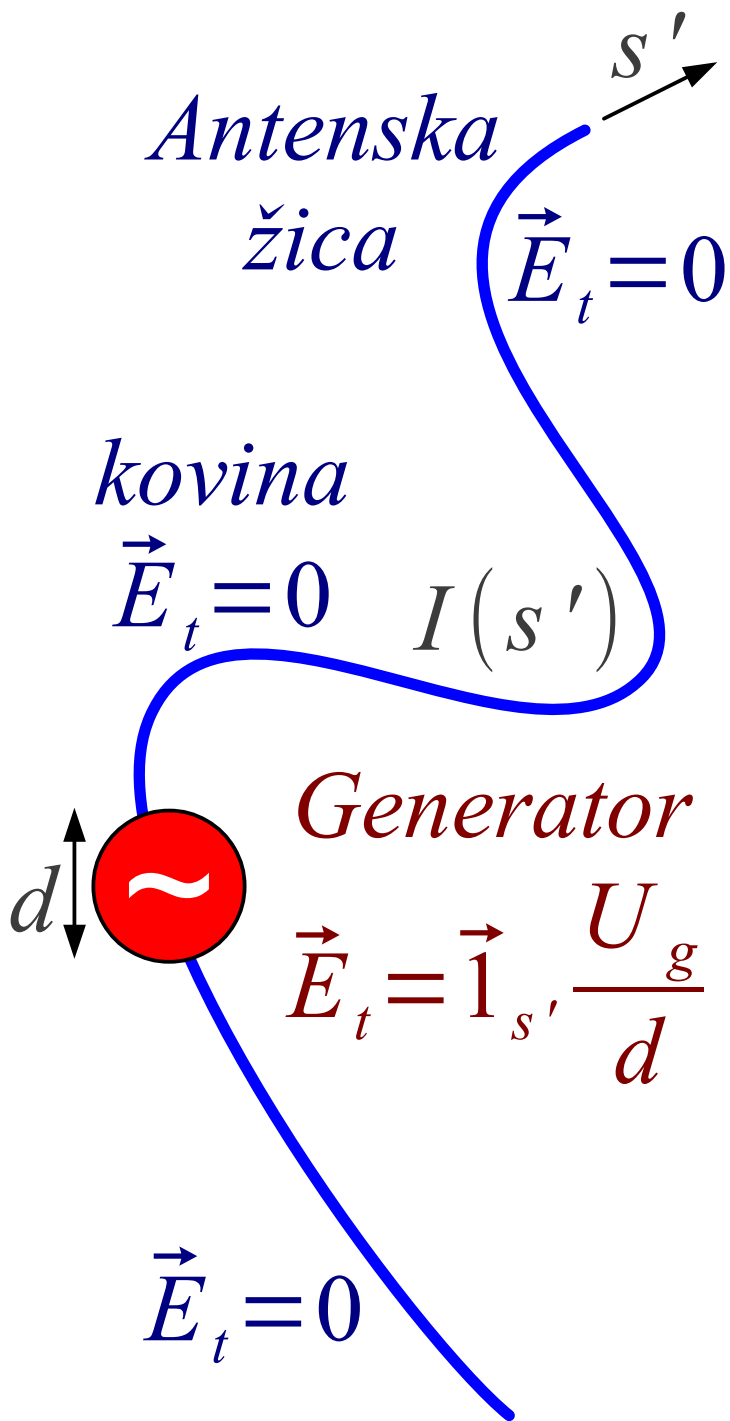
$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV'$$



*Kako določiti*  
 $I(s')=?$  in  $q(s')=?$







*Lorenz*:  $V = \frac{j}{\omega \mu \epsilon} \text{div } \vec{A}$

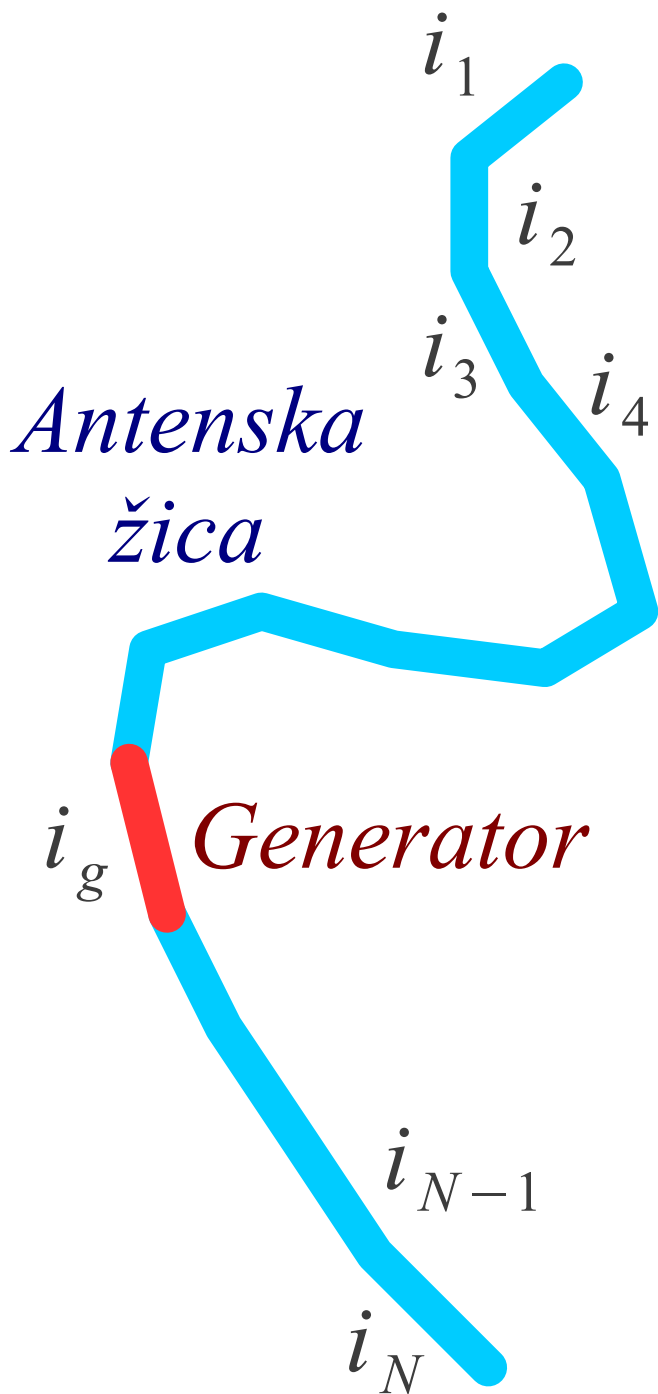
$$\vec{E} = -j \omega \vec{A} - \text{grad} \left[ \frac{j}{\omega \mu \epsilon} \text{div } \vec{A} \right]$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4 \pi} \int_{s'} \vec{1}_{s'} I(s') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} ds'$$

