



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Poslijediplomski doktorski studij elektrotehnike i informacijske tehnologije, FESB
Katedra za primjenu EM polja

Mjerenje EM polja složenog valnog oblika

Zlatko Živković, zn. novak

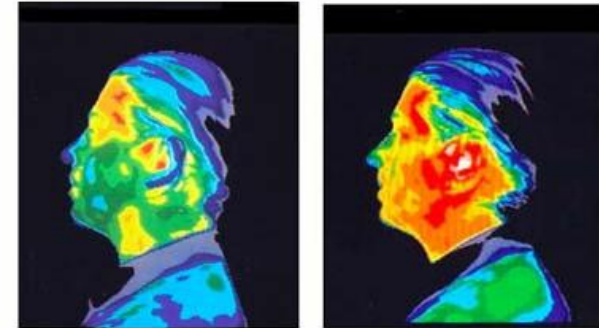
Sadržaj

- Biološki učinci
- Izvori zračenja
- Zaštitne norme
- Mjerači EM polja
- Predloženi detektor ovojnice signala

Biološki učinci

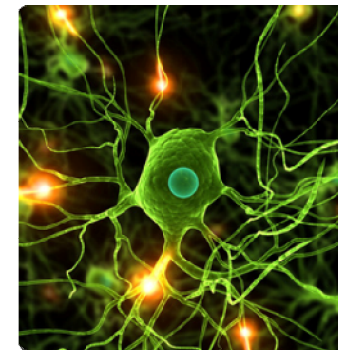
- **Zagrijavanje tkiva**

- pretvaranje apsorbirane EM energije u toplinsku
- frekvencije iznad 100 kHz
- spregnuto električno i magnetsko polje
- **efektivna vrijednost**



- **Stimulacija električki podražljivog tkiva**

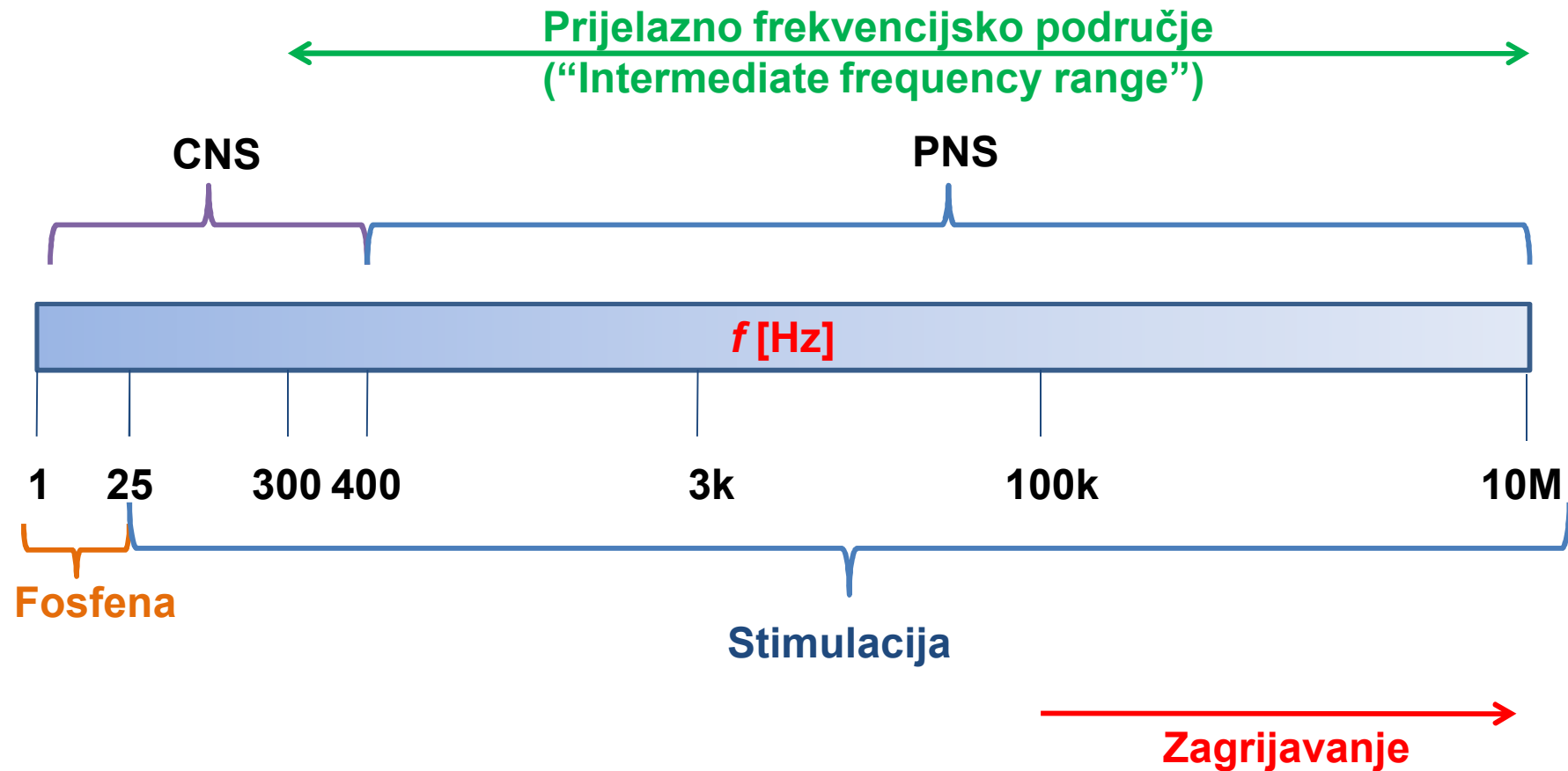
- inducirane električne struje u tijelu
(kontaktne struje, površinske gustoće naboja, strujni vrtlozi)
- frekvencije do 10 MHz
- raspregnuta električna i magnetska polja
- **valni oblik pobude**



