

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)
- 22 – Animacija po frekvenci s programom xnec2c (Linux)
- 23 – 5 elementna NBS Yagi-Uda z γ napajanjem za 430MHz
- 24 – Napačna simulacija nosilca z debelo žico NEC
- 25 – Uporabna simulacija nosilca s 3D žično mrežo
- 26 – Geometry builder v programu 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/m²]

Gostota elektrine ρ [As/m³]

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

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

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

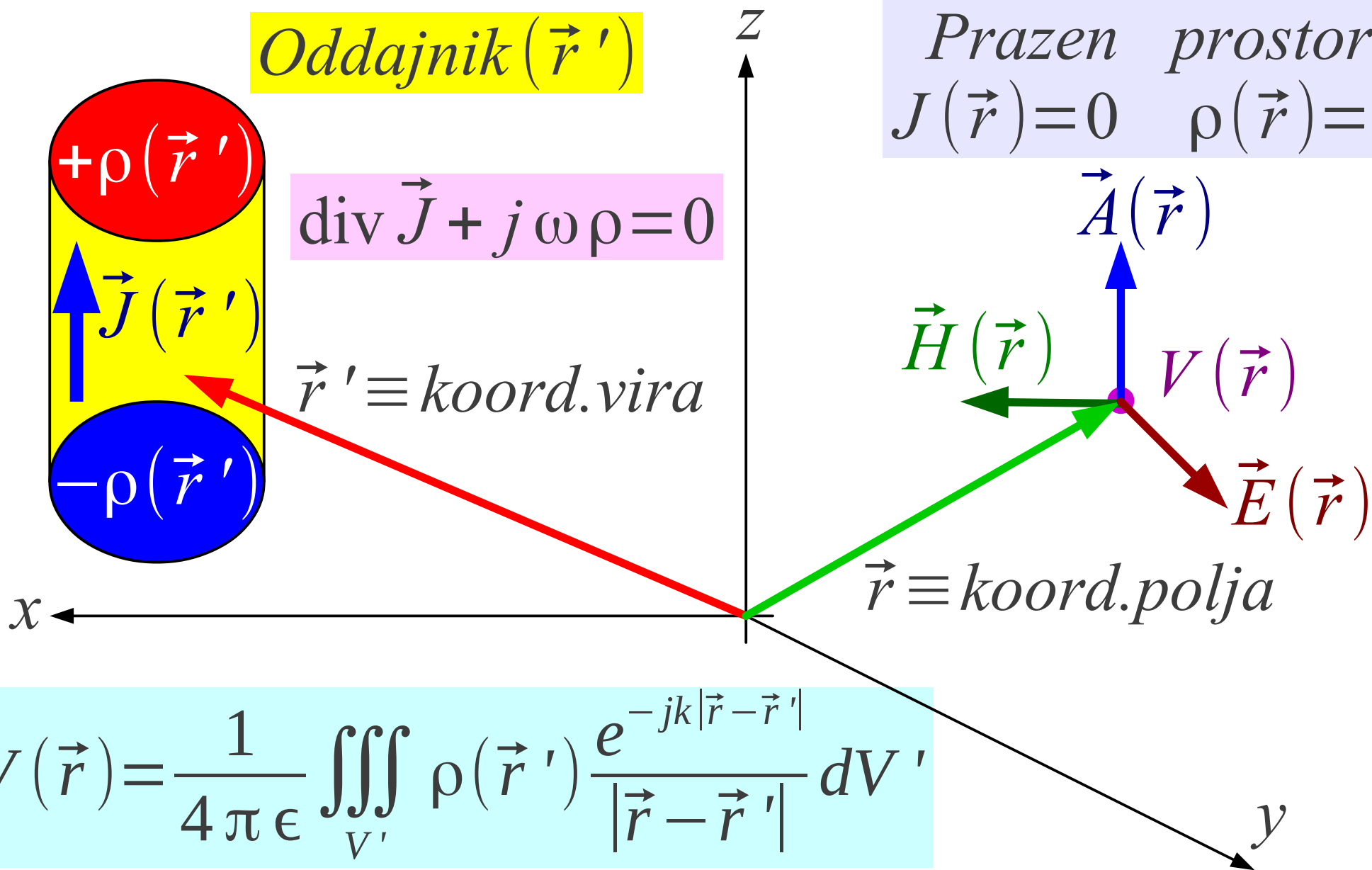
$\vec{r} \equiv \textit{koord.polja}$

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

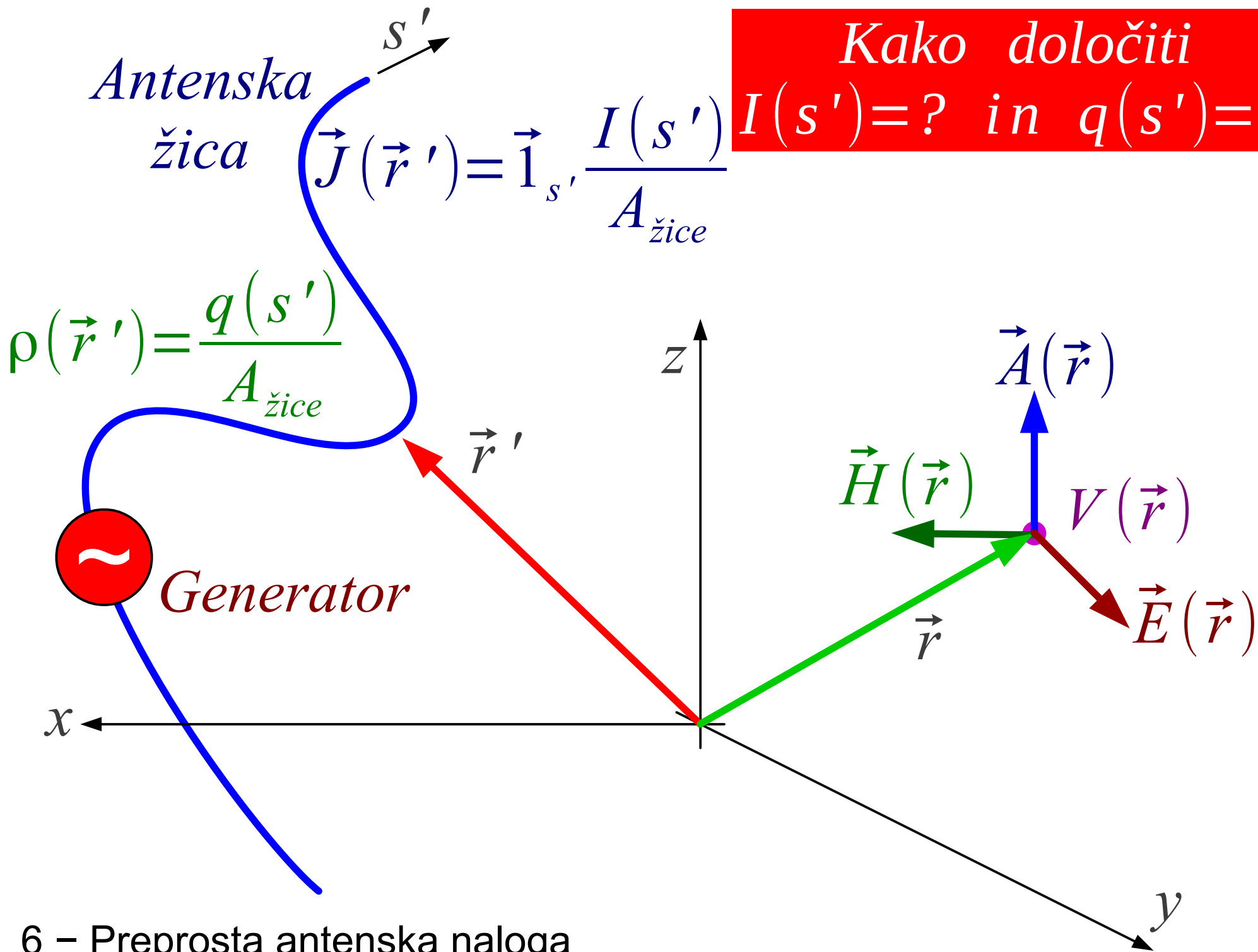
$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

