

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)

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

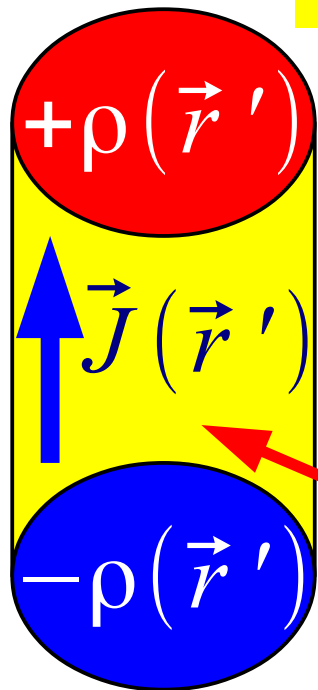
$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$$

Valovni
enačbi za
potenciala
imata
analitsko
rešitev!

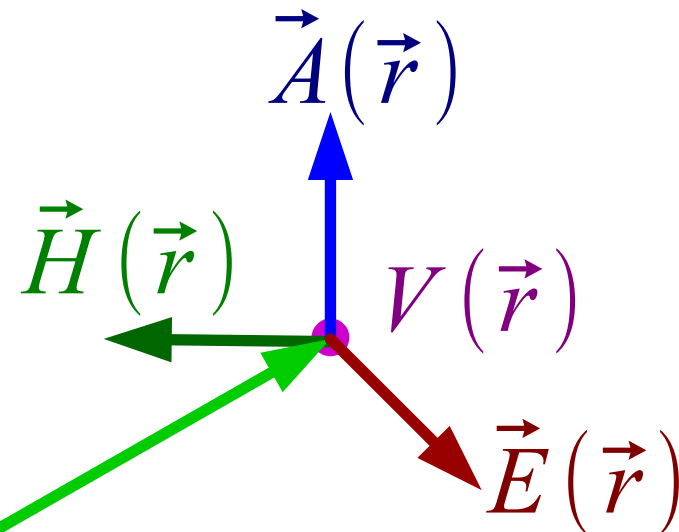
Oddajnik (\vec{r}')