- **Ostali učinci – dugotrajna izloženost**

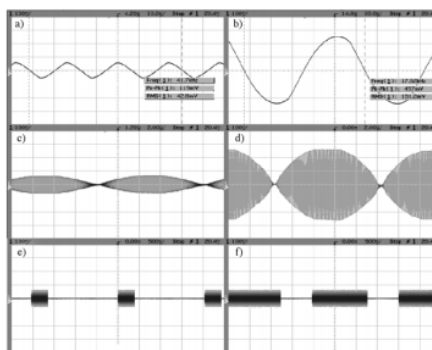
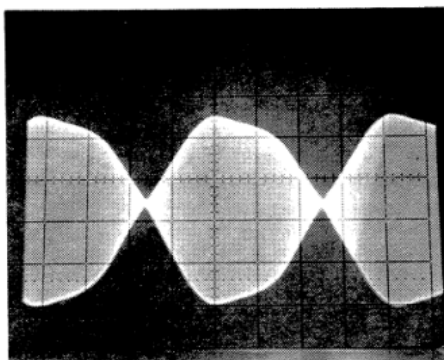
- maligna oboljenja, hormonalni i neuro-degenerativni poremećaji, psihosomatske smetnje, ...

Prijelazno frekvencijsko područje



Izvori zračenja (1)

- **Izloženost opće populacije**
 - **indukcijske kuhinjske ploče (kuhala)**
 - izobličene sinusoide i amplitudno modulirana EM polja
 - frekvencije nosioca su iznad 10 kHz (standardno 22 i 34 kHz) uz harmonike i do nekoliko stotina kHz

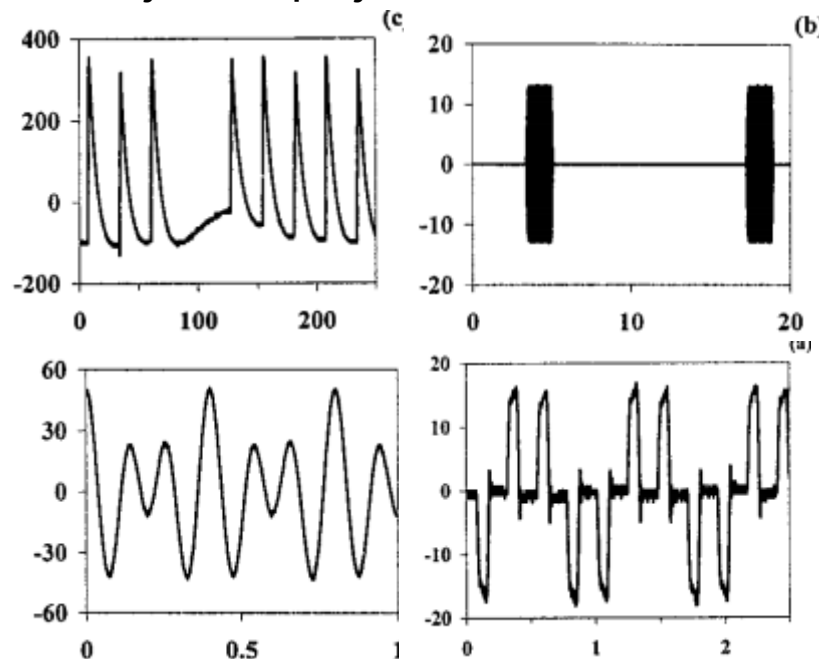


Izvori zračenja (2)

- **Izloženost opće populacije**

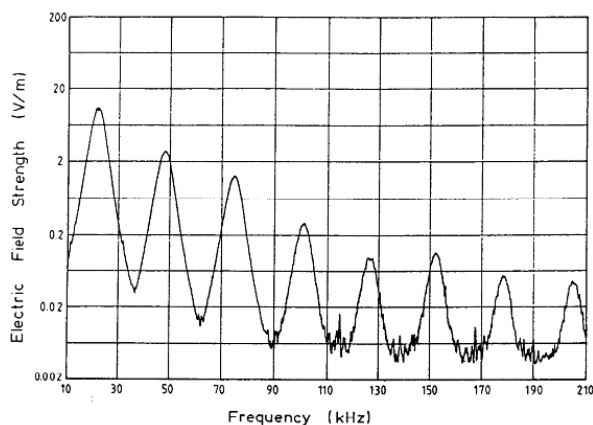
- **sustavi za nadzor i osiguranje od krađe**

