
ANTENSKI NIZOVI U TELEKOMUNIKACIONIM SISTEMIMA (13M031ANT)

Uvod u teoriju antenskih nizova – Teorijska osnova i
primene antenskih nizova (*array processing*)

Elektrotehnički fakultet – Univerzitet u Beogradu
Informaciono-komunikacione tehnologije (Katedra za telekomunikacije)
prof. Goran Marković (korišćeni su materijali prof. Miljka Erića)

2024/2025

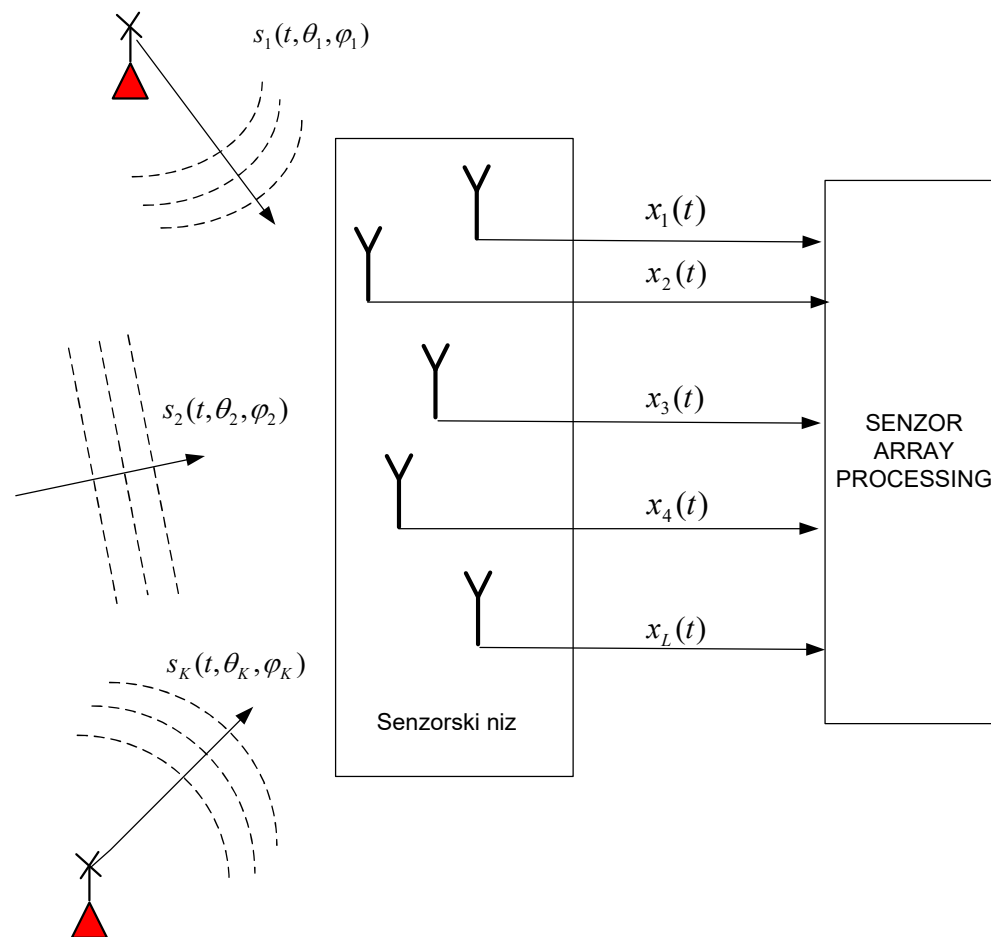


Teorijska osnova antenskih nizova - Pojam

❖ *Sensor Array Processing*

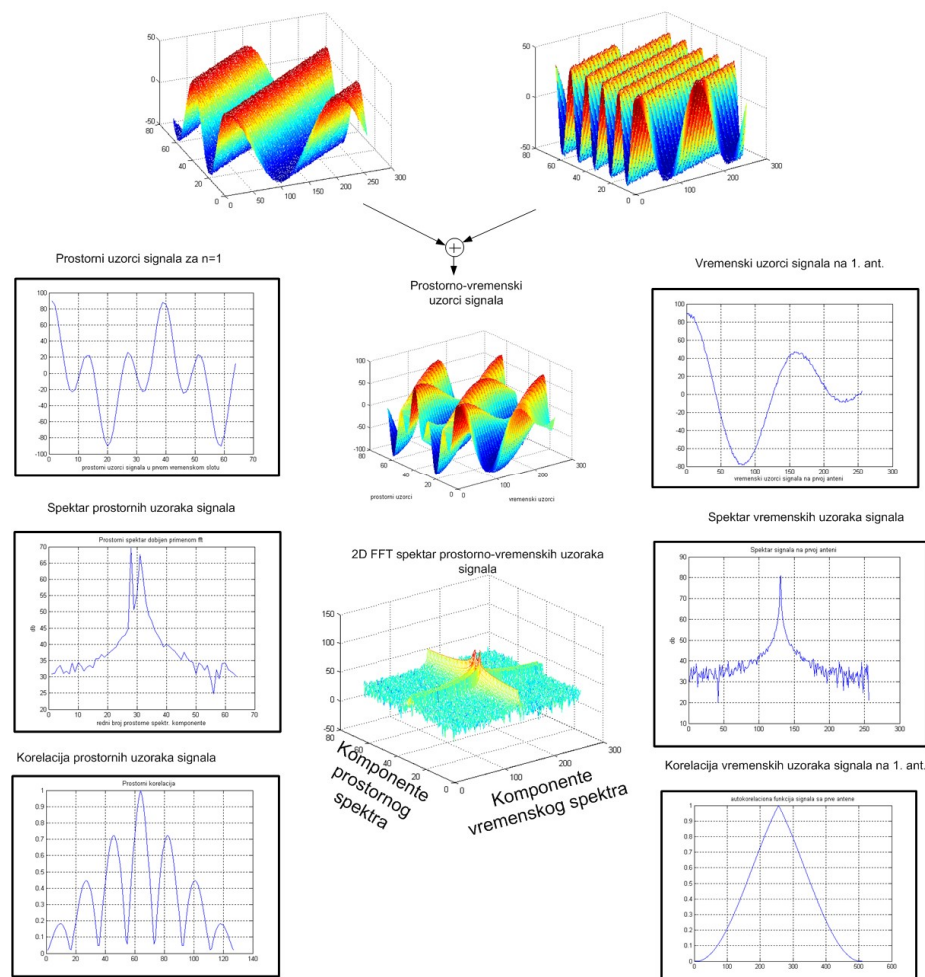
– obrada signala sa izlaza senzorskog niza (u našem slučaju antenskog niza).