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

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



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



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

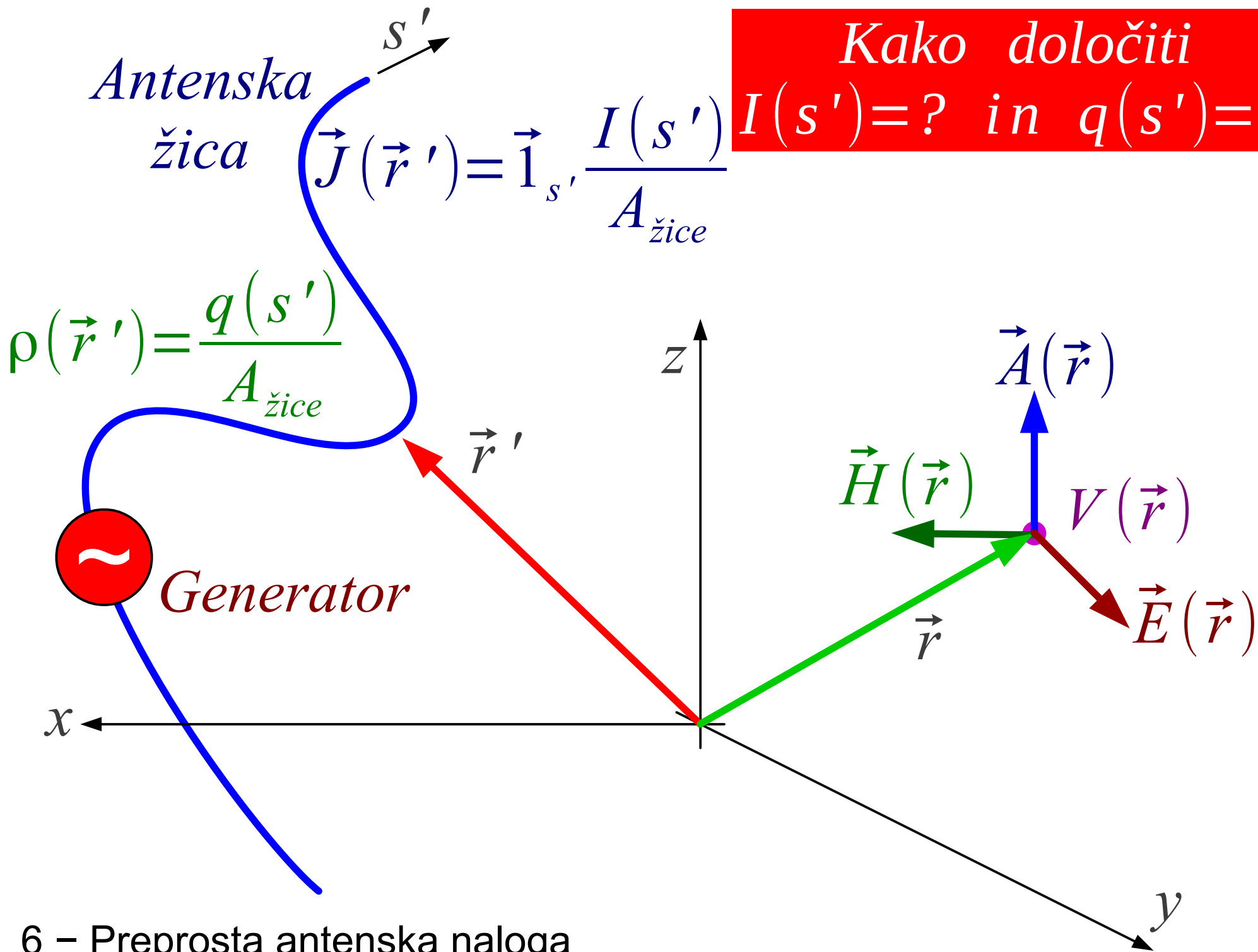
$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_{V'} \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV'$$

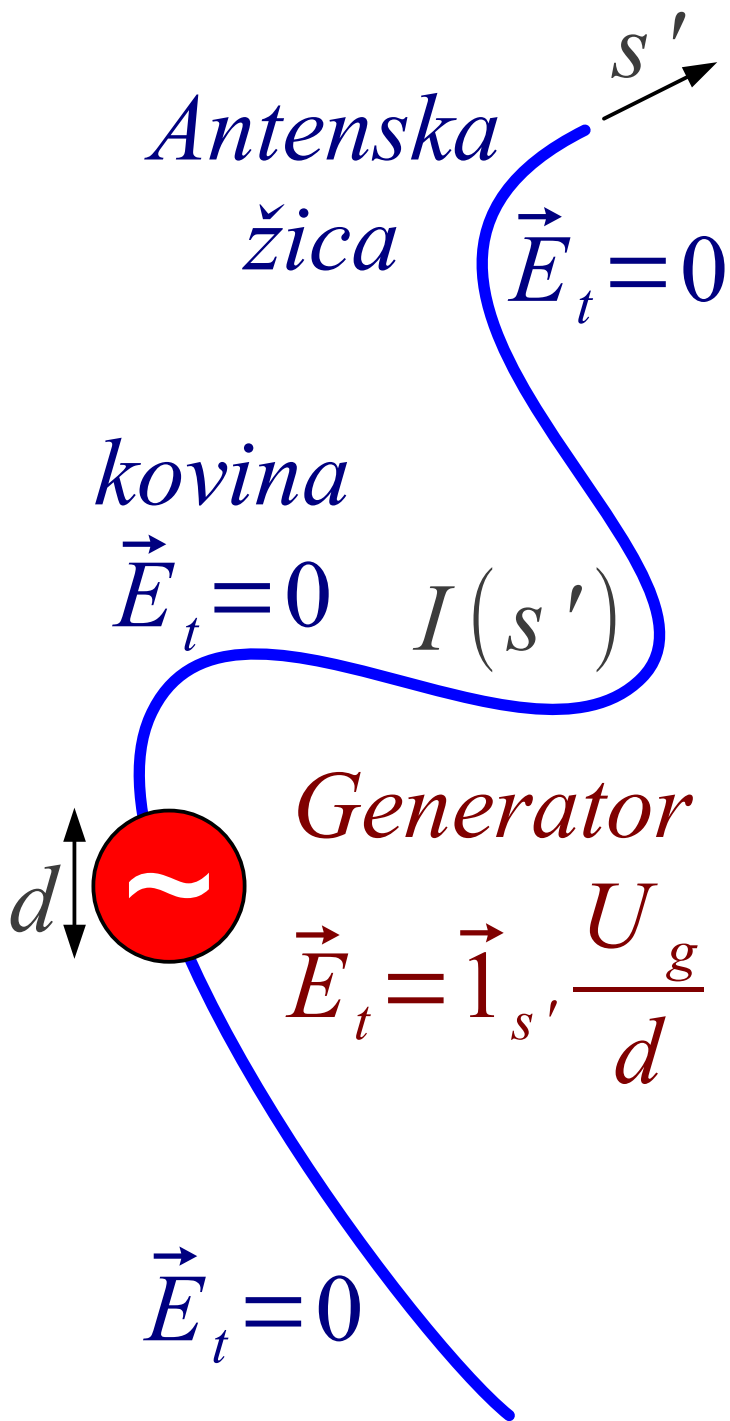
$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