- obuhvaćaju magnetizatore/demagnetizatore u knjižnicama, kontrolu prtljage na aerodromima, vrata za detekciju krađe, detektore metala, itd.
- složeni valni oblici (pulsna polja, sinusoidna polja, sinusoidne praskove, kombinacije sinusoida nekoliko frekvencija i dr.).
- široko frekvencijsko područje od nekoliko desetaka Hz do nekoliko MHz, a mjerena polja često su u razini ili iznad granica definiranih ICNIRP-om



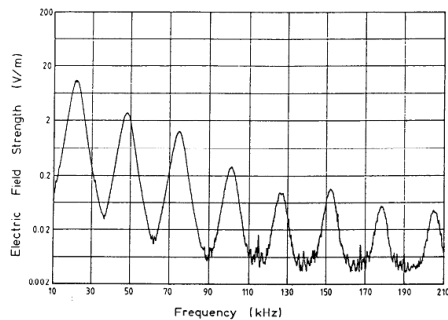
Izvori zračenja (3)

- **Izloženost opće populacije**
 - **monitori i TV uređaji**
 - pilasti valni oblici
 - osnovna frekvencija 15-35 kHz uz harmonike do nekoliko stotina kHz



Izvori zračenja (4)

- **Izloženost opće populacije**
 - **komunikacijski uređaji**
 - OMEGA (10.2-13.6 kHz) i LORAN navigacijski sustavi (100 kHz)
 - standardni AM komunikacijski sustavi (535-1705 kHz)
 - amaterski komunikacijski uređaji (1.8-2 MHz)
 - VLF sustavi za podmornice (234 kHz)



Izvori zračenja (5)

- **Izloženost profesionalne populacije - industrija**
 - **indukcijski i plazma grijači**
 - AM polja modulacijske frekvencije 50 Hz, nosioca od nekoliko kHz do 27 MHz
 - iznimno visoka električna i magnetska polja
 - **indukcijske peći**
 - 280 Hz-7 kHz
 - **dielektrični grijači**
 - nekoliko MHz do 120 MHz
 - **uređaji za varenje**
 - ovisno o tipu varenja (elektrolučno ili elektrotoporno) mogu se generirati pulsna i sinusna magnetska polja te polja složenih valnih oblika u frekvencijskom području od nekoliko Hz do nekoliko stotina kHz

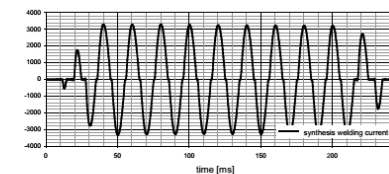
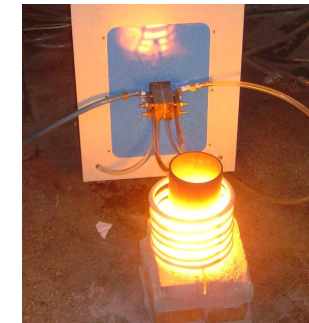


Figure 4a: Waveform of typical a.c. welding current, the amplitude is given in [A]

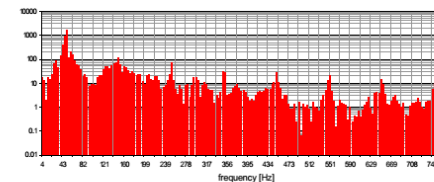


Figure 4b: Spectral components of typical a.c. welding current the r.m.s amplitudes are given in [A] on a logarithmic scale

Izvori zračenja (6)

- **Izloženost profesionalne populacije - medicina**

- **MRI:**

- trapezoidna, pulsna i sinusna gradijentna magnetska polja
- nekoliko desetaka Hz do nekoliko MHz

- **elektronički kirurški instrumenti:**

- AM polja modulacijske frekvencije 10-30 kHz uz nosilac 0.5-2.4 kHz

- **magnetska stimulacija kostiju**

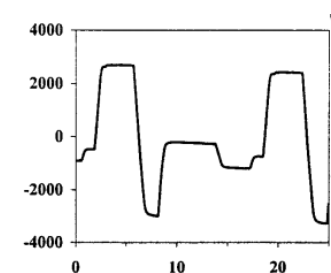
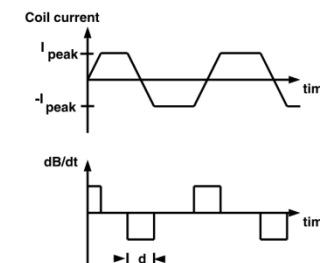
- pulsna magnetska polja iznimno složenih valnih oblika