- Hary L. Van Trees: “*Optimum Array Processing, part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory*”, Wiley-Interscience 2002.



Teorijska osnova antenskih nizova - Pojam

Razdvojjivost signala u prostornom domenu – prostorno filtriranje (SFIR, *Spatial Filtering*)



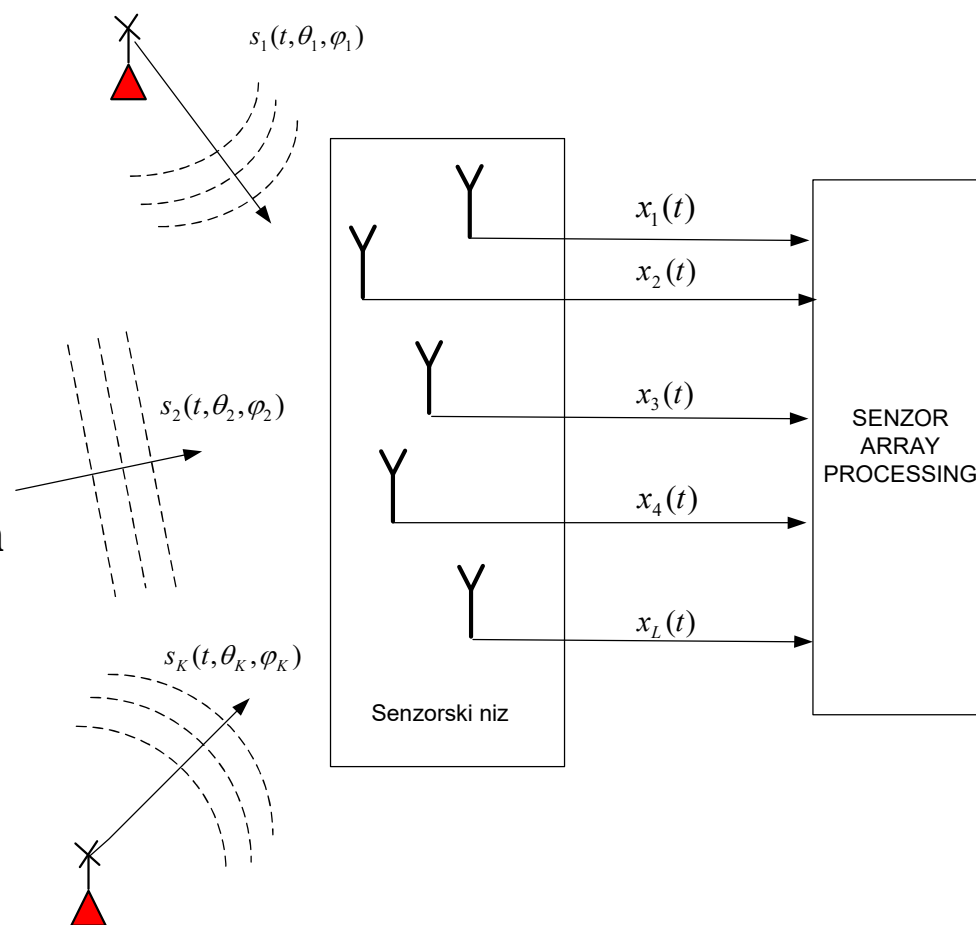
Teorijska osnova antenskih nizova - Pojam

Signali	Propagacioni medijum	Senzori
Radio-frekvencijski signali (RF signali ili radio signali)	Slobodan prostor Dielektrik	Antene
Akustički signali (zvučni talasi)	Slobodan prostor Voda	Mikrofoni Hidrofoni
Seizmički signali (talasi)	Tlo	Geofoni Akcelometri Seizmometri

Teorijska osnova antenskih nizova - Pojam

❖ Prostiranje radio signala putem EM talasa, prostiranje akustičkih i seizmičkih signala predstavlja prostorno-vremenski fenomen

- Postoji potreba za Array processing-om.
- *Array processing* - Obrada (digitalna) signala u prostorno-vremensko frekvencijskom domenu.
- Multidimenzionalna obrada signala



Teorijska osnova AN – Osnovne geometrije

- ❖ **Senzori u nizu mogu da budu razmešteni :**
 - **Linearno (duž linije) – Linearni antenski nizovi**
 - **Planarno u 2D (u ravni) – Planarni (2D) antenski nizovi**
 - **Prostorno u 3D – Prostorni (3D) antenski nizovi**