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

5 - Zakasnjeni potenciali

Kako določiti
 $I(s')=?$ in $q(s')=?$





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

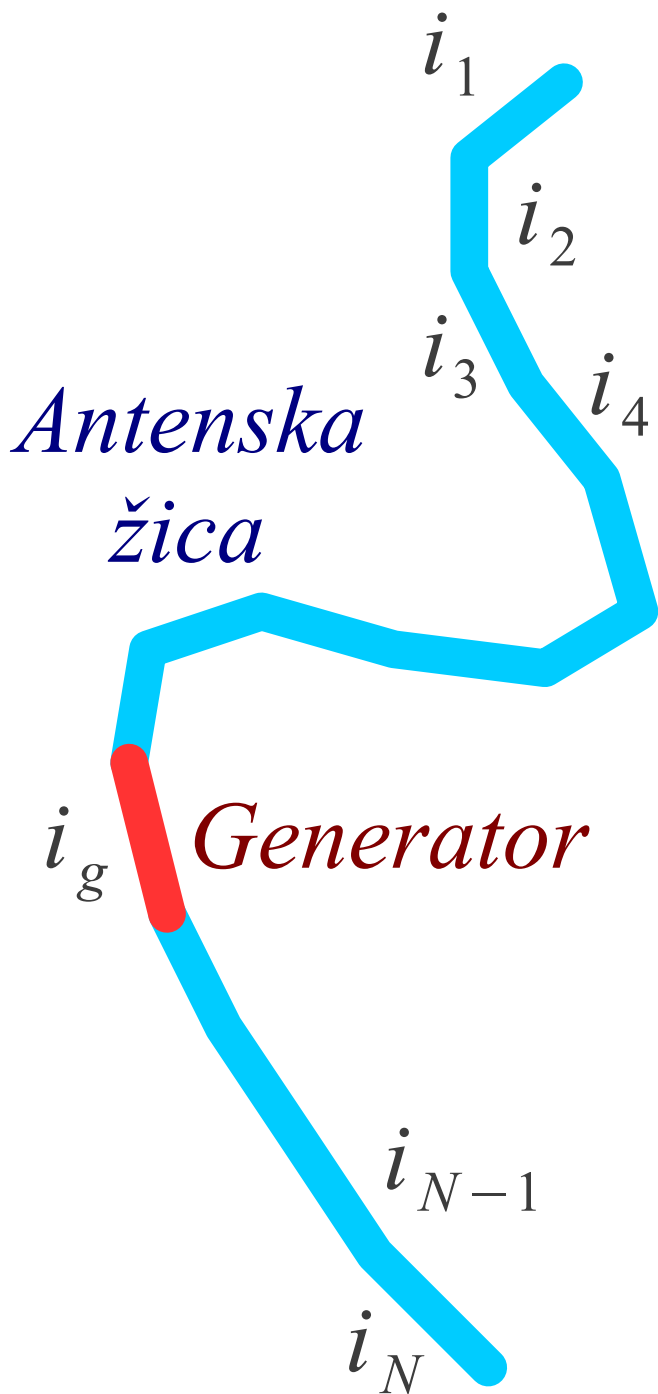
$$\vec{E} = -j \omega \vec{A} - \text{grad} \left[\frac{j}{\omega \mu \epsilon} \text{div } \vec{A} \right]$$