- **Izloženost profesionalne populacije – vojska**

- **komunikacijski sustavi za podmornice**

- **HF odašiljači**

- **sustavi za napajanje i pulsnu modulaciju kod radara**

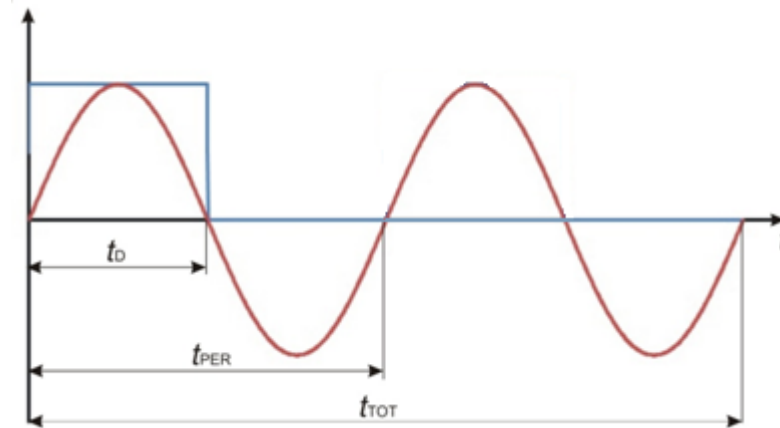


Zaštitne norme - ICNIRP



ICNIRP 1998[3]

Exposure characteristics	Frequency range	Current density for head and trunk (mA m ⁻²) (rms)
Occupational exposure	up to 1 Hz	40
	1-4 Hz	40/f
	4 Hz-1 kHz	10
	1-100 kHz	f/100
	100 kHz-10 MHz	f/100
General public exposure	10 MHz-10 GHz	—
	up to 1 Hz	8
	1-4 Hz	8/f
	4 Hz-1 kHz	2
	1-100 kHz	f/500
	100 kHz-10 MHz	f/500
	10 MHz-10 GHz	—



ICNIRP 2010[4]

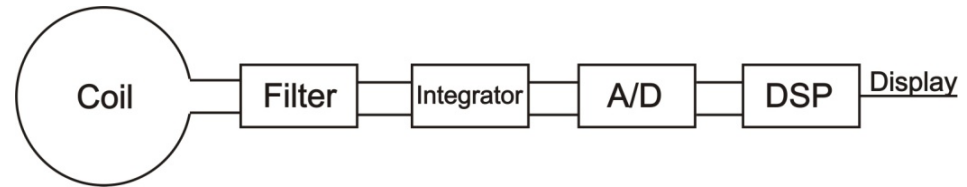
Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m ⁻¹)
Occupational exposure CNS tissue of the head	1-10 Hz	0.5/f
	10 Hz-25 Hz	0.05
	25 Hz-400 Hz	2 × 10 ⁻³ f
	400 Hz-3 kHz	0.8
	3 kHz-10 MHz	2.7 × 10 ⁻⁴ f
All tissues of head and body	1 Hz-3 kHz	0.8
	3 kHz-10 MHz	2.7 × 10 ⁻⁴ f
General public exposure CNS tissue of the head	1-10 Hz	0.1/f
	10 Hz-25 Hz	0.01
	25 Hz-1000 Hz	4 × 10 ⁻⁴ f
	1000 Hz-3 kHz	0.4
	3 kHz-10 MHz	1.35 × 10 ⁻⁴ f
All tissues of head and body	1 Hz-3 kHz	0.4
	3 kHz-10 MHz	1.35 × 10 ⁻⁴ f

$$\sum_{i=0}^{10 \text{ MHz}} \frac{A_i}{ME_i} \leq 1$$

Mjerenje EM polja (1)

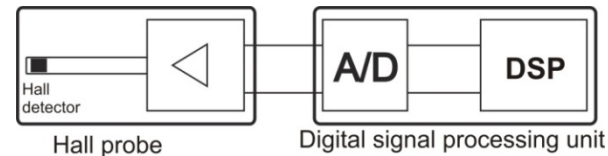
- MJERAČI MAGNETSKIH POLJA NISKIH FREKVENCIJA
 - detekcija polja svitkom

$$u_{\text{ind}}(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B}(t) \cdot \vec{n} dA$$



- Hallove sonde

$$u_H(t) = \frac{K_H \cdot I}{z} \cdot B(t) \cdot \sin \Theta$$



NARDA ELT 400



**LAKESHORE
GAUSSMETER 475**



**AARONIA
NF-5030**



**ETS LINDGREN
HI-3637 VLF**

Mjerenje EM polja (2)

Mjerni instrument	NARDA ELT400	LAKESHORE GAUSSMETER 475	AARONIA NF-5030	ETS-LINDGREN HI-3637 VLF
Detektor polja	Svitak - 3D	Hallova sonda - 1D	Svitak - 3D	Svitak - 3D
Okvirna cijena (€)	4000	4000	1000	1000
Frekvencijski opseg	1 Hz - 400 kHz	DC-20 kHz	1 Hz - 1 MHz (proširivo do 30 MHz)	2-400 kHz
Dinamičko područje	70 nT - max. 226 mT (frekvencijski ovisno)	5 nT - 35 T (ovisno o sondi)	1 pT - 2 mT (proširivo do 1 T)	6 nT - 40 mT
Frekvencija uzorkovanja	1.048 MHz	40-50 kHz (ovisno o tipu detekcije)	65 MHz	nema dostupnih podataka
Mjerni interval	250 ms	10 ms (1 ms)	10 ms	nema dostupnih podataka
True RMS	DA	DA	DA	DA
FFT	DA	DA	DA	NE
Prikaz valnog oblika na osciloskopu	DA	DA	NE	NE

Mjerenje EM polja (3)

- MJERAČI ELEKTRIČNIH POLJA NISKIH FREKVENCIJA
 - detekcija polja paralelnim pločama