$\vec{E}_t(\vec{r})$  na žici  $\rightarrow I(s') = ?$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j \omega \mu}{4 \pi} \int_{s'} \vec{1}_{s'} I(s') \cdot$$

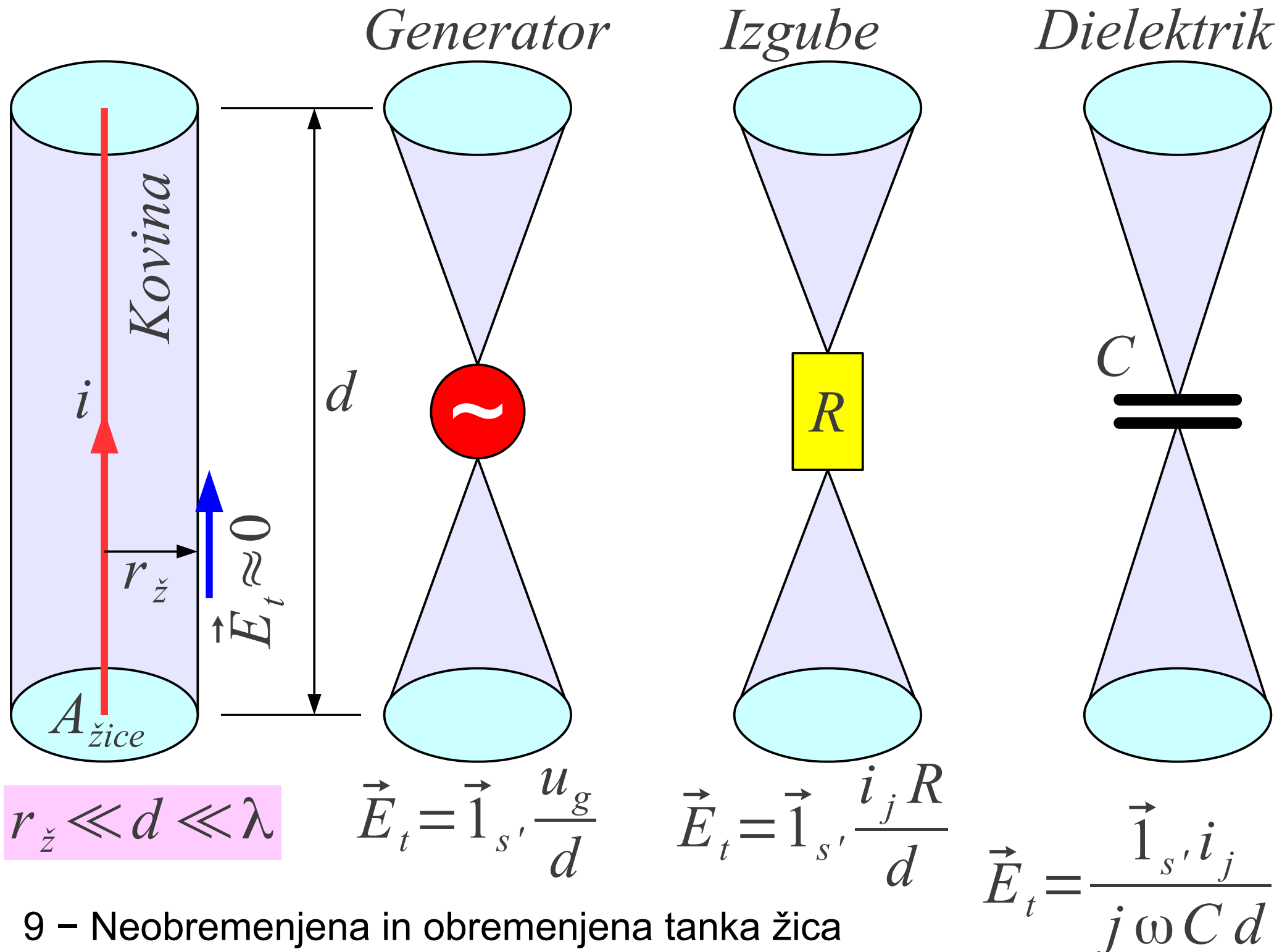
$$\cdot \left[ 1 + \frac{1}{k^2} \text{grad}_r (\text{div}_r) \right] \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} ds'$$



Številski približek  $I(s') \approx \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \cdot \\ i_N \end{bmatrix}$