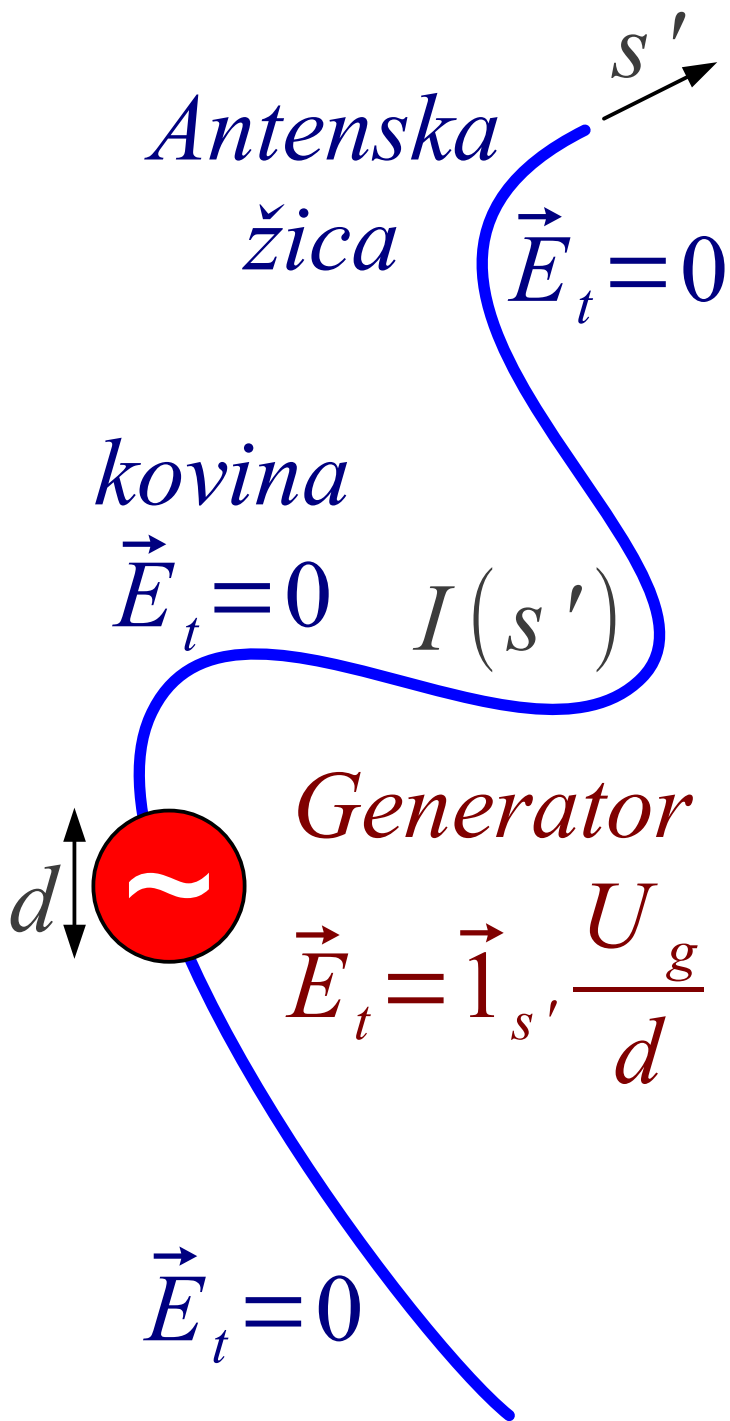
5 - Zakasneni potenciali

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



Kako določiti
 $I(s')=?$ in $q(s')=?$





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

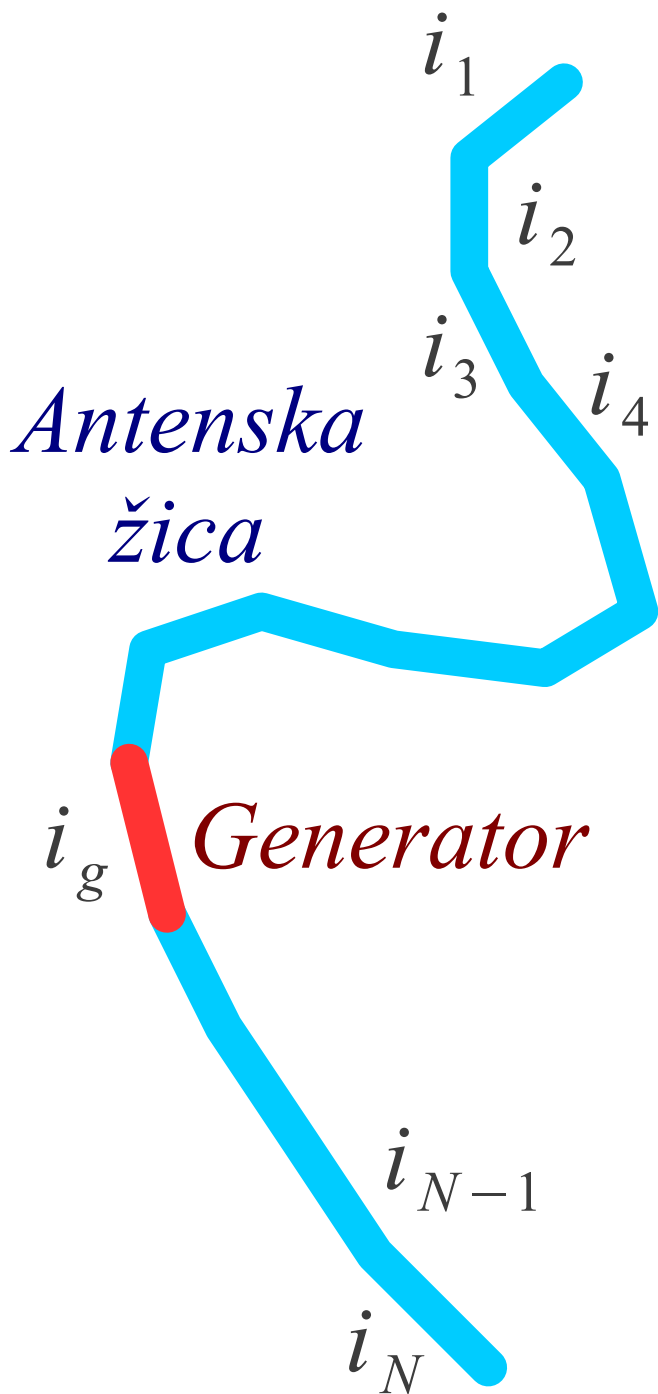
$$\vec{E} = -j \omega \vec{A} - \text{grad} \left[\frac{j}{\omega \mu \epsilon} \text{div } \vec{A} \right]$$