- ❖ **Razmak (rastojanje) između senzora u nizu može da bude:**
 - **Uniformno (ekvidistantno) – Uniformni antenski nizovi**
 - **Neuniformno – Neuniformni antenski nizovi**
 - **Slučajan raspored – Slučajni (*random*) antenski nizovi**

Teorijska osnova AN – Algoritmi

- ❖ **Array processing** čine algoritmi sa (prostornim) neuniformnim odmeravanjem signala (talasnog fronta).
 - MUSIC (Multiple Signal Classification) metod, Schmidt, 1979. godine
- ❖ Signali koji se superponiraju na senzorskom nizu se preklapaju u vremenskom i spektralnom domenu
- ❖ Usled različitih smerova dolaska superponirani signali su međusobno ortogonalni u prostornom domenu
 - Moguća je prostorna selekcija (prostorno filtriranje željenog signala)
 - Moguća je primena višestrukog pristupa na bazi prostorne raspodela signala (SDMA, *Space Division Multiple Access*) u TK sistemima.

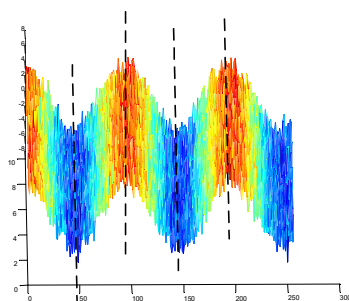
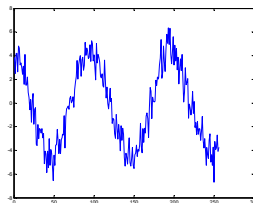
Teorijska osnova AN – Klase/Strukture signala

- ❖ Klase strukture signala u vremenskom domenu
 - Poznati signali (poznati prijemniku)
 - Signali sa nepoznatim parametrima
 - Signali sa poznatom strukturom (npr. QPSK)
 - Slučajni (random) signali.
- ❖ Klase strukture signala u vremenskom domenu
 - Signali tačkastih izvora u dalekom polju (ravni talas)
 - Signali tačkastih izvora u bliskom polju (sferični talas)
 - Signali prostorno raspodeljenih izvora
- ❖ Klase strukture signala u prostorno-vremenskom domenu
 - Uskopojasni signali: Radio i radarski signali kod je kojih je odnos širine spektra i centralne učestanosti $\Delta\omega_{BW} / \omega_c < 2.5\%$
 - Širokopojasni signali: Akustički i seizmički signali

Teorijska osnova AN – Ciljevi primene

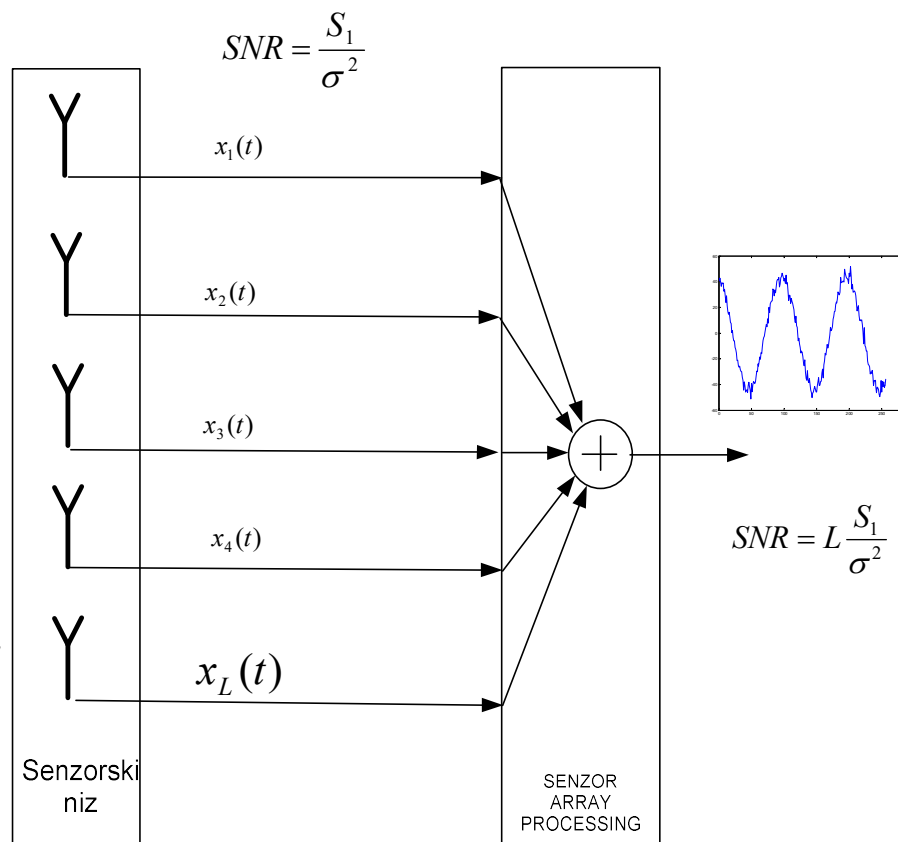
- ❖ Poboljšanje odnosa signal/šum klasičnim ili adaptivnim prostornim filtriranjem (*beamforming-om*) signala sa senzorskog (antenskog) niza – tzv. *Waveform Estimation*.
- ❖ Detekcija broja signala koji se superponiraju na senzorski niz – tzv. *Signal Detection*
- ❖ Procena smera dolaska signala superponiranih na senzorski niz – *Direction Of Arrival (DOA) estimation*
- ❖ Procena prostornog spektra superponiranih signala – *Spatial Spectrum Estimation*