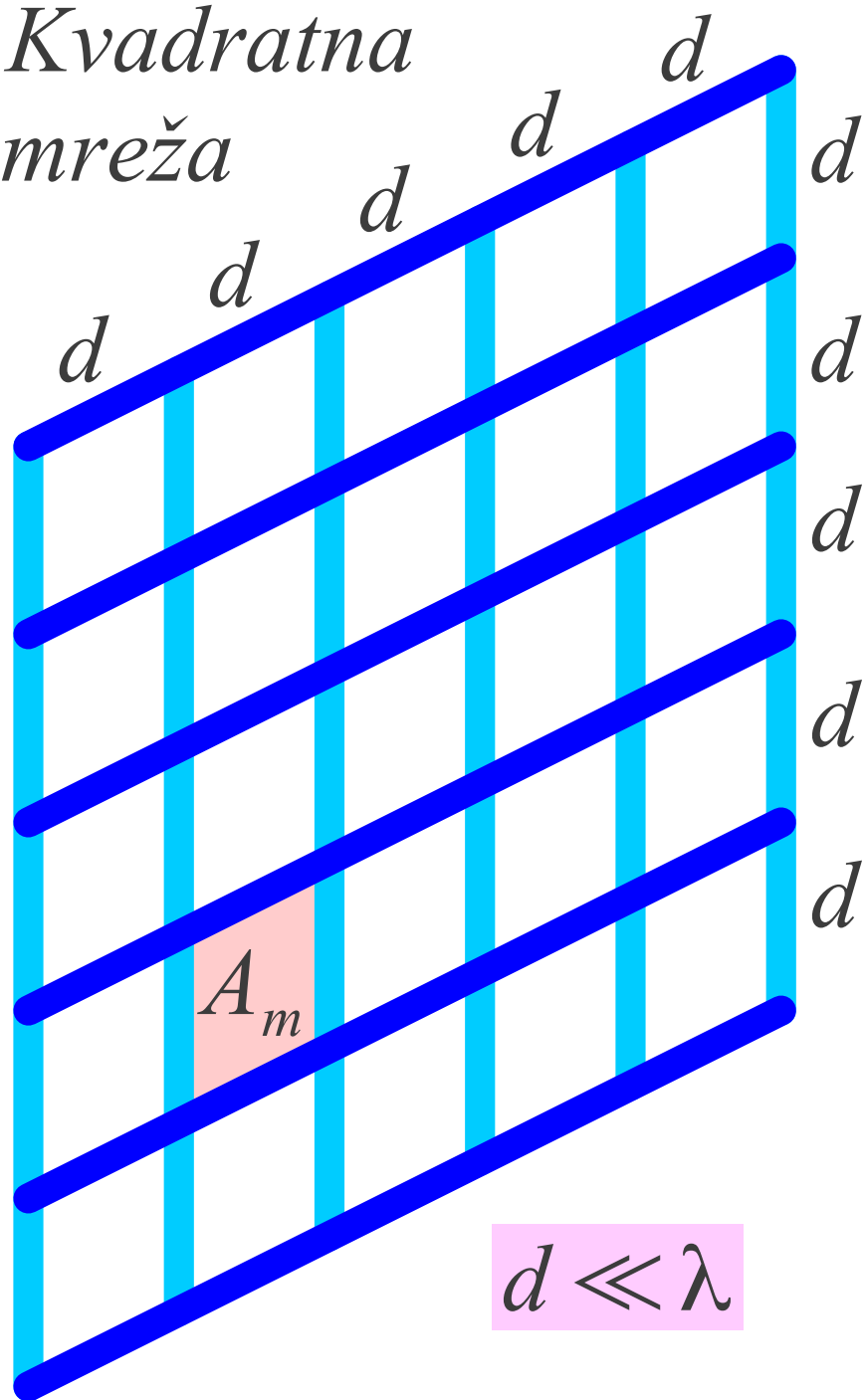
*Sistem linearnih enačb*

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdot & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdot & Z_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdot & Z_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \cdot \\ i_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ u_g / d \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$