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

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

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

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

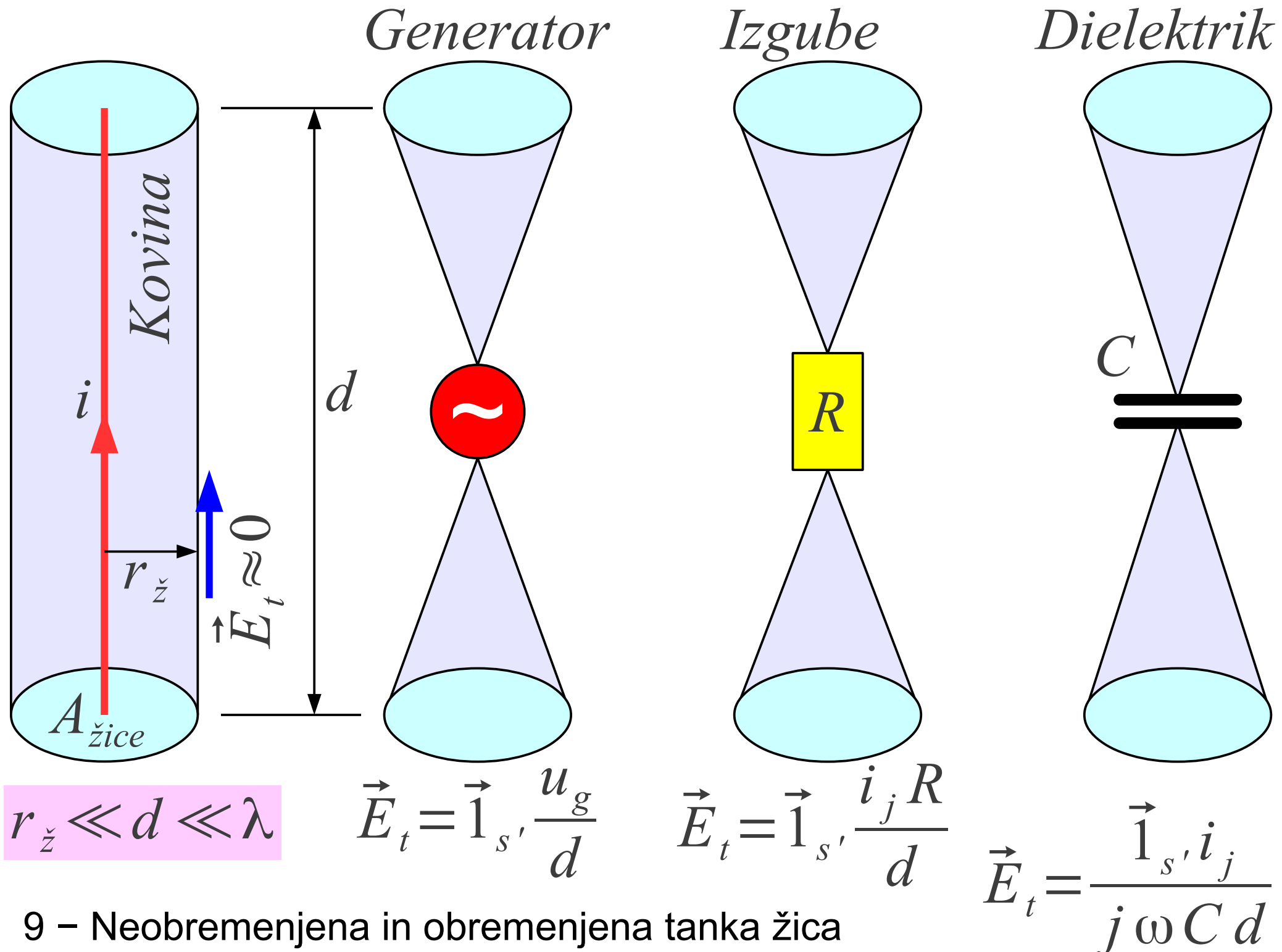


Številski približek $I(s') \approx$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \cdot \\ i_N \end{bmatrix}$$