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

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

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

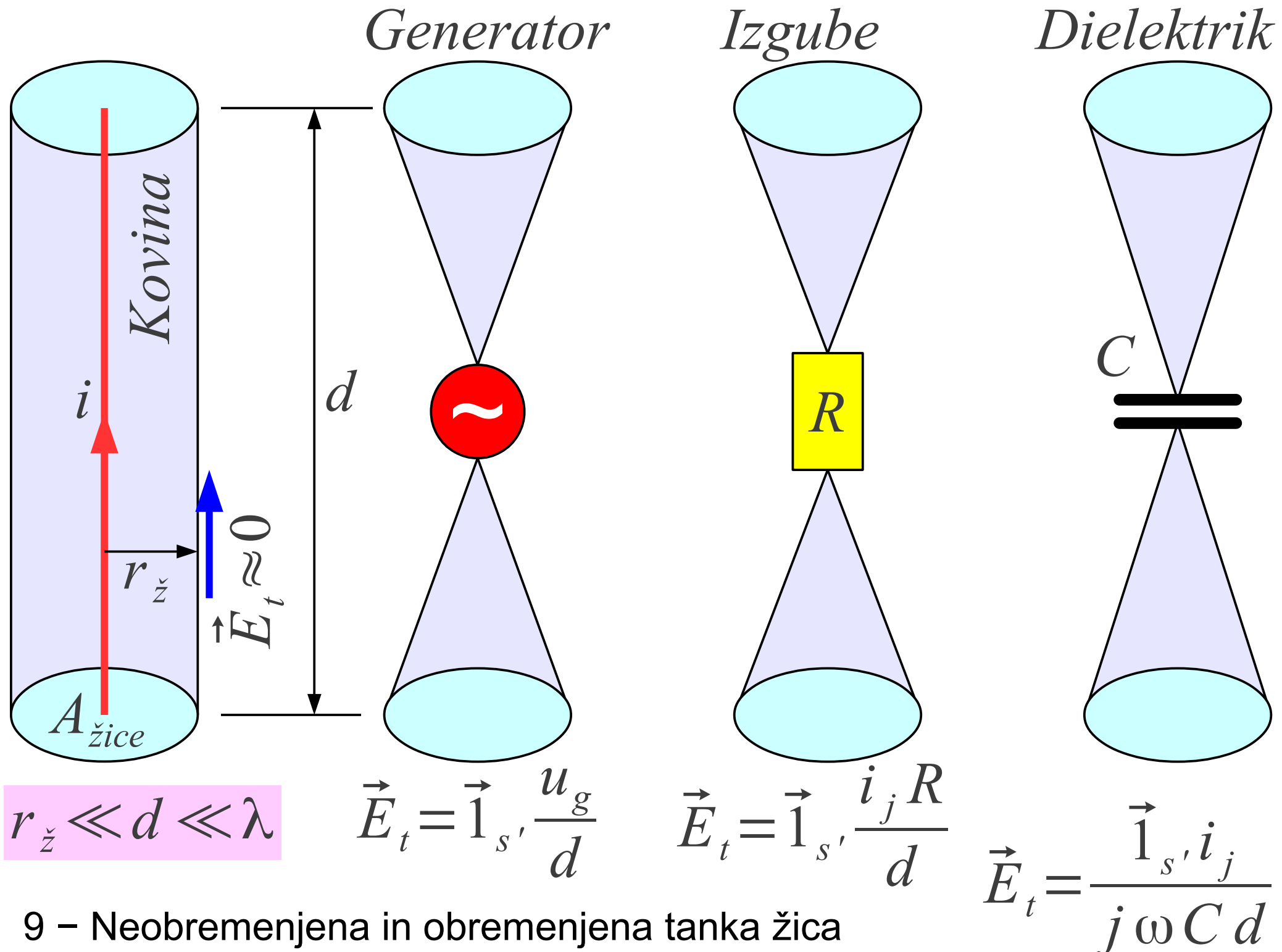
$$\cdot \left[1 + \frac{1}{k^2} \text{grad}_r (\text{div}_r) \right] \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} ds'$$