9 – Neobremenjena in obremenjena tanka žica

*Kvadratna mreža*



10 – Tanka kovinska ploskev

$$A_m = d^2$$

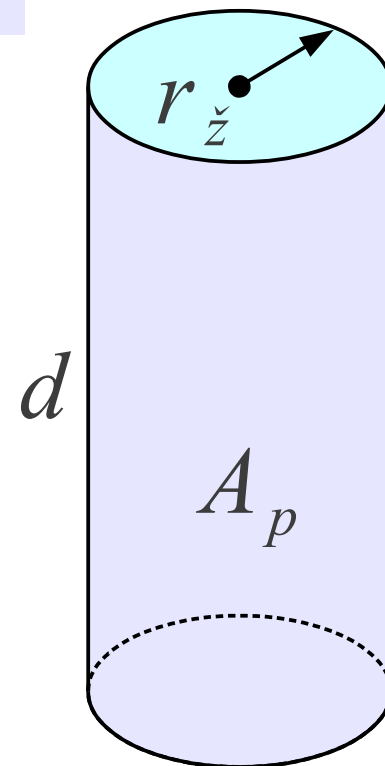
$$A_p = 2\pi r_{\check{z}} d$$

*Pravilo enakih površin*  
 $A_m \approx A_p$

$$d^2 \approx 2\pi r_{\check{z}} d$$

$$d \approx 2\pi r_{\check{z}}$$

*Odsek žične mreže*



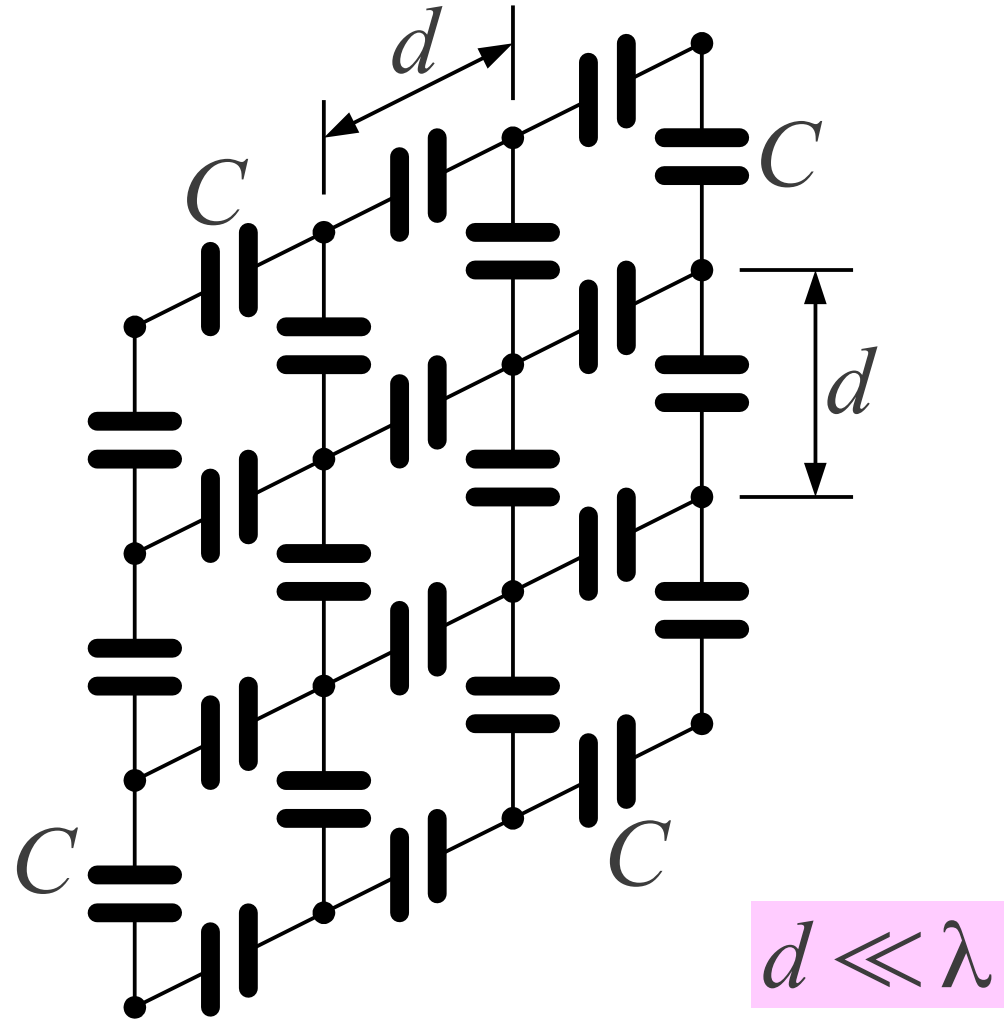
*Prazen prostor*

$$\epsilon = \epsilon_0$$



$$\delta \ll \lambda$$

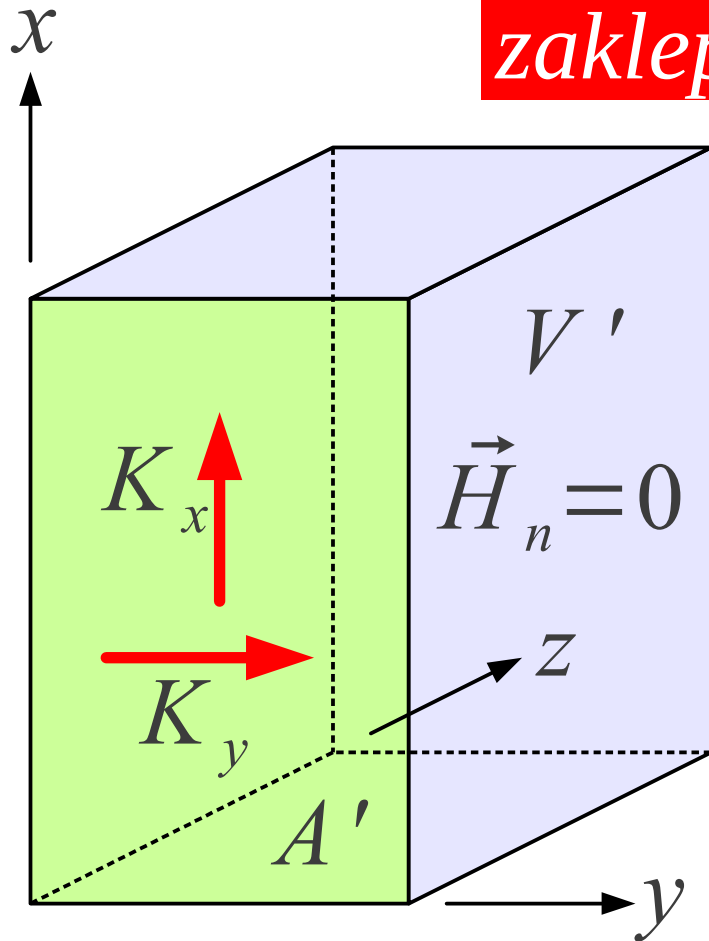
11 – Tanká dielektričná plošča



*Mreža kondenzatorjev*

$$C \approx \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \delta$$

*Pogoj: sklenjena ploskev  $A'$   
zaklepa neničelno prostornino  $V' \neq 0$*



$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A}$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{A'} \vec{K}(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dA'$$

*Integralska enačba za  $\vec{H}_{nt}$*   
 $H_{nx} = 0, H_{ny} = 0 \rightarrow K_x = ?, K_y = ?$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{-1}{4\pi} \int_{A'} \vec{K}(\vec{r}') \times \text{grad}_r \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dA'$$

# Neposredno številsko reševanje Maxwellovih DE

Absorber PML (Perfectly Matched Layer)

Mreža računanja

Dielektrik

$$r > 1/k$$

Kovina

Generator

Kovina PEC (Perfect Electric Conductor)

	Medsebojni vplivi	Čas reševanja	Velikost pomnilnika	Število neznank N	Velikost naloge
Momentni postopek MoM	Zahtevni: vsak odsek vpliva na celoten prostor	$\alpha \cdot N^3$	$\alpha \cdot N^2$	$\sim 1000$ $> 30$	Neskončna (večinoma prazen prostor)
Končne razlike (elementi) FD/FEM	Preprosti: vsak odsek vpliva samo na sosede	$\alpha \cdot N^2$	$\alpha \cdot N$	$\sim 10^6$ $> 3 \cdot 10^4$	Končna (poljubna kombinacija snovi)



Tržna računalniška orodja danes najpogosteje uporabljajo neposredno reševanje diferencialnih enačb FD/FEM v mehaniki, statiki, akustiki, aerodinamiki, hidrodinamiki, prenosu toplote itd.

- (1) Vse opisane fizikalne naloge imajo večinoma končne izmere.
- (2) Samo reševanje diferencialnih enačb je razmeroma preprosto.
- (3) Postavljanje mreže računanja je zahtevno, ročno skoraj ni možno.
- (4) Različne fizikalne naloge (multiphysics) imajo podobne postopke.
- (5) Simulacija anten je tržna niša, kjer neskončne izmere rešuje PML.

Momentni postopek MoM temelji na izračunu elektromagnetnega polja preko potencialov, običajno v frekvenčnem prostoru.