Teorijska osnova AN – Ciljevi - Primer SFIR



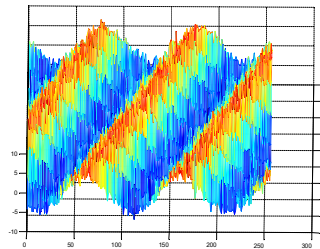
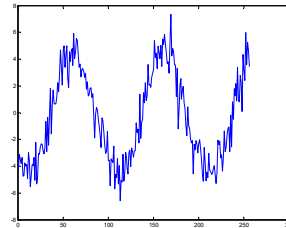
Ekvifazne ravni

**Princip prostornog filtriranja
(SFIR beamforming)
-najjednostavniji slučaj-**



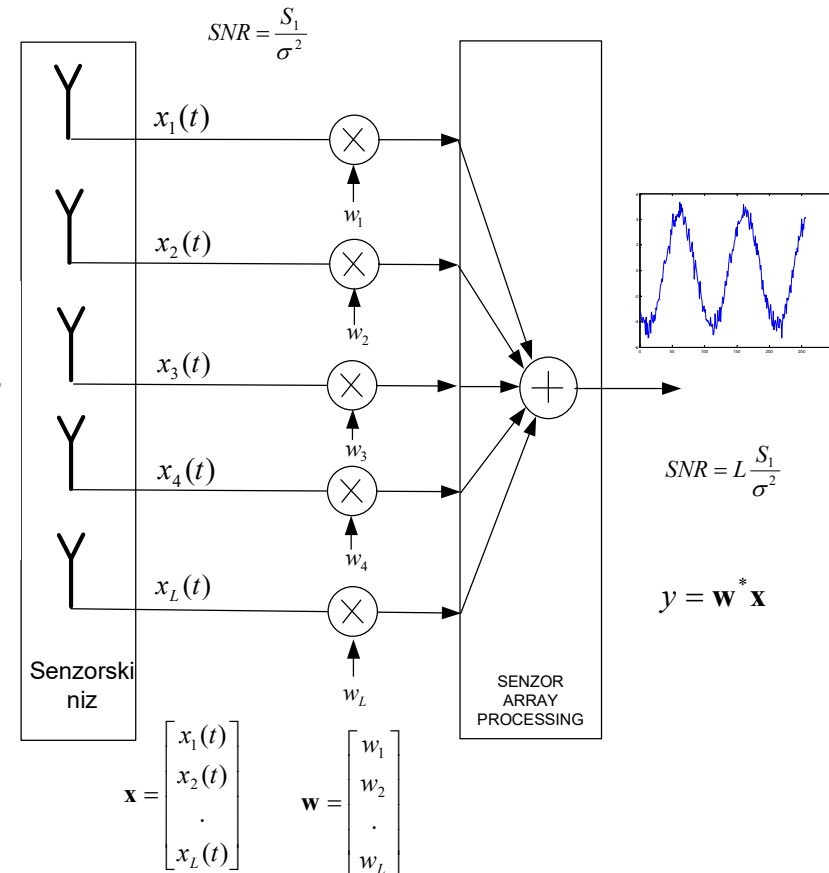
Teorijska osnova AN – Ciljevi - Primer SFIR

Napomena: Iste su početne faza signala na prvoj anteni i na izlazu prostornog filtra

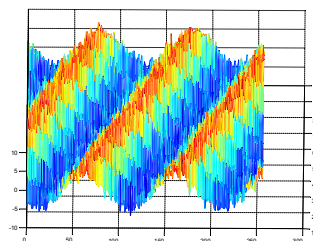
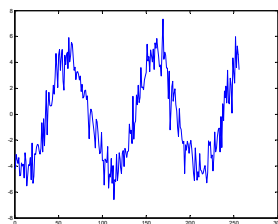