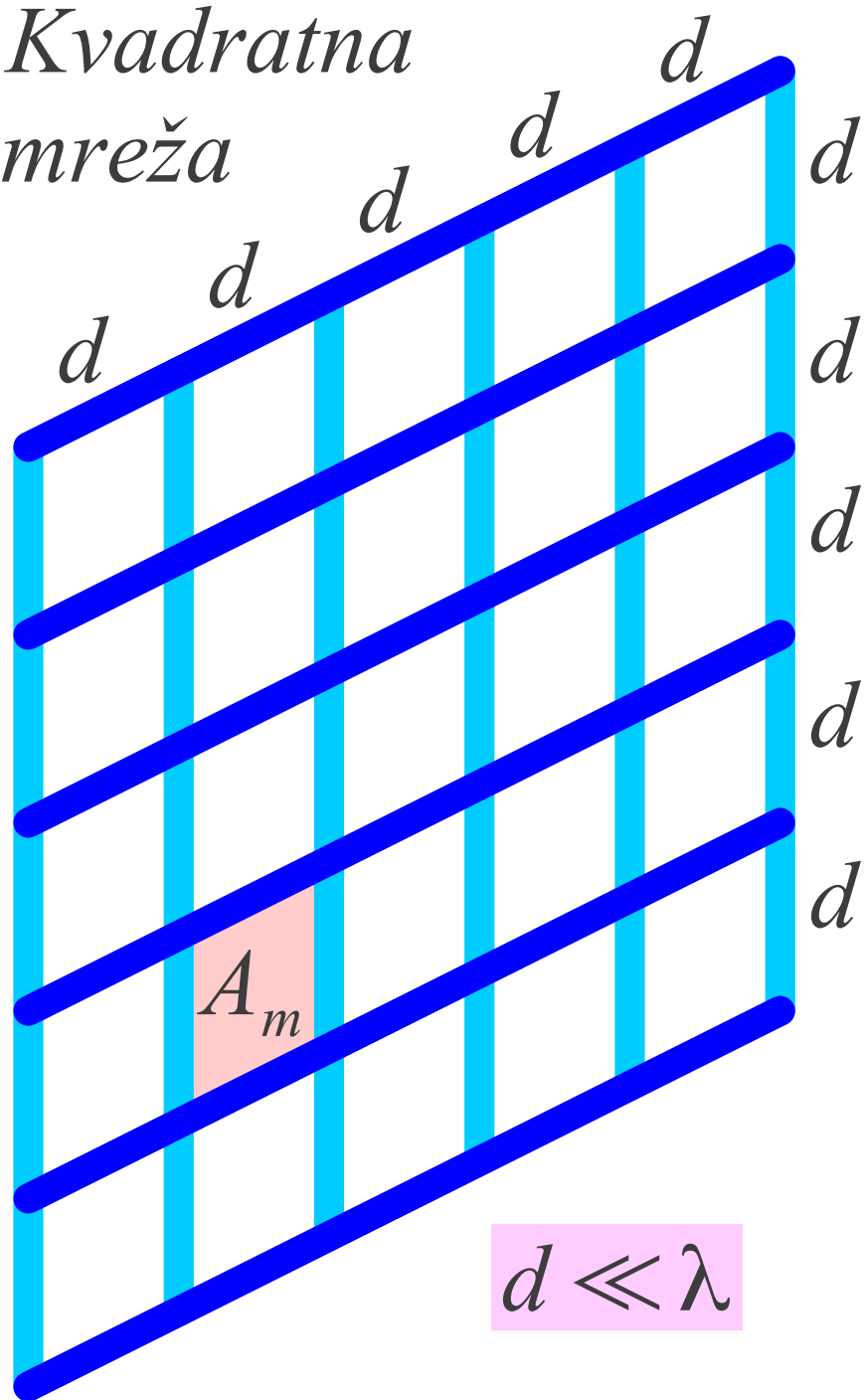
Sistem linearnih enačb

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



9 – Neobremenjena in obremenjena tanka žica

Kvadratna mreža



10 – Tanka kovinska ploskev

$$A_m = d^2$$

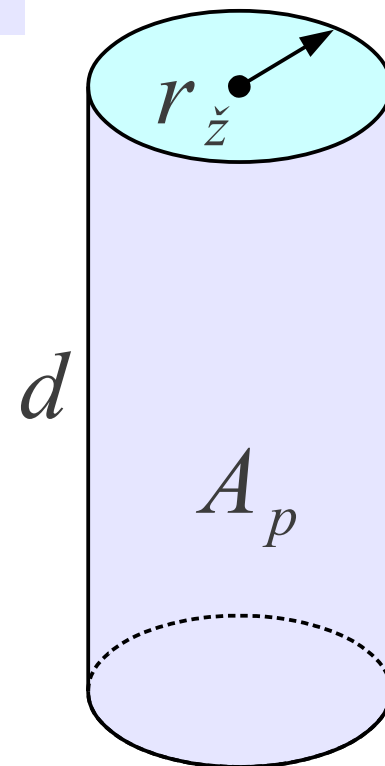
$$A_p = 2\pi r_{\check{z}} d$$

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



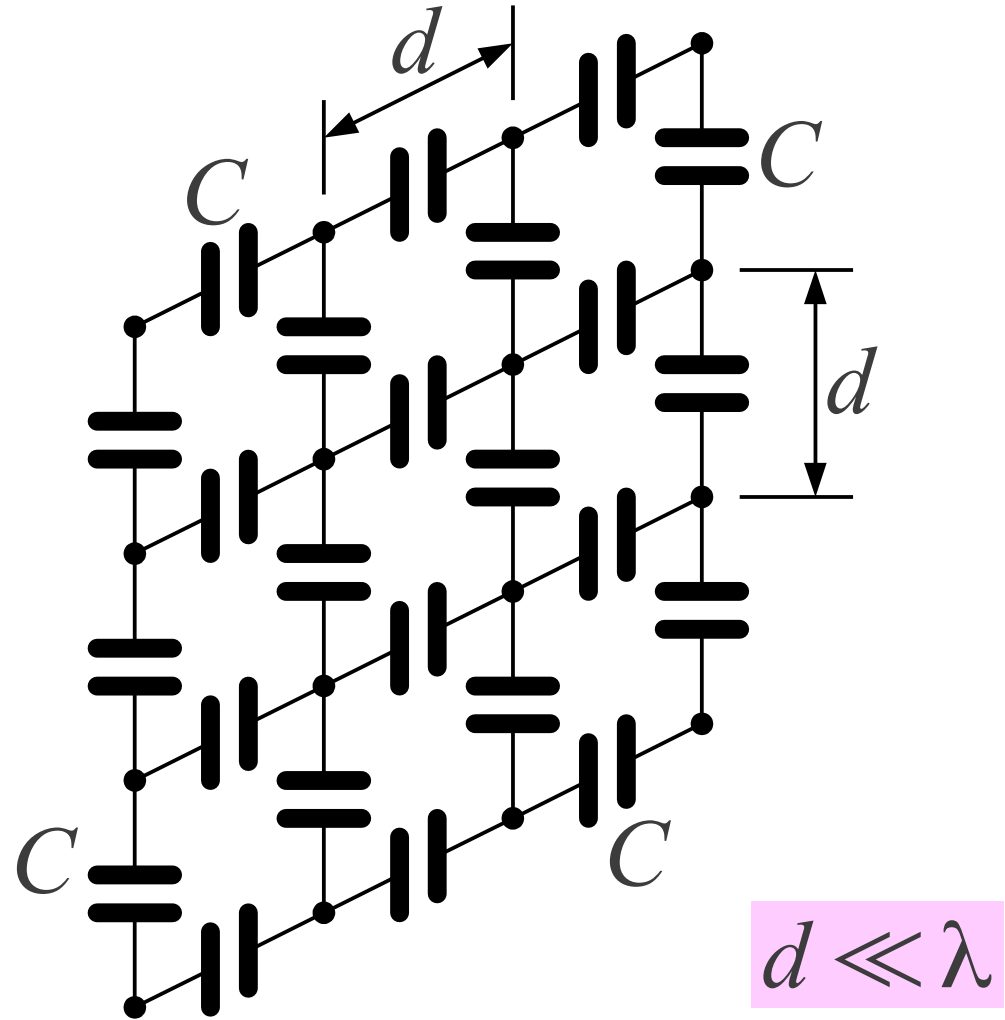
Prazen prostor

$$\epsilon = \epsilon_0$$



Dielektrik
 $\epsilon_r \neq 1$

$$\delta \ll \lambda$$

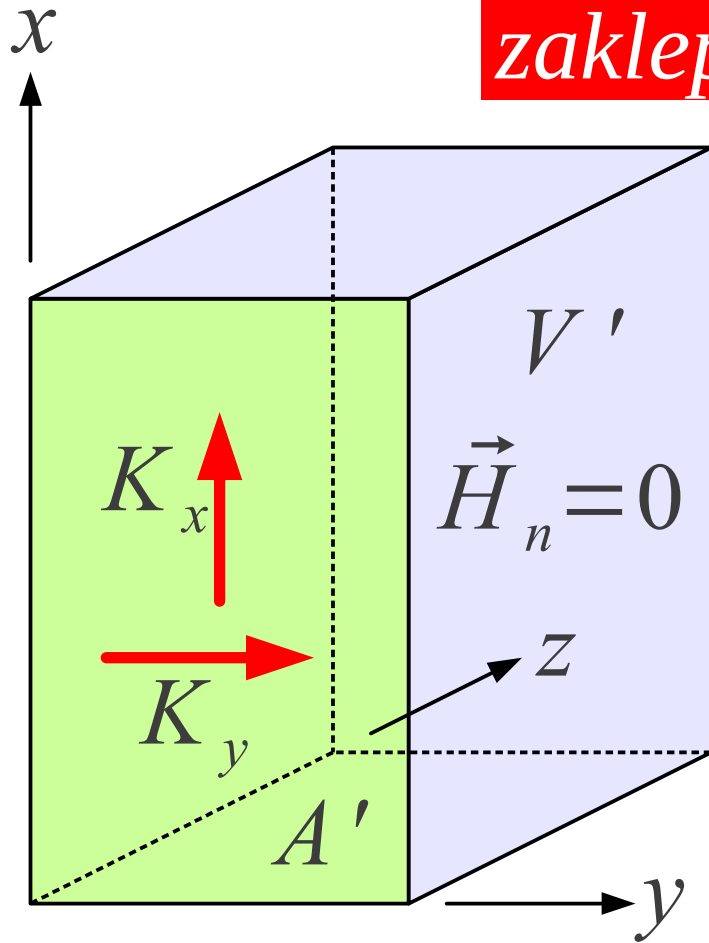