- (1) Antenske naloge imajo neskončne izmere.
- (2) Antene so razmeroma ozkopasovne naprave (frekvenčni prostor).
- (3) Neznanke so samo v strukturi antene, v praznem prostoru jih ni.
- (4) Postavljanje žičnih odsekov je preprosto, pogosto ročno izvedljivo.
- (5) Izračun medsebojnih vplivov vsebuje zamuden  $e^{-jkr}$ .
- (6) Reševanje sistema linearnih enačb je zamudno  $\propto N^3$ .
- (7) Simulacija 3D dielektrikov je računsko zelo potratna.
- (8) Simulacijo anten z MoM uporabljajo tržna orodja vseh cenovnih razredov kot tudi prostodostopna orodja in odprtokodna orodja.

1968 – knjiga R.F.Harrington: Field Computation by Moment Methods

G.J.Burke in A.J.Poggio skupaj s številnimi sodelavci pri Lawrence Livermore National Laboratory razvijejo NUMERICAL ELECTROMAGNETICS CODE (NEC) - METHOD OF MOMENTS.

NEC je pisan v računalniškem jeziku FORTRAN. Vhodni podatki (opis antene) so v obliki preproste tekstovne ASCII datoteke. Izhodni podatki so prav tako v obliki tekstovne ASCII datoteke in vsebujejo poleg preverjenih vhodnih podatkov še izračunane tokove na vseh odsekih antene. Dodatno lahko vsebujejo tudi izračunan smerni diagram, impedanco napajanja in druge rezultate računanja.

1981 – objavljena izvorna koda, obširen opis in natančna navodila najbolj znane in razširjene inačice NEC2.

1992 – dokončana zadnja inačica NEC4.

Računska jedra NECx danes poganjajo širno množico programov za simulacijo anten, od najdražjih plačljivih do zastojkarskih in odprtokodnih, od optimiziranega FORTRAN do prevoda v C.

16 – Zgodovina orodja Numerical Electromagnetics Code (NEC)

```

CM enovalovni dipol (NEC2)
CE
GW 1 55 0 0 -.5 0 0 .5 .001
GE
EX 0 1 28 0 1 0
RP 0 37 72 1 0 0 5 5

```

CM≡poljuben ASCII komentar

CE≡oznaka konca komentarja

GW≡geometrija ravne žice  
 1≡številka žice  
 55≡število segmentov na žici  
 0,0,-.5≡(x,y,z) začetka žice  
 0,0,.5≡(x,y,z) konca žice  
 .001≡polmer žice  
 (Brez FR so vse izmere v  $\lambda$ !)

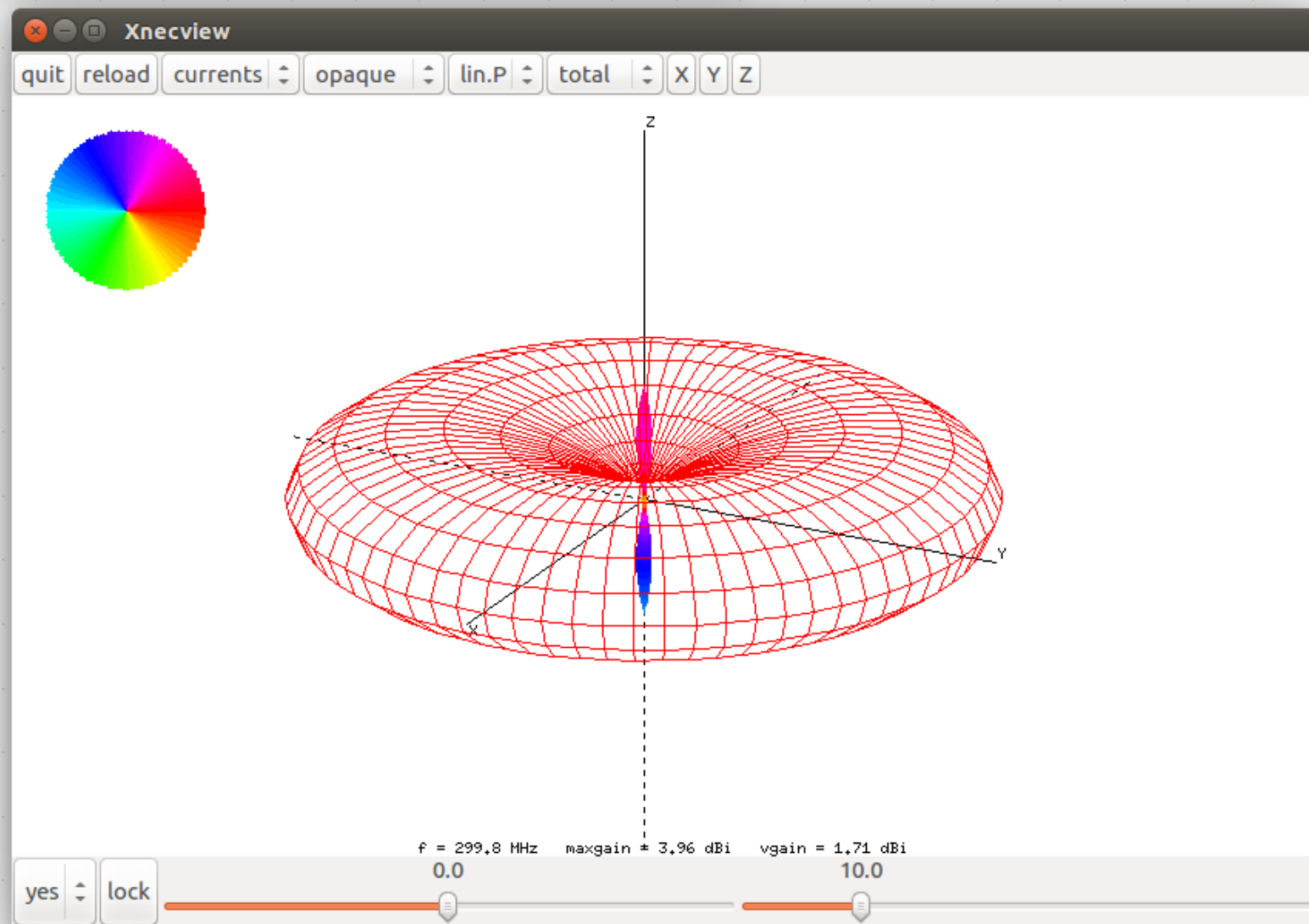
GE≡oznaka konca geometrije

EX≡izvedba vzbujanja  
 0≡napetostni vir v segmentu  
 1≡številka vzbujsane žice  
 28≡številka segmenta na žici  
 0≡brez dodatnih zahtev  
 1≡ $\text{Re}[U_g]=1\text{V}$   
 0≡ $\text{Im}[U_g]=0\text{V}$