Ekvifazne ravni

Princip prostorno prilagođenog filtra

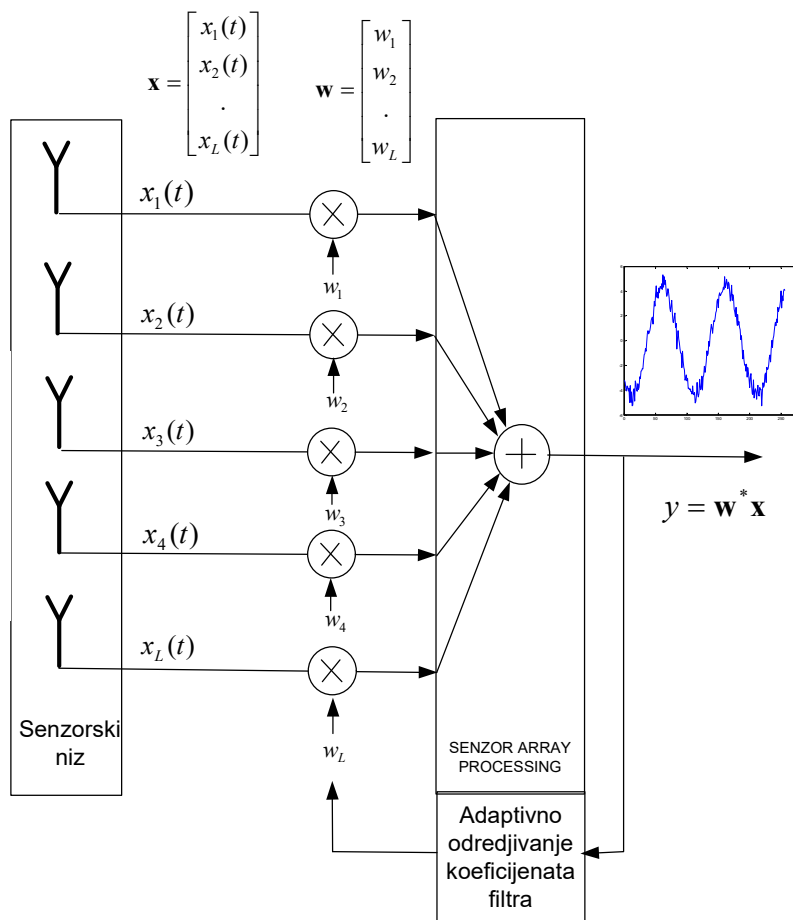


Teorijska osnova AN – Ciljevi - Primer SFIR



Ekvifazne ravni

Princip adaptivnog prostornog filtriranja

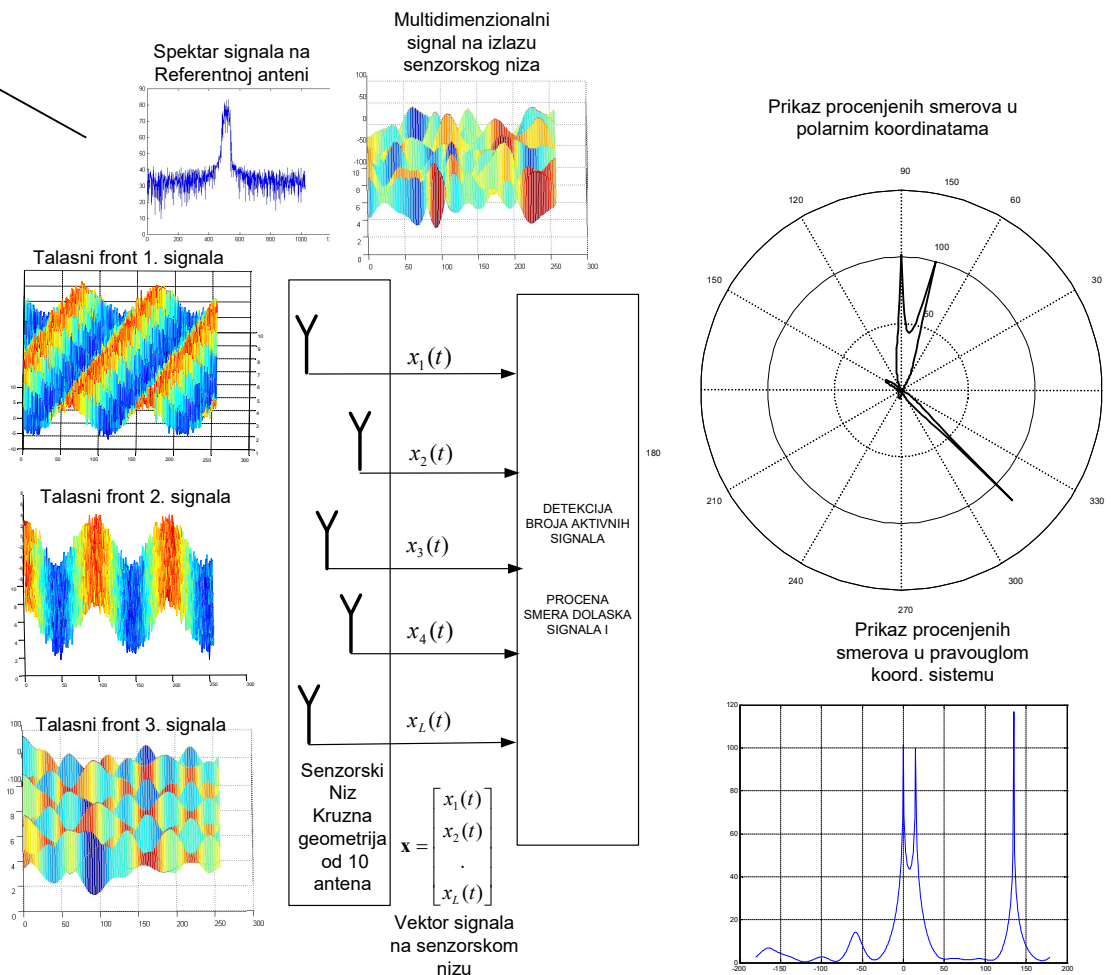


Teorijska osnova AN – Tipovi prostornih filtara

- ❖ Najvažniji tipovi prostornih filtera (*beamformer-a*)
 - Optimalni prostorni filter (*space-matched filter – delay and sum beamformer*)
 - Algoritmi za formiranje nule dijagrama usmerenosti (*null-steering*)
 - Algoritmi za optimalno prostorno filtriranje
 - MVDR – *Minimum Variance Distortionless Response*
 - MPDR – *Minimum Power Distortionless Response*
 - MMSE – *Minimum Mean-Square Error*
 - Algoritmi za prostorno filtriranje širokopolasnih signala

Teorijska osnova AN – DOA estimacija

Detekcija i procena smera dolaska radio signala (DOA estimation)