$$d \ll \lambda$$

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	$\alpha \cdot N^3$	$\alpha \cdot N^2$	~ 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 $\alpha \cdot N^3$.
- (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 λ !)

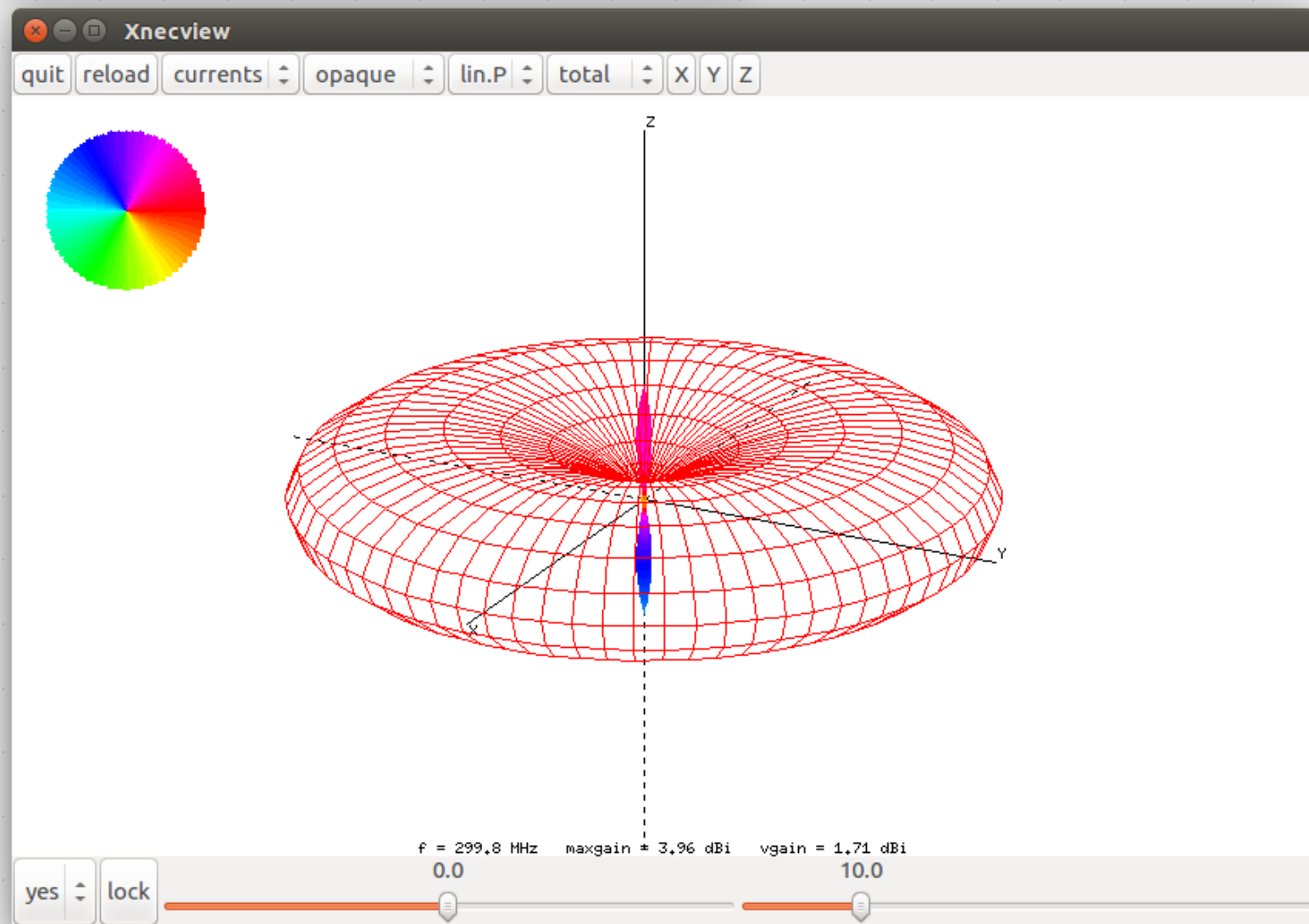
GE≡oznaka konca geometrije

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 Θ
 72≡število korakov Φ
 1≡XNDA izračun dobitka
 0≡začetni Θ (stopinje)
 0≡začetni Φ (stopinje)
 5≡korak Θ (stopinje)
 5≡korak Φ (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