RP≡smerni diagram & zagon  
 0≡brez učinka tal  
 37≡število korakov  $\Theta$   
 72≡število korakov  $\Phi$   
 1≡XNDA izračun dobitka  
 0≡začetni  $\Theta$  (stopinje)  
 0≡začetni  $\Phi$  (stopinje)  
 5≡korak  $\Theta$  (stopinje)  
 5≡korak  $\Phi$  (stopinje)

```
cefizelj7@cefizelj7-HP-EliteBook-8540w: ~/Desktop/dipol
sidecefizelj7@cefizelj7-HP-EliteBook-8540w:~/Desktop/dipol$ xneview dipol.out
XNECVIEW 1.35

#  freq.      Zr      Zi      SWR      gain      f/b      phi      theta
   299.8  1030.37 -1118.43  44.914   3.96      0        0        90
```



18 – Prikaz rezultatov s programom xneview (Linux)

```

CM Monopol 5m z ravnino mase 4.5x4.5m
CM masa iz zicne mreze 9x9
CE
GW 2 8 -2.25 -2.25 0 -2.25 2.25 0 .05
GM 0 8 0 0 0 .5625 0 0
GM 0 1 0 0 90 0 0 0
GW 1 9 0 0 0 0 0 5 .05
GE
FR 0 0 0 0 15
EX 0 1 1 0 1 0
RP 0 73 73 1 0 0 5 5

```

**Main [V5.8.16] (F2)**

File Edit Settings Calculate Window Show Run Help

Filename:  Frequency:  Mhz  
Wavelength:  mtr

Voltage:  Current:

Impedance:  Series comp.:  uH  
Parallel form:  Parallel comp.:  uH

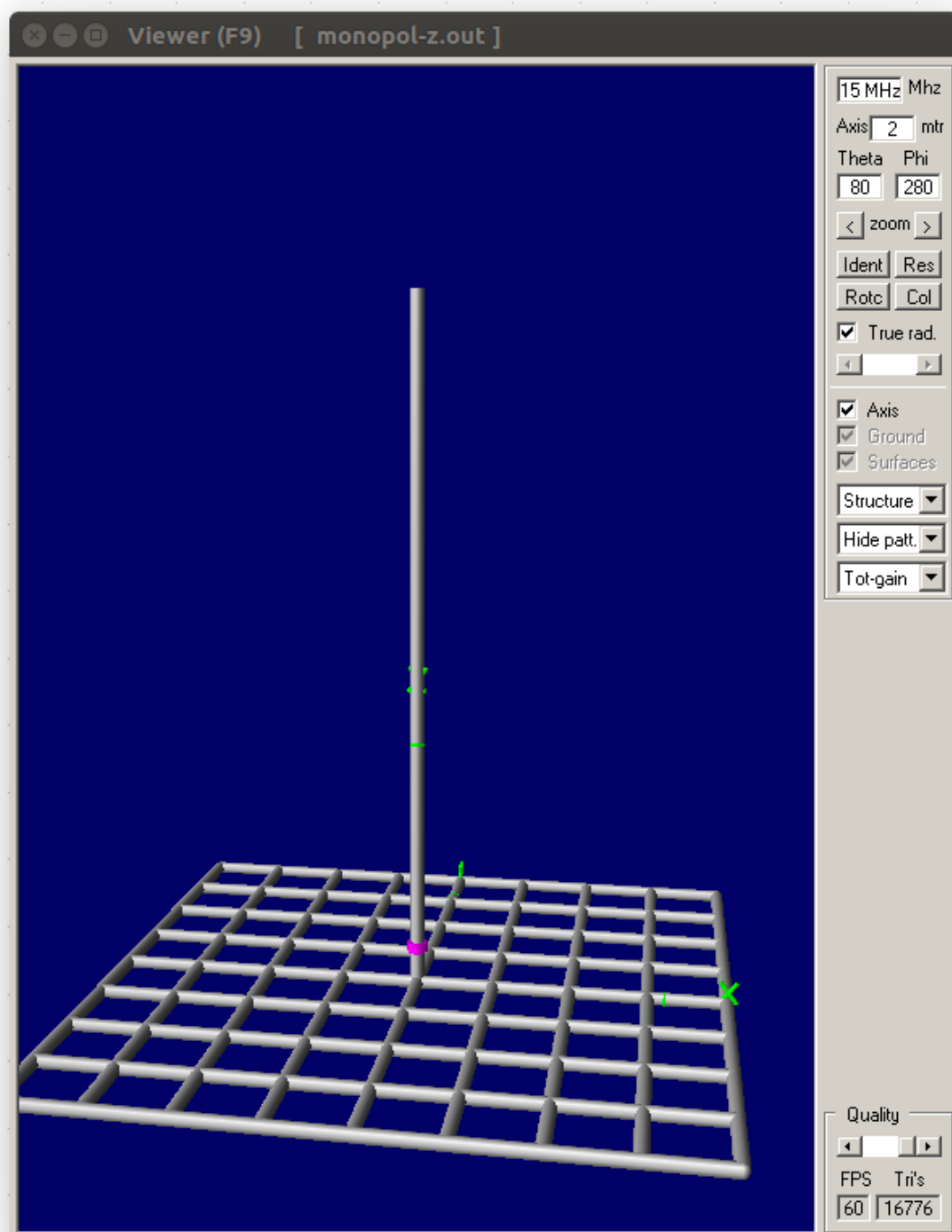
S.W.R.50:  Input power:  W  
Efficiency:  % Structure loss:  uW  
Radiat-eff.:  Network loss:  uW  
RDF [dB]:  Radiat-power:  W