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

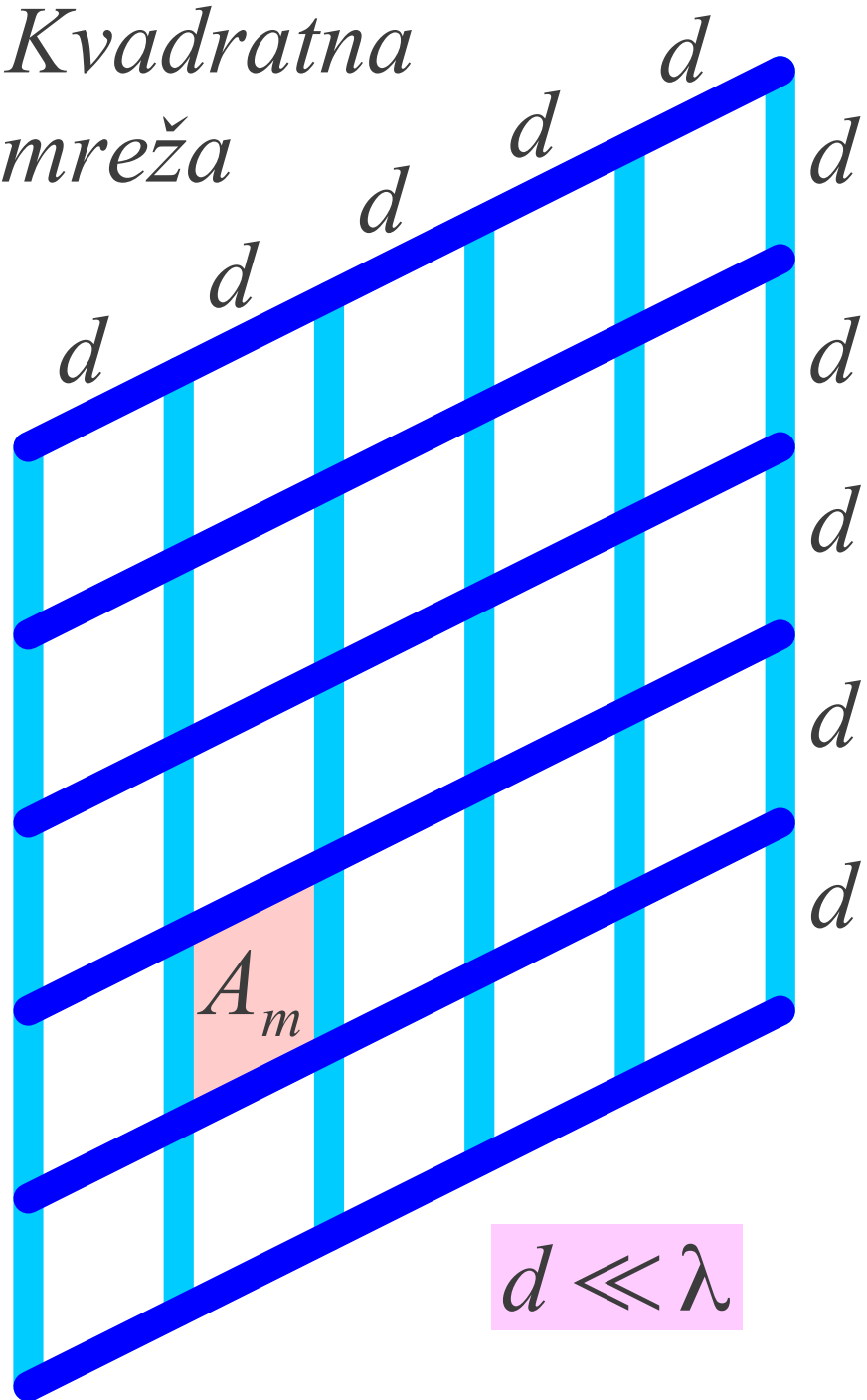
Sistem linearnih enačb

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



9 – Neobremenjena in obremenjena tanka žica

Kvadratna mreža



10 – Tanka kovinska ploskev

$$A_m = d^2$$

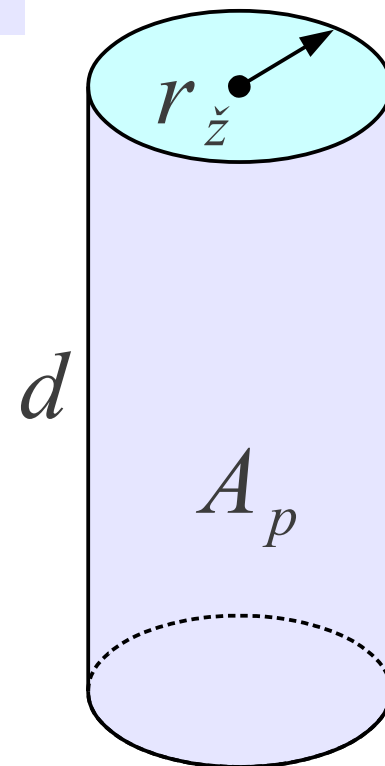
$$A_p = 2\pi r_{\check{z}} d$$