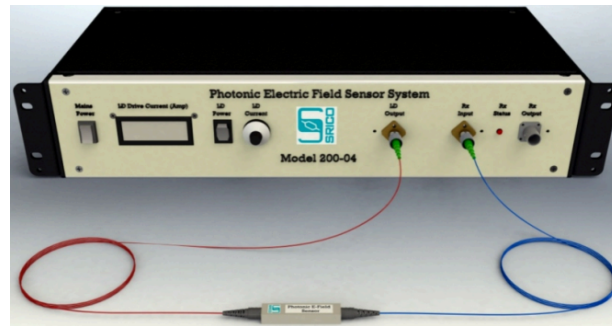
$$i_{\text{ind}}(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \epsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_A \vec{E}(t) \cdot \vec{n} dA$$

- Pockelov efekt

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{E}{F}$$



NARDA EFA 300



SRICO 200-04



**AARONIA
NF-5030**



**ETS LINDGREN
HI-3604**

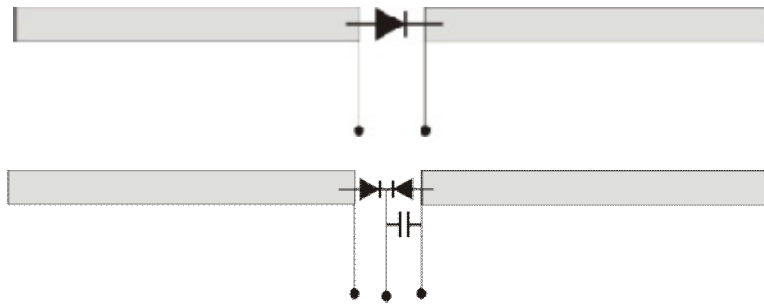
Mjerenje EM polja (4)

Mjerni instrument	NARDA EFA 300	AARONIA NF-5030	ETS-LINDGREN HI-3604	SRICO 200-04
Detektor polja	Svitak - 3D Ploče - 3D	Svitak - 3D Ploče - 1D	Svitak - 1D Ploče - 1D	Optička sonda - 1D
Okvirna cijena (€)	13000	1000	4000	nema dostupnih podataka
Frekvencijski opseg	5 Hz - 32 kHz	1 Hz - 1 MHz	30 - 2000 Hz	10 Hz - 1 GHz
Dinamičko područje	1 V/m - 100 kV/m 100 nT - 32 mT	0.1 V/m - 20 kV/m	1 V/m - 200 kV/m 20 nT - 2 mT	10 V/m - 10 kV/m
Frekvencija uzorkovanja	nema dostupnih podataka	65 MHz	nema dostupnih podataka	nema dostupnih podataka
Mjerni interval	250 ms	10 ms	nema dostupnih podataka	nema dostupnih podataka
True RMS	DA	DA	DA	DA
FFT	DA	DA	NE	NE
Prikaz valnog oblika na osciloskopu	NE	NE	DA	NE

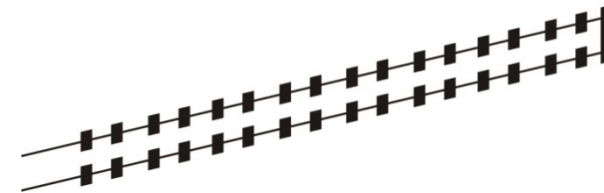
Mjerenje EM polja (5)

ŠIROKOPOJASNE SONDE ZA MJERENJE ELEKTRIČNOG POLJA

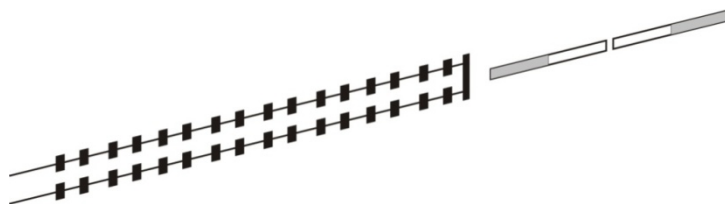
Diodna detekcija (standardna i kompenzirana)



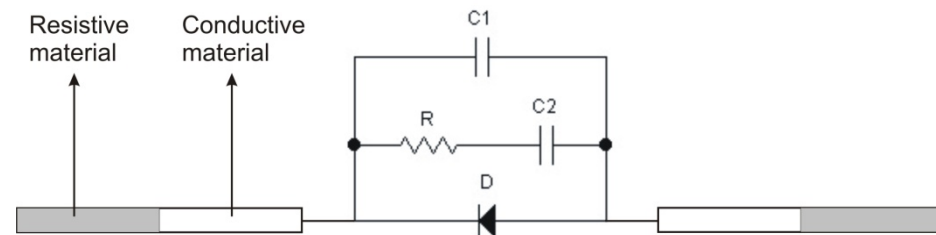
Detekcija termočlankom



Kombinirana detekcija



Frekvencijski selektivne sonde



Sonde temeljene na diodnoj detekciji

- Diodna detekcija

- standardna:

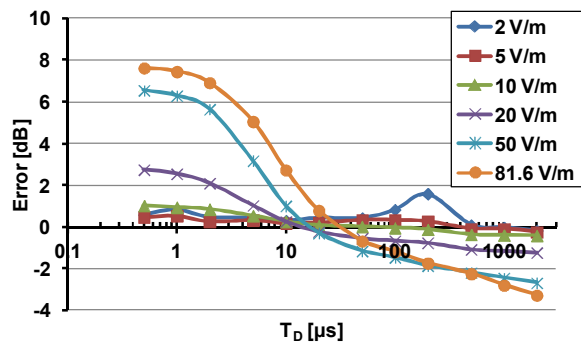
- široko frekventijsko (kHz-GHz) i dinamičko područje (>60 dB)
 - izvrsna osjetljivost uz visoki prag uništenja (0.1 V/m//1000 V/m)
 - **inherentna pogreška** koja onemogućava pouzdano mjerenje polja kompleksnih valnih oblika

- kompenzirana:

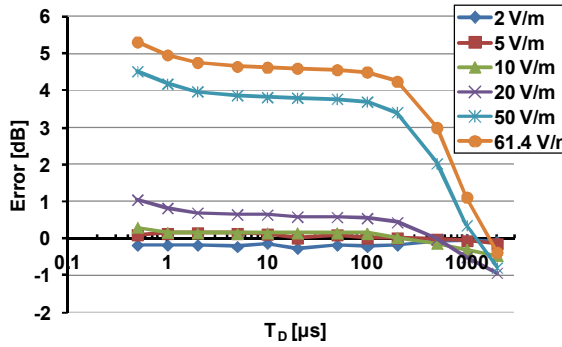
- široko frekventijsko i dinamičko područje
 - dobra osjetljivost uz visoki prag uništenja
 - **pouzdana mjerenje RMS** vrijednosti polja bez obzira na valni oblik mjenog polja
 - **svi ostali parametri** signala, uključujući i vršnu vrijednost ostaju **nepoznati**