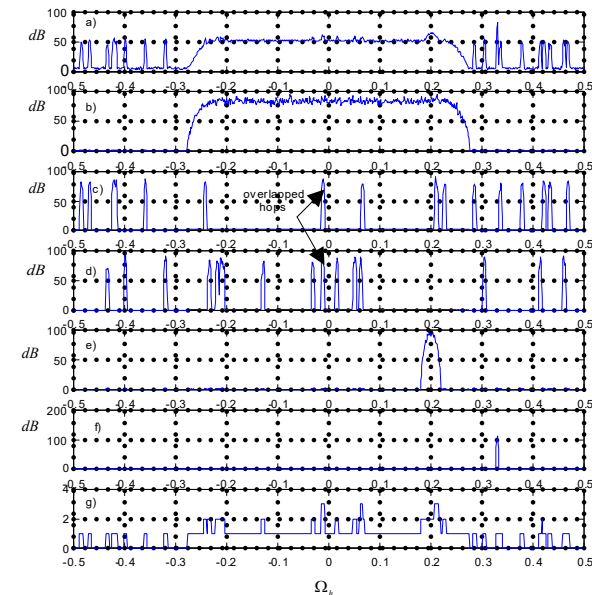
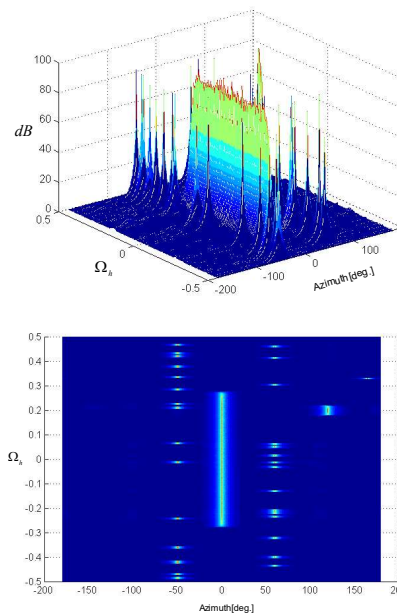
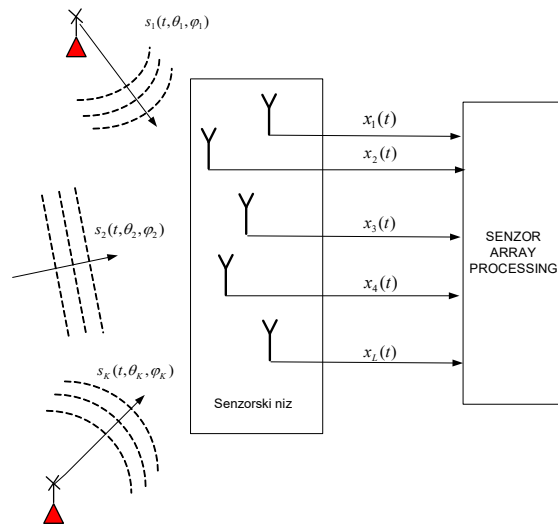


Teorijska osnova AN – DOA estimacija (metodi)

- ❖ Najvažniji metodi za procenu smera dolaska signala (DOA):
 - Klasične metode za procenu smera (*Watson-Watova*, *Wulenveber-ova*, interferometarske, *Doppler-ova*,...)
 - Maximum Likelihood (ML) metode
 - Kvadratični algoritmi za procenu smera (MVDR,....)
 - Podprostorne (sub-space) visokorezolucione metode (MUSIC, *Pisarenko*, MINNORM, ESPRIT,.....).

Teorijska osnova AN – Procena *Spatial Spectrum*

Procena prostornog spektra superponiranih signala – *Spatial Spectrum Estimation*



Teorijska osnova AN – Kategorije problema

❖ Kategorije tehničkih problema u *array processing*-u:

- Problem je rešiv u vremensko-frekvencijskom domenu, ali se primenom *array procesing*-a mogu značajno poboljšati performanse postojećih sistema
- Problem nije rešiv u vremensko-frekvencijskom domenu bez primene *array processing*-a. Rešenje je moguće u prostorno-vremensko-frekvencijskom domenu

Teorijska osnova AN – Kategorije problema

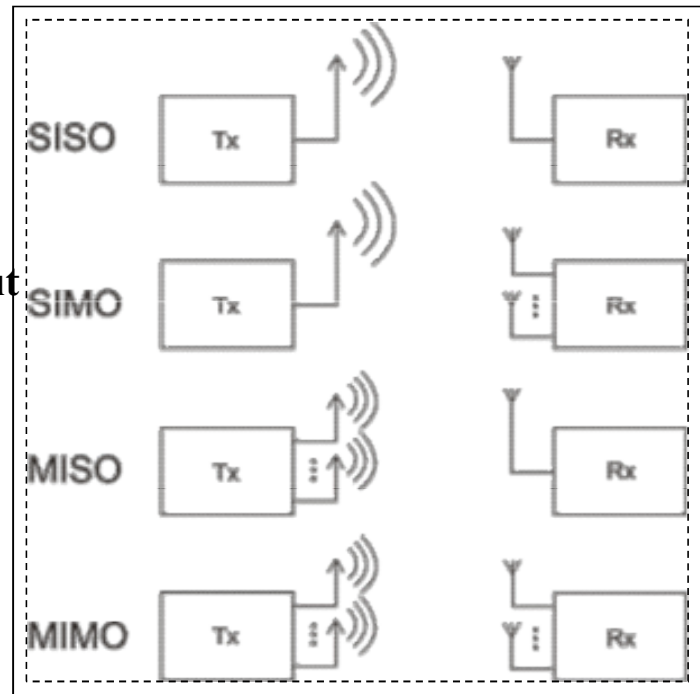
Primer prve kategorije problema: *Space-time* komunikacioni koncepti