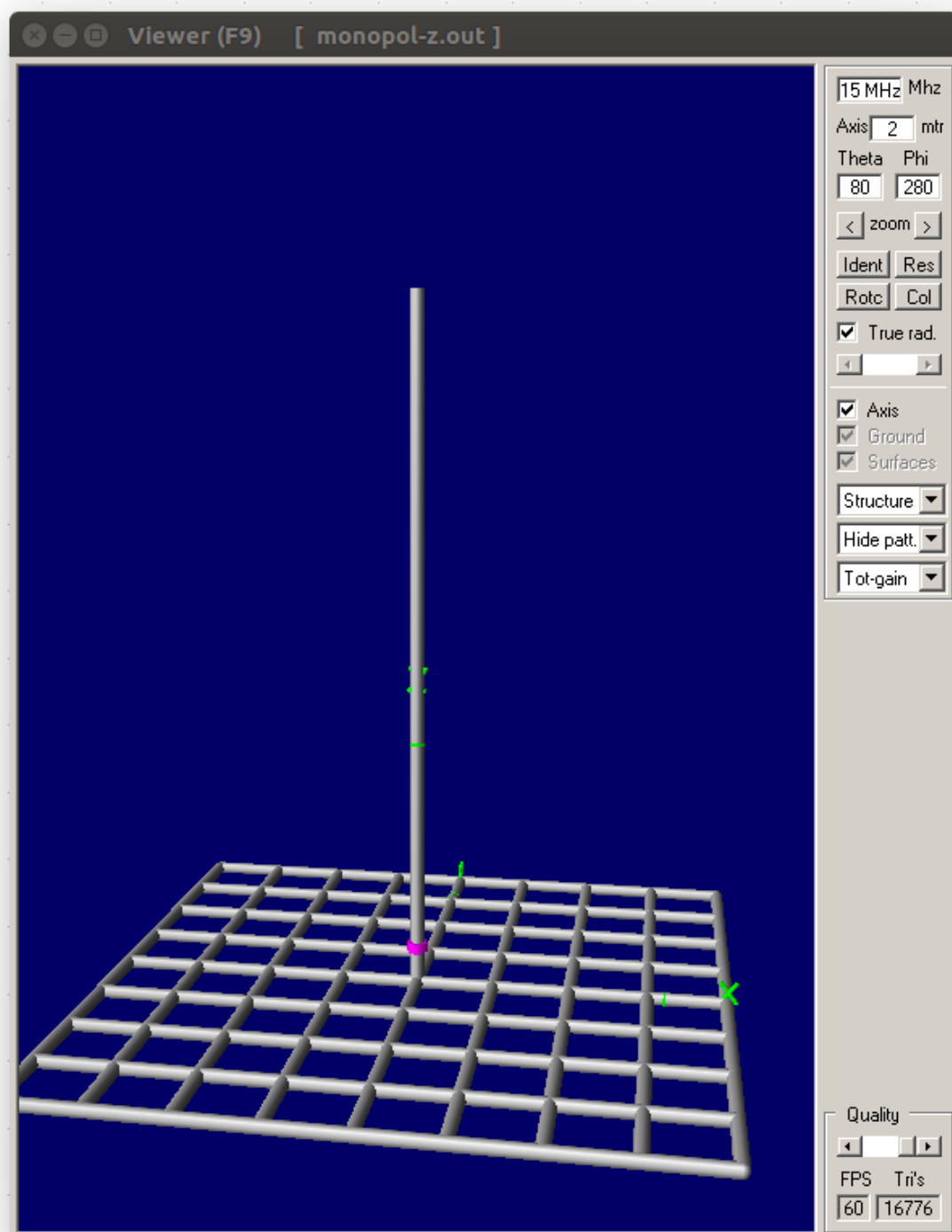
S.W.R.50: Input power: W
Efficiency: % Structure loss: uW
Radiat-eff.: Network loss: uW
RDF [dB]: Radiat-power: W

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	<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="0.227"/> 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"

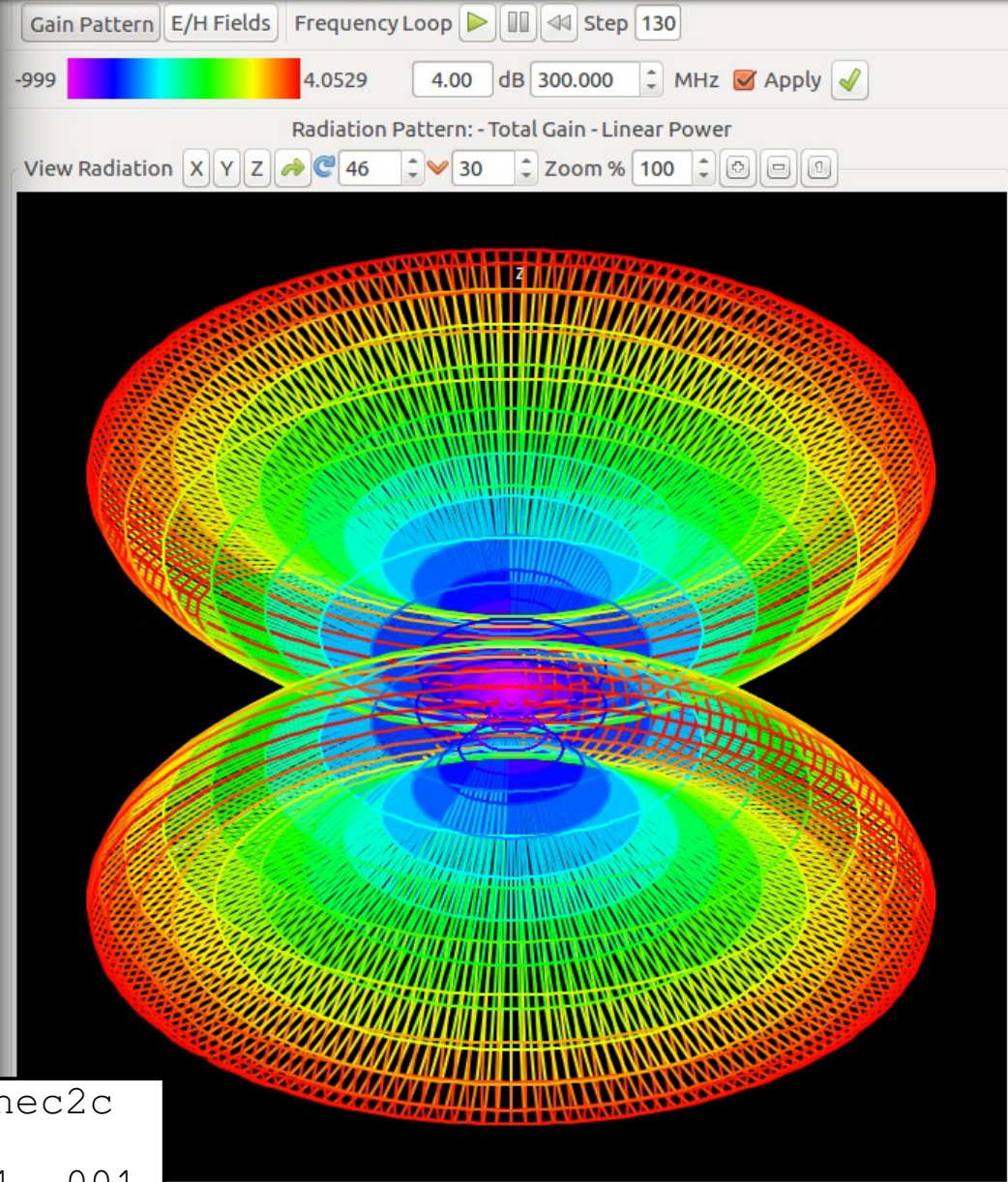