Environment:  Loads  Polar

FREE SPACE

Comment: Monopol 5m z ravnino mase 4.5x4.5m  
masa iz zicne mreze 9x9

Seg's/patches:  start stop count step  
Pattern lines:  Theta      
Freq/Eval steps:  Phi      
Calculation time:  s



19 – Monopol nad ravnino mase iz žic (prikaz 4nec2 - Windows)

```

CM Monopol 5m z ravnino mase 4.5x4.5m
CM masa iz splosnih flik "0"
CE
SP 0 0 -2 -2 0 90 0 0.25
GM 0 8 0 0 0 .5 0 0
GM 0 8 0 0 0 0 .5 0
GW 1 9 0 0 0 0 0 5 .05
GE
FR 0 0 0 0 15
EX 0 1 1 0 1 0
RP 0 73 73 1 0 0 5 5

```

**Main [V5.8.16] (F2)**

File Edit Settings Calculate Window Show Run Help

Filename:  Frequency:  Mhz  
Wavelength:  mtr

Voltage:  Current:

Impedance:  Series comp.:  uH  
Parallel form:  Parallel comp.:  uH

S.W.R.50:  Input power:  W  
Efficiency:  % Structure loss:  uW  
Radiat-eff.:  Network loss:  uW  
RDF [dB]:  Radiat-power:  W

Environment:  Loads  Polar

FREE SPACE

Comment: Monopol 5m z ravnino mase 4.5x4.5m  
masa iz splosnih flik "0"

Seg's/patches:  start stop count step  
Pattern lines:  Theta      
Freq/Eval steps:  Phi      
Calculation time:  s

Viewer (F9) [ monopol-f.out ]

**Nefizikalno!**

15 MHz Mhz  
Axis  mtr  
Theta  Phi   
< zoom >  
Ident Res  
Rotc Col  
 True rad.  
 Axis  
 Ground  
 Surfaces  
Structure  
Hide patt.  
Tot-gain  
Quality  
FPS  Tri's

20 – Monopol nad ravnino mase iz krp (prikaz 4nec2 - Windows)

```

CM Monopol 5m z ravnino mase 4.5x4.5m
CM masa iz obrnjenih flik "0"
CE
SP 0 0 -2 -2 0 270 0 0.25
GM 0 8 0 0 0 .5 0 0
GM 0 8 0 0 0 0 .5 0
GW 1 9 0 0 0 0 0 5 .05
GE
FR 0 0 0 0 15
EX 0 1 1 0 1 0
RP 0 73 73 1 0 0 5 5

```

**Main [V5.8.16] (F2)**

File Edit Settings Calculate Window Show Run Help

Filename:  Frequency:  Mhz  
Wavelength:  mtr

Voltage:  Current:

Impedance:  Series comp.:  uH  
Parallel form:  Parallel comp.:  uH

S.W.R.50:  Input power:  W  
Efficiency:  % Structure loss:  uW  
Radiat-eff.:  Network loss:  uW  
RDF [dB]:  Radiat-power:  W

Environment:  Loads  Polar

FREE SPACE

Comment: Monopol 5m z ravnino mase 4.5x4.5m  
masa iz obrnjenih flik "0"