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

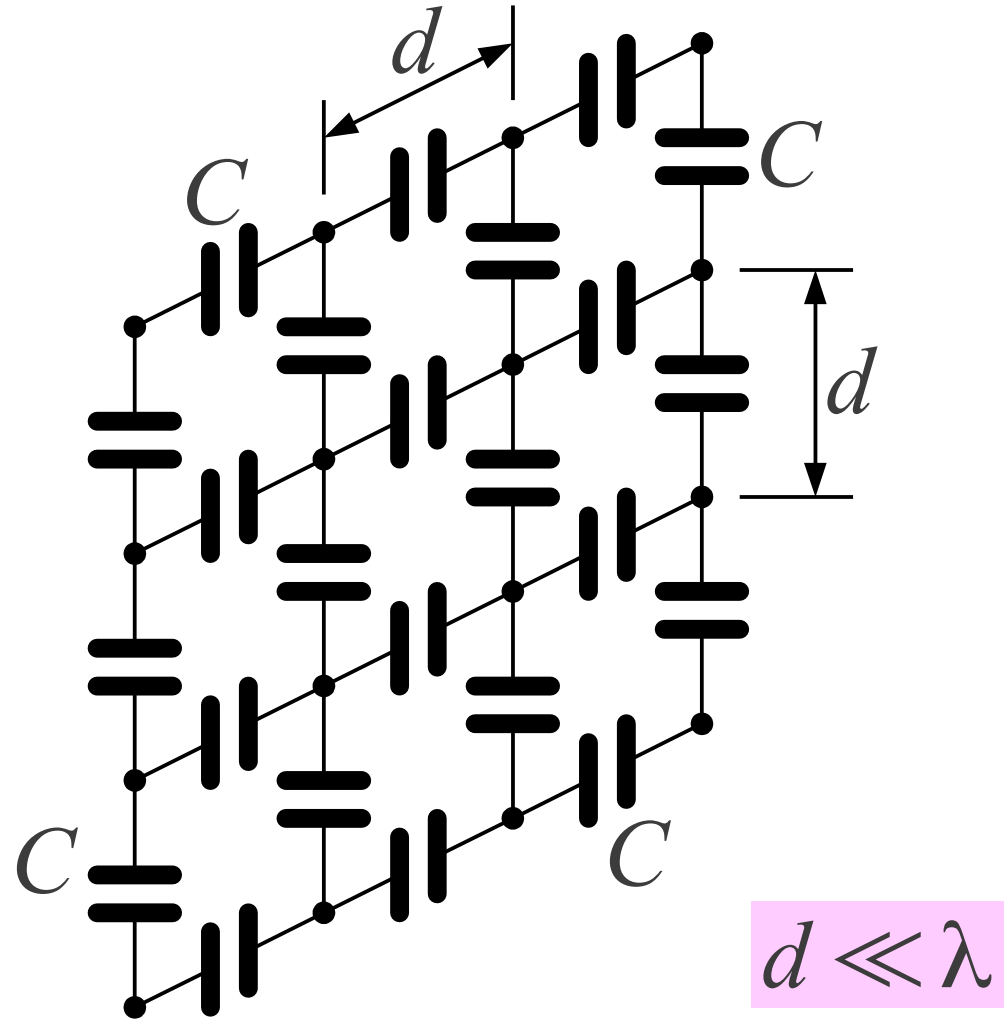


Prazen prostor

$$\epsilon = \epsilon_0$$



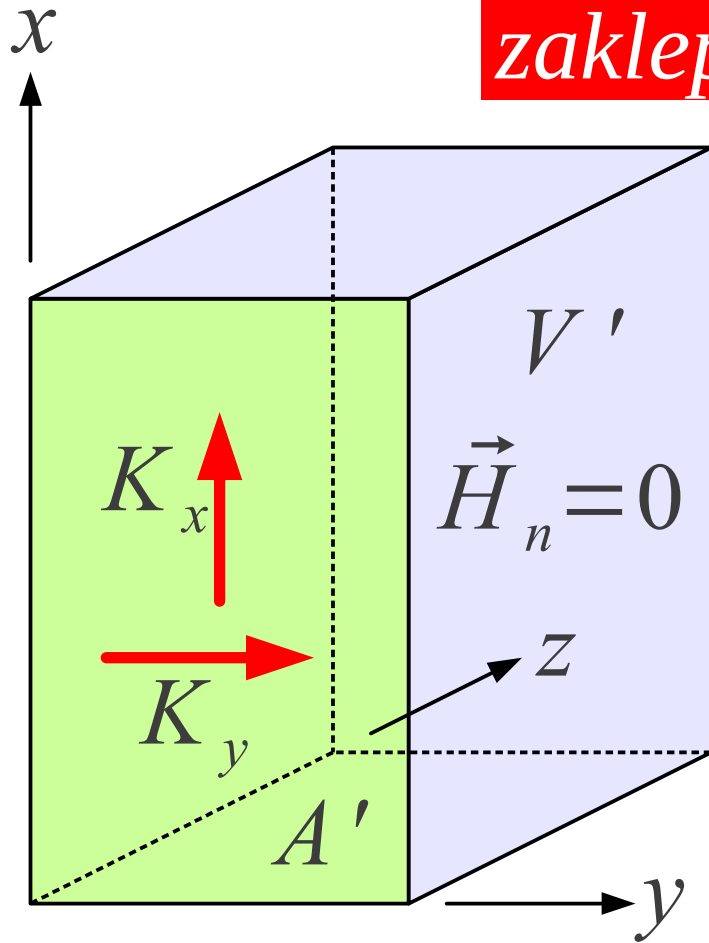
$$\delta \ll \lambda$$



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 $\propto N^3$.
- (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 λ !)