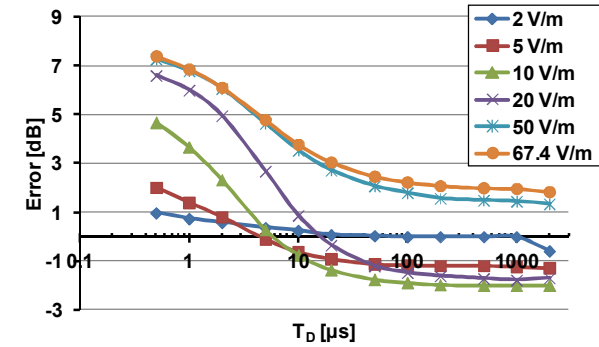
Pogreška sonde



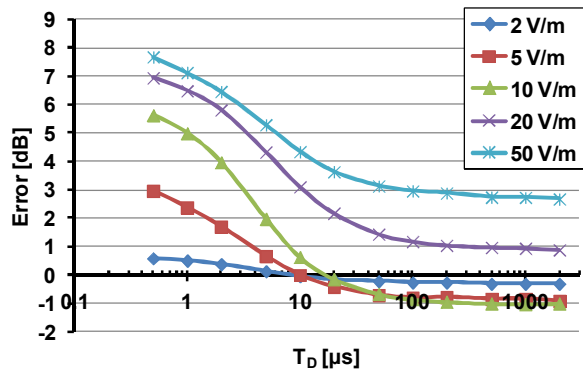
NARDA EF 0392



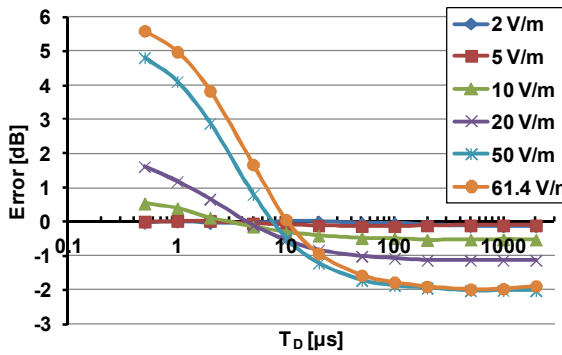
NARDA EF 1891



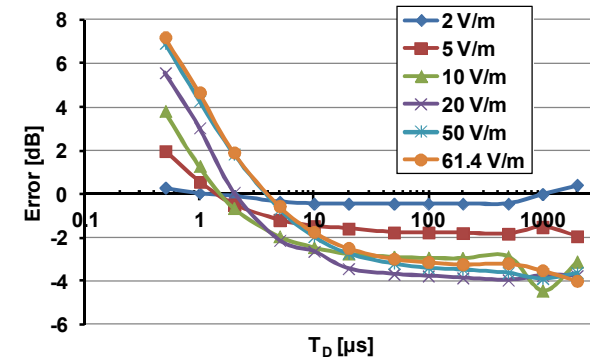
PMM EP300



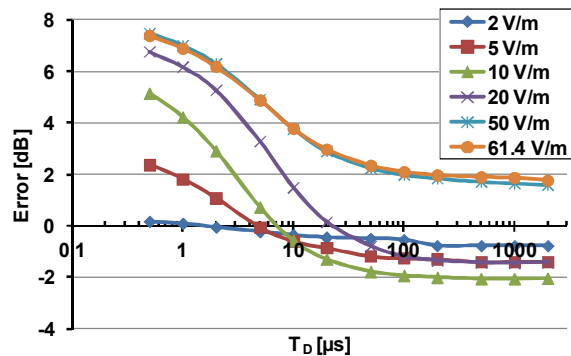
PMM EP408



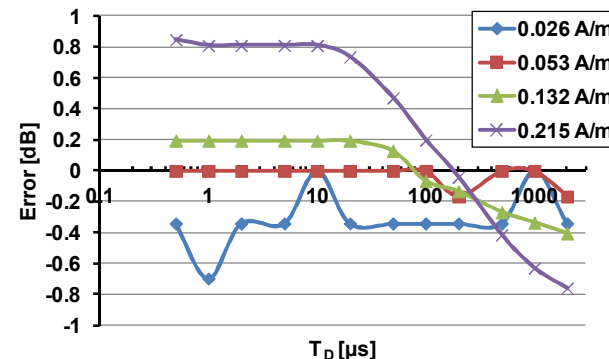
PMM EP330



PMM EP600



PMM EP408



PMM HP102

Razvoj sonde – detekcija ovojnice

$$u_D(t) = \sum_{k=1}^n -U_{k0}^2 \cdot \frac{C_A^2 \cdot r_{D0}^2 \cdot \omega_k^2}{1 + \omega_k^2 \cdot r_{D0}^2 \cdot (C_A + C_D)^2} \cdot \frac{\alpha}{4} -$$

$$- \alpha \cdot r_{D0}^2 \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ j=2 \\ i < j}}^{n-1} \left\{ U_{i0} \cdot U_{j0} \cdot \frac{\omega_i \cdot \omega_j \cdot C_A^2}{[1 + \omega_i^2 \cdot r_{D0}^2 \cdot (C_A + C_D)^2] \cdot [1 + \omega_j^2 \cdot r_{D0}^2 \cdot (C_A + C_D)^2]} \cdot \right.$$

$$\cdot \frac{1}{2} \cdot [1 + \omega_i \cdot \omega_j \cdot r_{D0}^2 \cdot (C_A + C_D)^2] \cdot \cos[(\omega_i - \omega_j) \cdot t] +$$

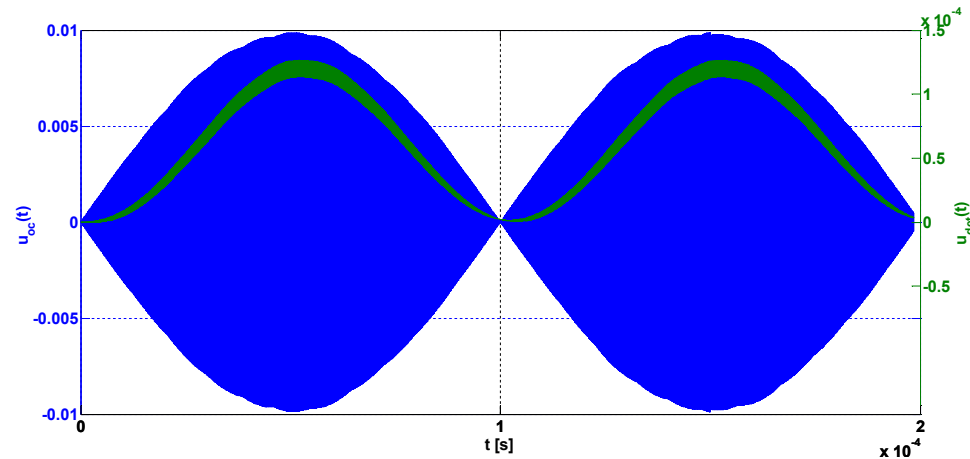
$$+ U_{i0} \cdot U_{j0} \cdot \frac{\omega_i \cdot \omega_j \cdot r_{D0} \cdot C_A^2 \cdot (C_A + C_D)}{[1 + \omega_i^2 \cdot r_{D0}^2 \cdot (C_A + C_D)^2] \cdot [1 + \omega_j^2 \cdot r_{D0}^2 \cdot (C_A + C_D)^2]} \cdot$$

$$\left. \cdot \frac{1}{2} \cdot (\omega_i - \omega_j) \cdot \sin[(\omega_i - \omega_j) \cdot t] \right\}.$$