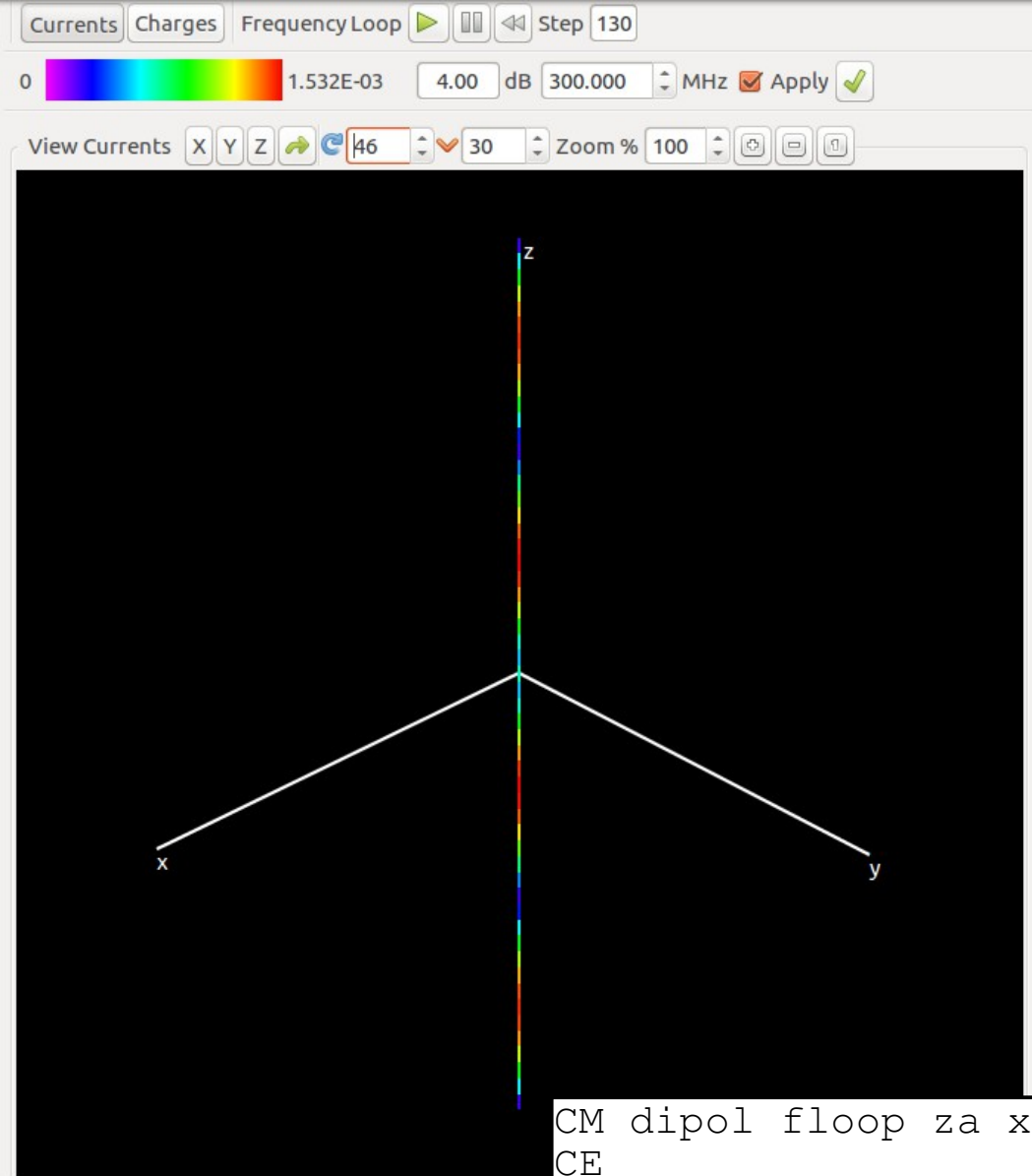
Seg's/patches	<input type="text" value="90"/>	start	stop	count	step	
Pattern lines	<input type="text" value="5329"/>	Theta	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="360"/>	<input type="text" value="73"/>	<input type="text" value="5"/>
Freq/Eval steps	<input type="text" value="1"/>	Phi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