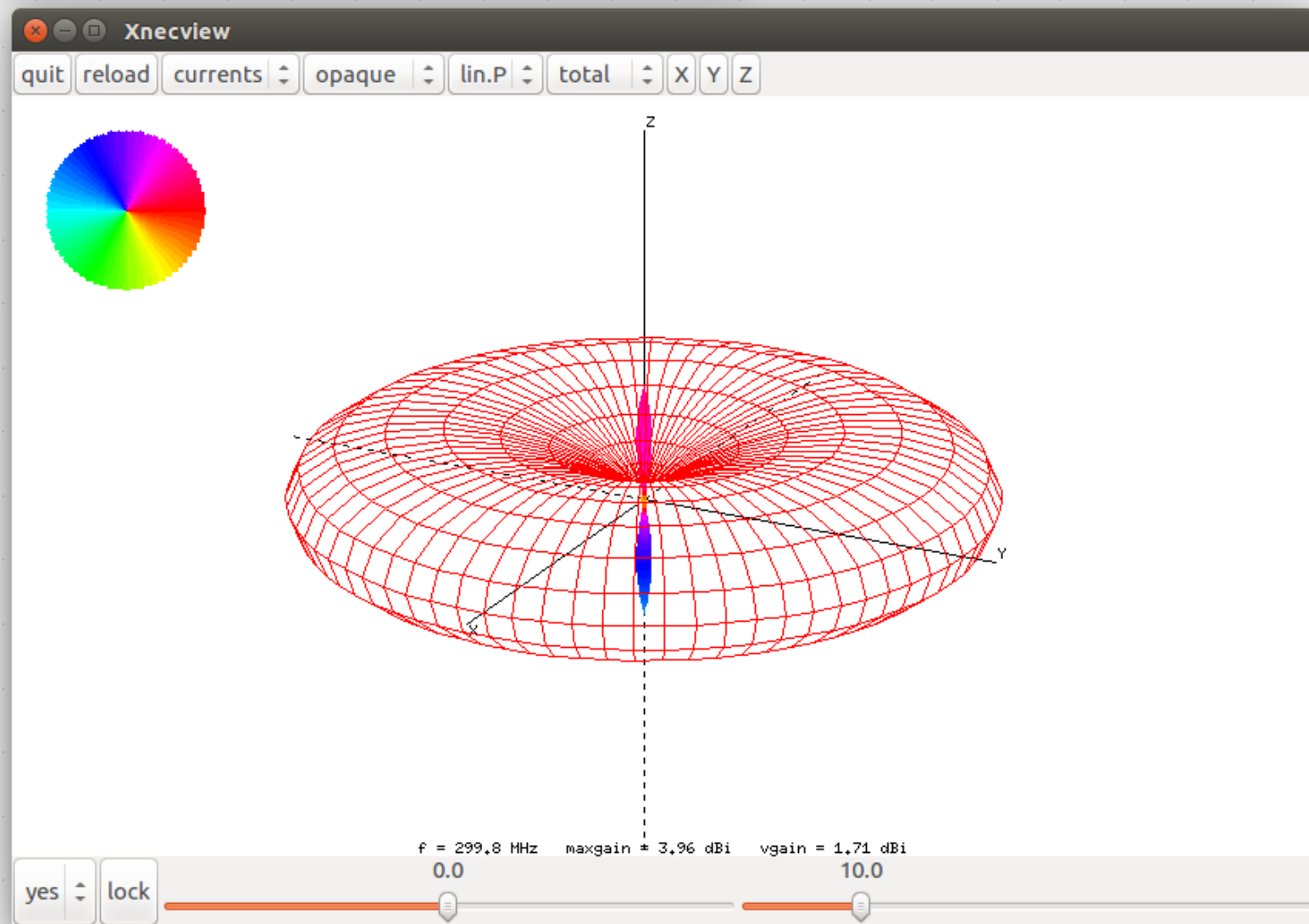
GE≡oznaka konca geometrije

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)