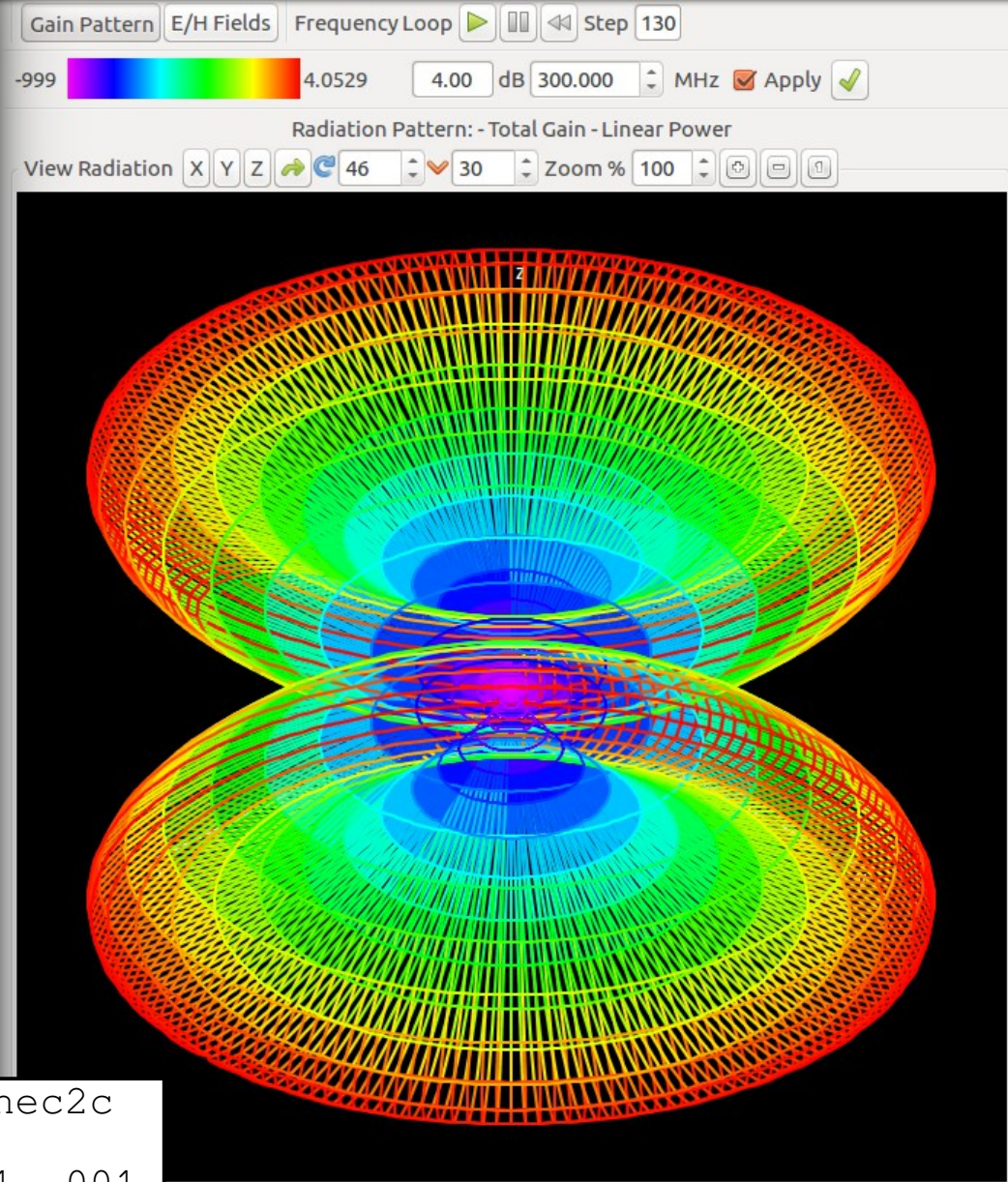
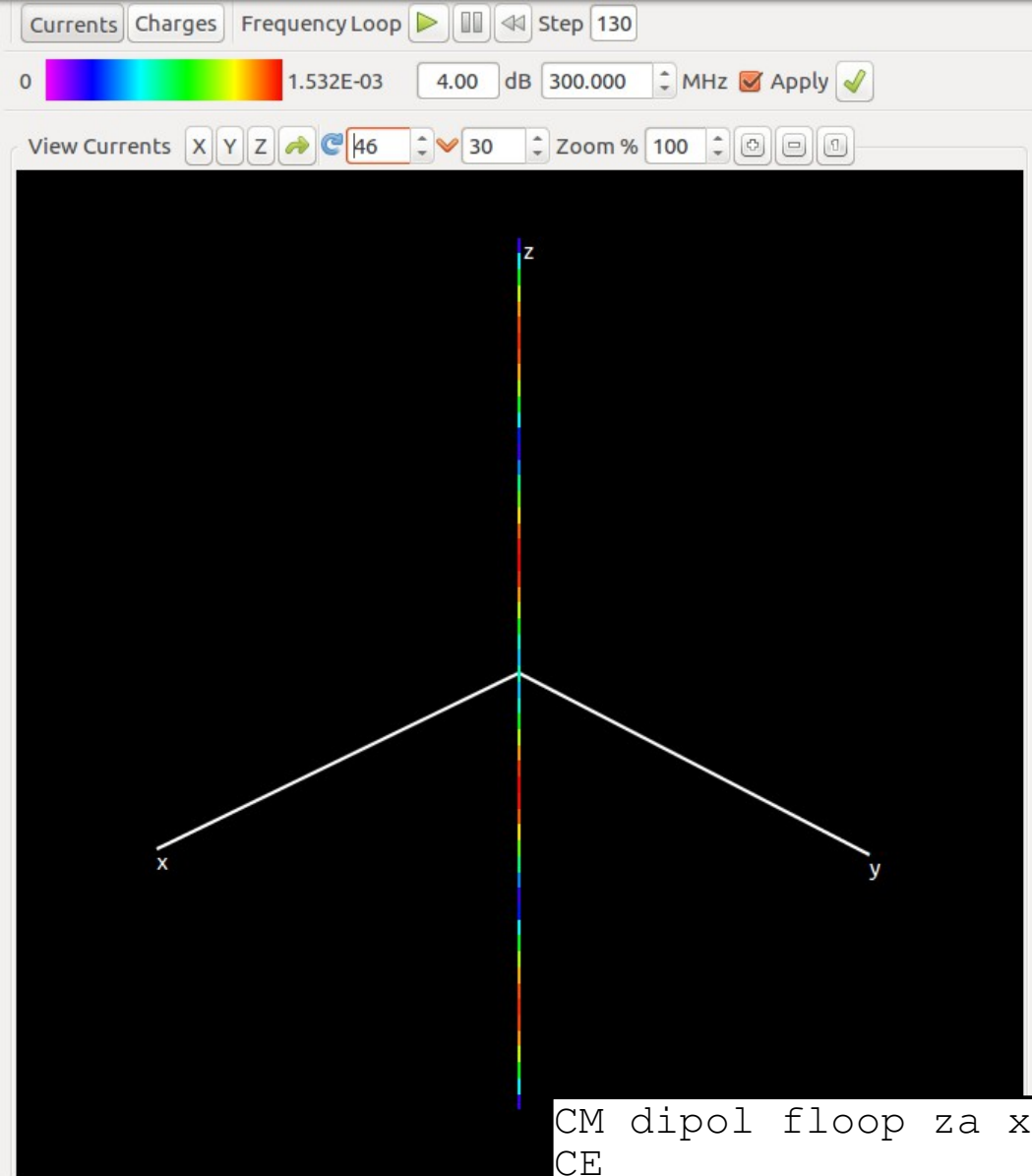
Seg's/patches	<input type="text" value="90"/>	start	stop	count	step	
Pattern lines	<input type="text" value="5329"/>	Theta	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="360"/>	<input type="text" value="73"/>	<input type="text" value="5"/>
Freq/Eval steps	<input type="text" value="1"/>	Phi	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="360"/>	<input type="text" value="73"/>	<input type="text" value="5"/>
Calculation time	<input type="text" value="0.250"/> s					

Viewer (F9) [ monopol-r.out ]

**Nefizikalno!**

15 MHz Mhz  
Axis  mtr  
Theta  Phi   
< zoom >  
Ident Res  
Rotc Col  
 True rad.  
 Axis  
 Ground  
 Surfaces  
Structure  
Hide patt.  
Tot-gain  
Quality  
FPS  Tri's

21 – Monopol nad obrnjenimi krpami (prikaz 4nec2 - Windows)



```

CM dipol floop za xnec2c
CE
GW 1 55 0 0 -1 0 0 1 .001
GE
EX 0 1 28 0 1 0
FR 0 131 0 0 40 2
RP 0 91 180 0 0 0 2 2
EN

```

22 – Animacija po frekvenci s programom xnec2c (Linux)