Single-Input-Single-Output
Point-to-point

Single-Input-Multiple-Output
Point-to-volume

Multiple-Input-Single-Output
Volume-to-point

Multiple-Input-Multiple-Output
Volume-to-volume



Shanon

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \right)$$

>Shanon

$$C = W \log_2 \left(1 + n_R \frac{P}{\sigma^2} \right)$$

>Shanon

$$C = W \log_2 \left(1 + n_T \frac{P}{\sigma^2} \right)$$

>Shanon

$$C = W \log_2 \left(1 + n_R n_T \frac{P}{\sigma^2} \right)$$

XIXO: SIMO, MISO, MIMO

n_T – broj predajnih antena n_R – broj prijernih antena

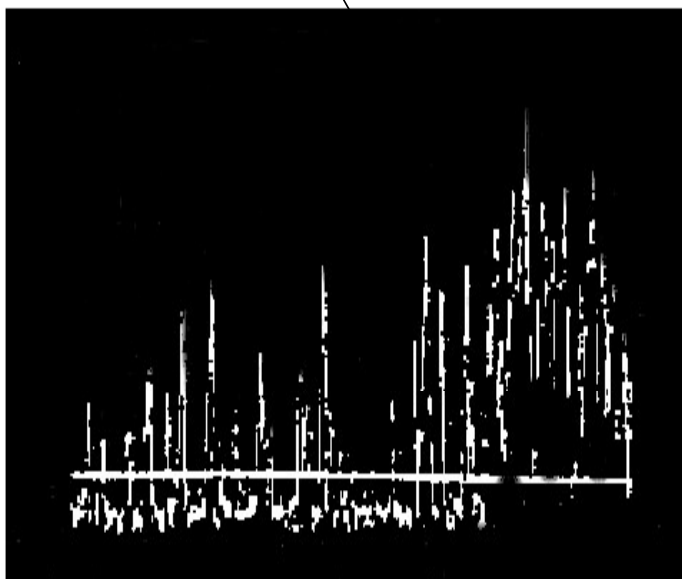
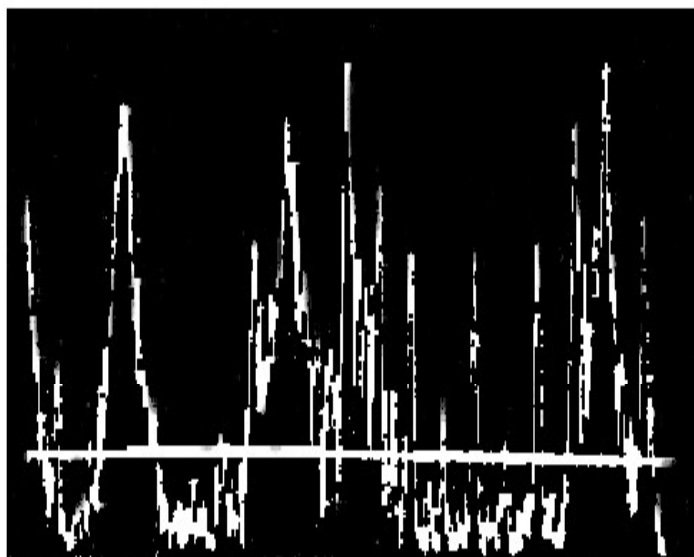
Teorijska osnova AN – Kategorije problema

❖ Primer druge kategorije problema:

- Analiza scenarija sa više signala - Automatsko pretraživanje RF spektra, automatska detekcija broja aktivnih signala, procena parametara aktivnih signala (smer dolaska, centralna frekvencija, spektralna širina), automatska segmentacija (identifikacija informacionih kanala)
- Proces analize se vrši u odsustvu *a priori* poznavanja informacija o broju aktivnih signala i njihovim parametrima