D3

D2

D1

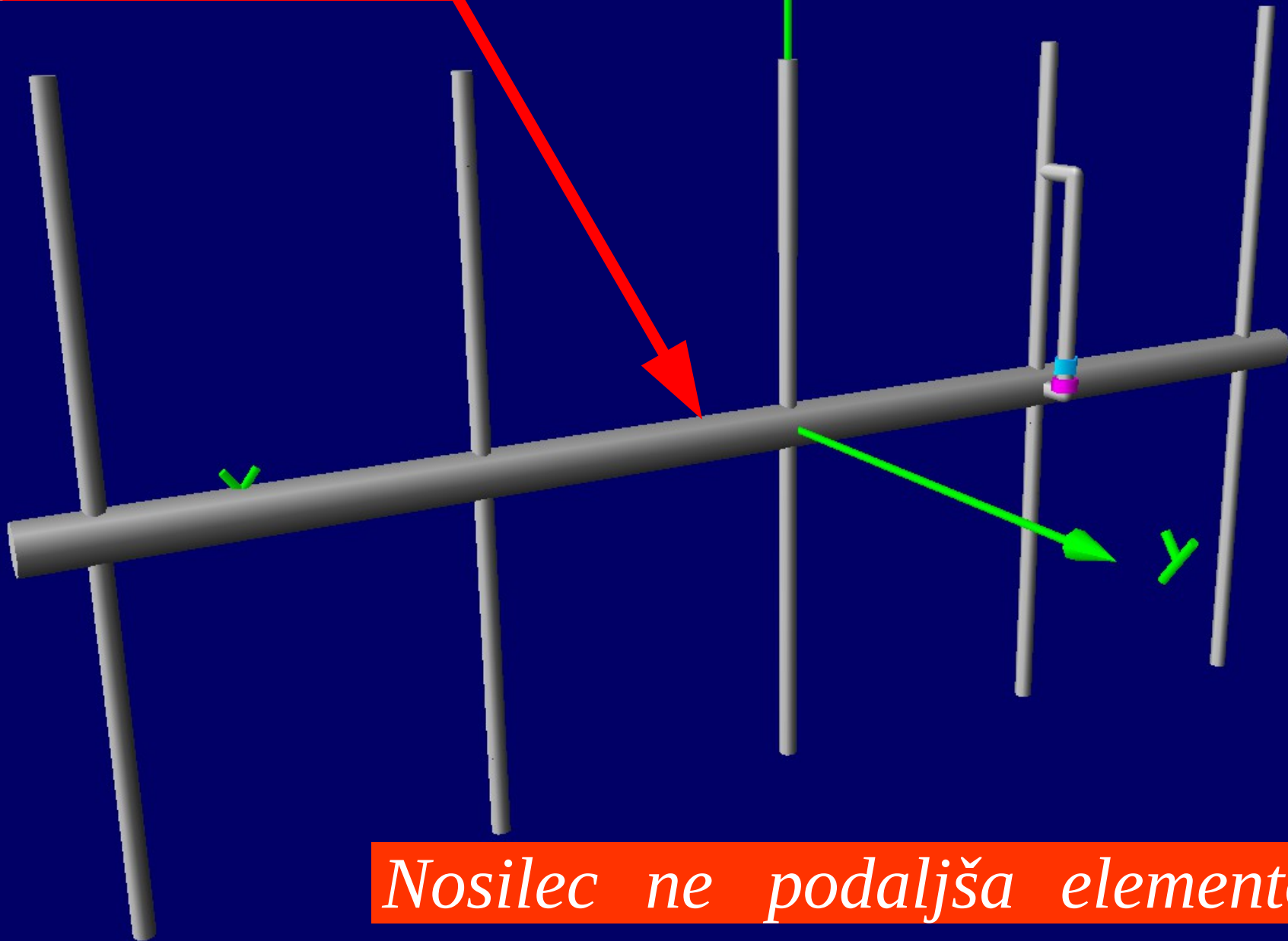
K

R



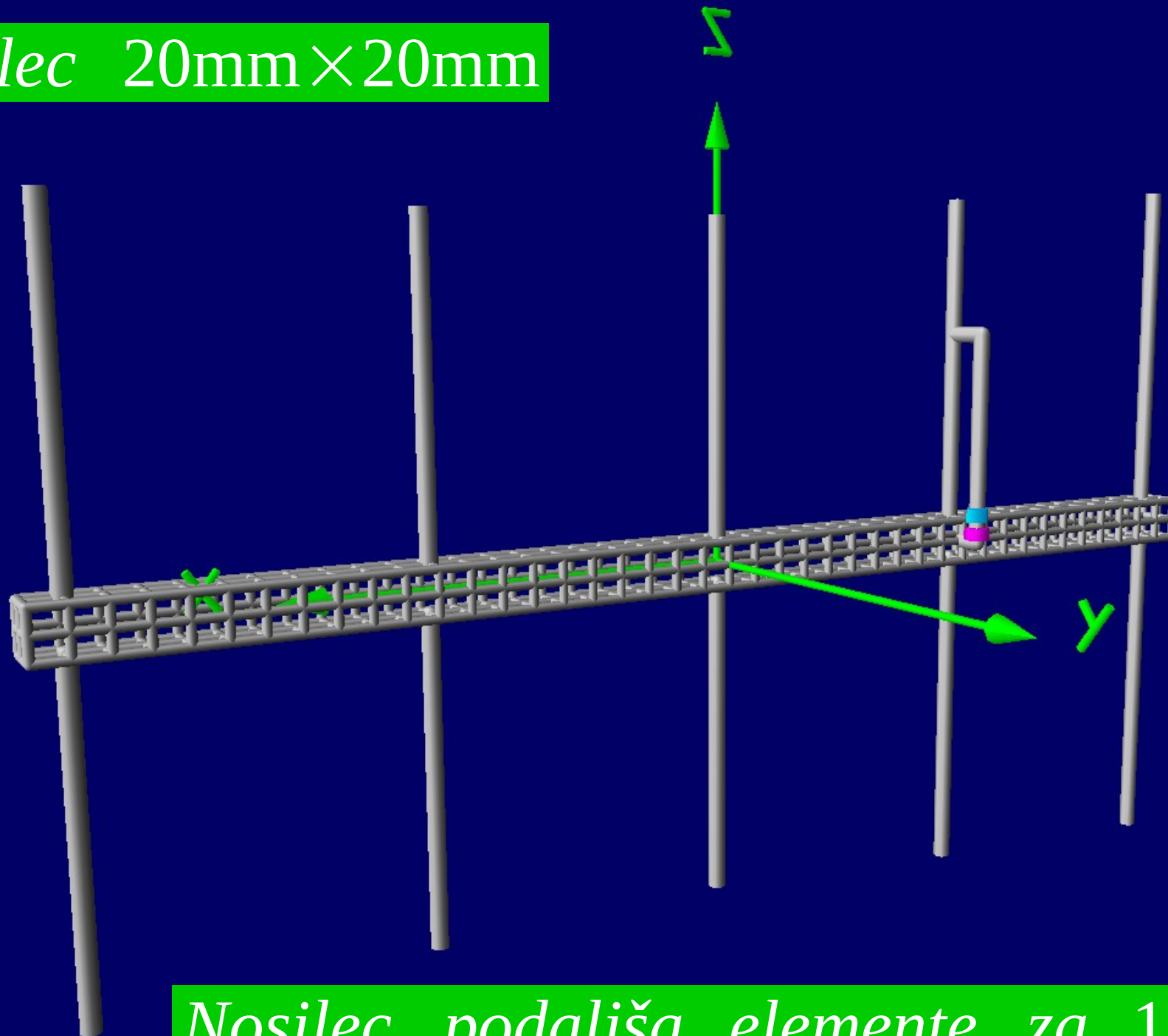
23 – 5 elementna NBS Yagi-Uda z γ napajanjem za 430MHz

*Žica NEC nima
prečnih tokov*



Nosilec ne podaljša elementov?

Nosilec 20mm × 20mm



Nosilec podaljša elemente za 15mm!

25 – Uporabna simulacija nosilca s 3D žično mrežo

```

CM Length L in mtr. = .14
CM Radius R1 in cm. = 4.5
CM Radius R2 in cm. = 4.5
CM Start angle A1 = 0
CM Stop angle A2 = 360
CM Straight sections = 14
CM Circular sections = 18
CM Radial sections = 5
CM Rotate X, Y, Z = 0, 0, 0
CM Move X, Y, Z = 0, 0, 0
CE

```

```

GW 300 4 .045 .0 -.04 .045 .0 -.03 .000971
GW 301 4 .045 .0 -.03 .045 .0 -.02 .000971
GW 302 4 .045 .0 -.02 .045 .0 -.01 .000971
GW 303 4 .045 .0 -.01 .045 .0 .0 .000971
GW 304 4 .045 .0 .0 .045 .0 .01 .000971
GW 305 4 .045 .0 .01 .045 .0 .02 .000971
GW 306 4 .045 .0 .02 .045 .0 .03 .000971
GW 307 4 .045 .0 .03 .045 .0 .04 .000971
GW 308 4 .045 .0 .04 .045 .0 .05 .000971
GW 309 4 .045 .0 .05 .045 .0 .06 .000971
GW 310 4 .045 .0 .06 .045 .0 .07 .000971
GW 311 4 .045 .0 .07 .045 .0 .08 .000971
GW 312 4 .045 .0 .07 .045 .0 .08 .000971
GW 313 4 .045 .0 .07 .045 .0 .08 .000971

```

Geometry Builder (V2.5)

Patch Plane Box Cylinder Parabola Helix Sphere Help

Cylinder

Length L in mtr.

Radius R1 in cm. Do

Radius R2 in cm. Up

Start angle A1

Stop angle A2

Straight sections

Circular sections

Radial sections

Start with tagnumber

Use auto-segmentation

Frequency in Mhz

Segmentation

Use equal-area rule to set wire-radius

Rotate X, Y, Z

Move X, Y, Z (!)

! = symbols also allowed

Viewer (F9) [Build.nec]

2400 Mhz

Axis mtr

Theta Phi

True rad.

Axis

Ground

Surfaces

Structure

Hide patt.

E-(z) fld

Quality

FPS Tri's

26 – Geometry builder v programu 4nec2 (Windows)

```

GW 344 4 .0225 .038971 -.02 .0225 .038971 -.01 .000971
GW 345 4 .0225 .038971 .01 .0225 .038971 .0 .000971

```