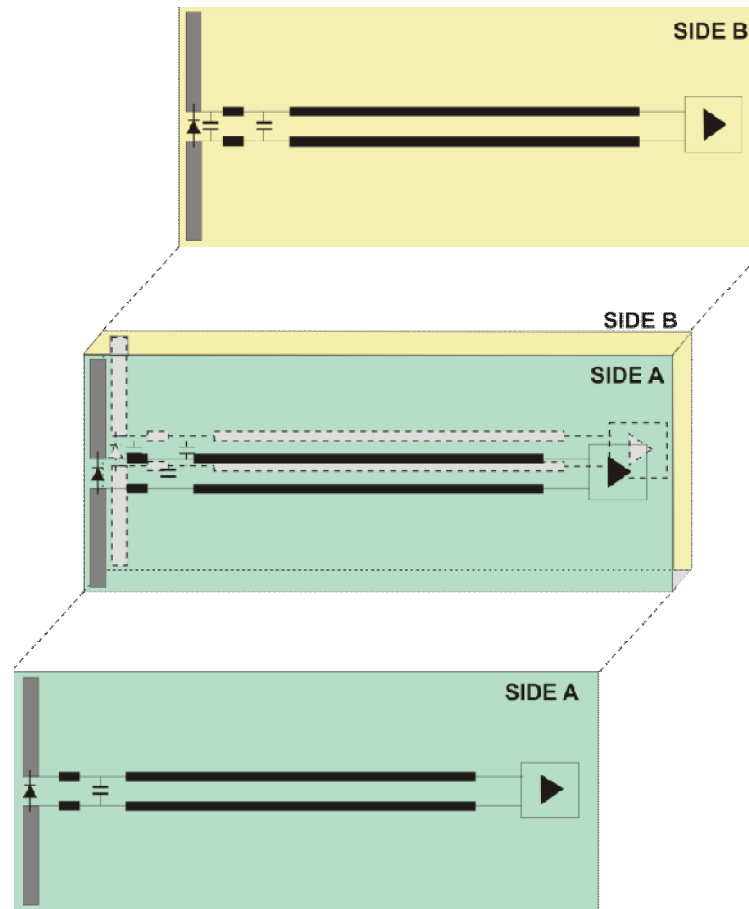
$$u_D(t) = K \cdot U_{\Sigma 0}^2(t)$$

$$\overline{u_D(t)} = 2 \cdot K \cdot u_{\Sigma ef}^2$$

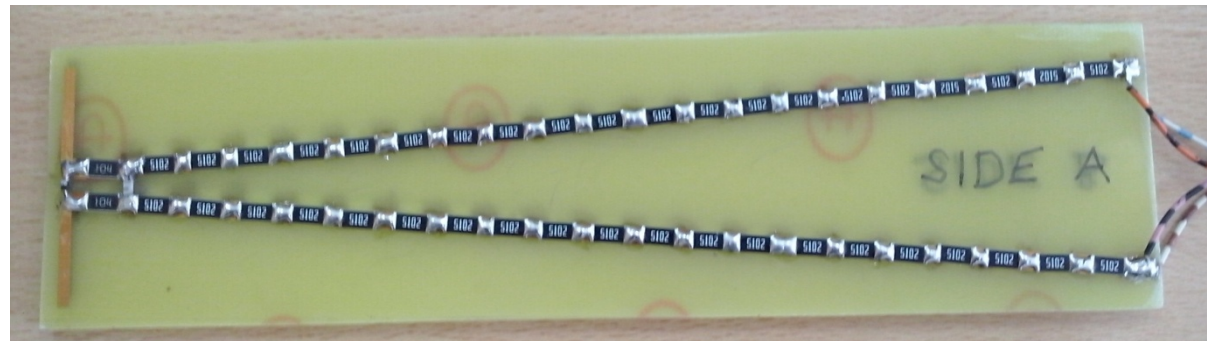
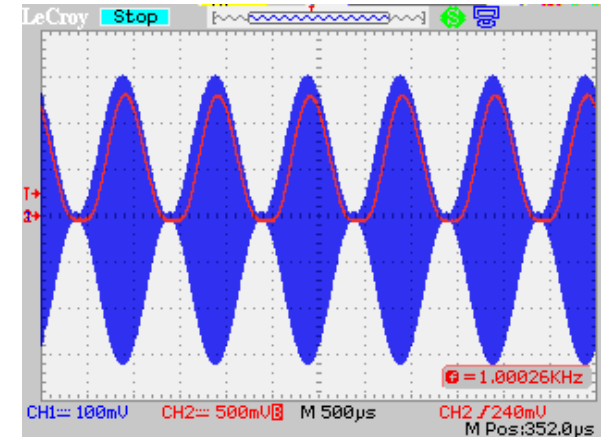
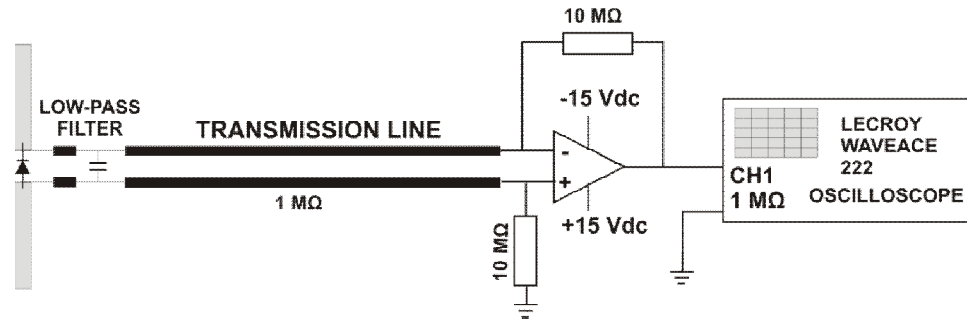


Razvoj sonde – režim malih signala

DVOSTRANI DETEKTOR



Razvoj prototipa



HVALA NA PAŽNJI!