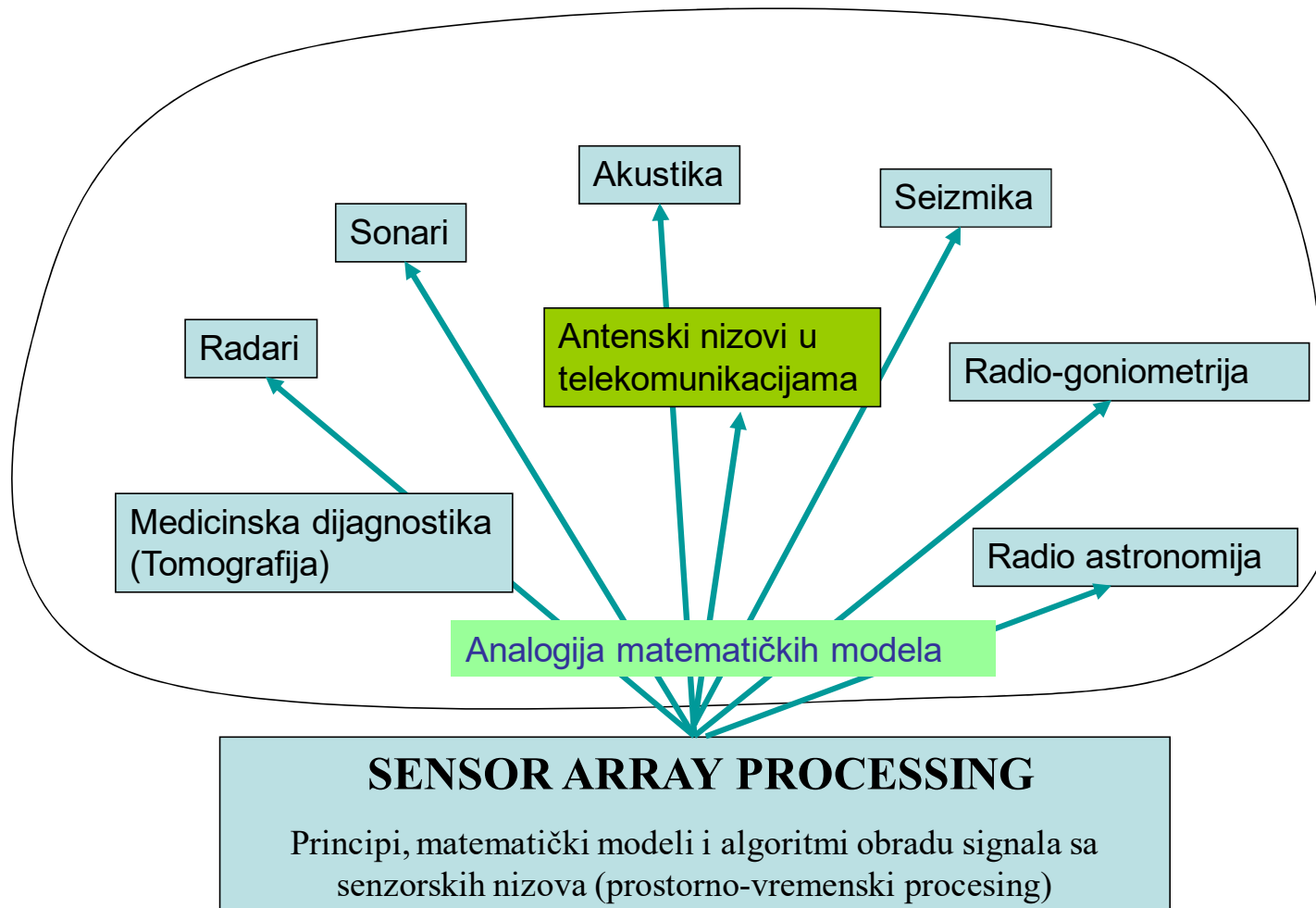
Teorijska osnova AN – Kategorije problema

Primer druge kategorije problema



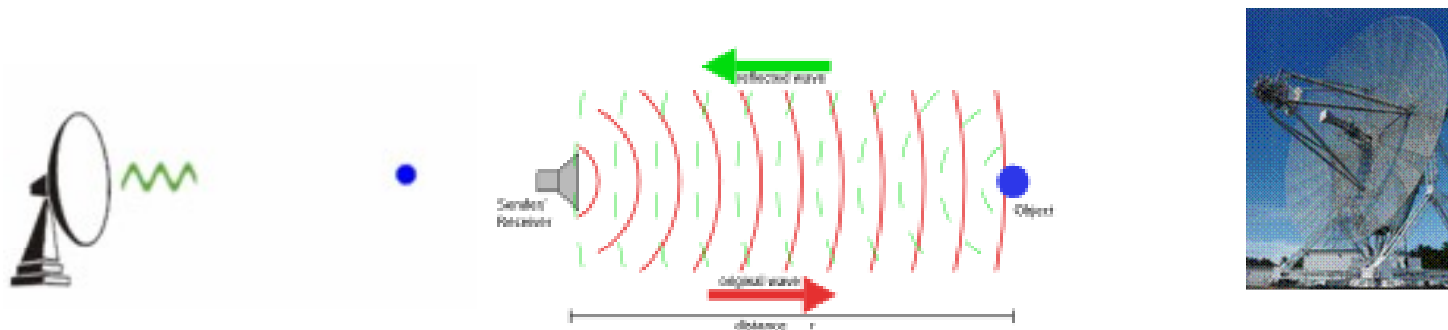
- Koliko signala je trenutno aktivno?
- Kolike su širine spektra signala i centralne učestanosti?
- Iz kog smera dolaze signali?
- Koji tip modulacije je primenjen za svaku od RF emisija?
- Kako presresti, selektovati i pratiti RF emisiju od interesa?

Teorijska osnova AN - Pregled primena



Teorijska osnova AN – Primene: Radari

- ❖ **RADAR – *RA*dio *DE*tectio*N* And *R*ang*I*ng**
- ❖ **Fazirane antenske rešetke - *Phased antenna array*, Luis Alvarez (nobelovac, II svetski rat)**



- ❖ **Fazirane antenske rešetke - grupa antena kod kojih se relativne faze signala koji se vode na pojedinačne antenske elemente podesavaju tako da efektivni dijagram zračenja antenskog niza ima maksimum u željenom smeru, i minimalno zračenje u neželjenim smerovima (Federal Standard 1037C,2006.)**

Teorijska osnova AN – Primene: Radari

❖ Prednosti radara sa faziranim antenskim rešetkama:

- Bezinerciono skaniranje snopa (*beam-a*)
- Korišćenje više nezavisnih snopova (*beam-ova*)
- Osvarivanje velika srednje i vršne snage
- Upravljanje dijagramom zračenja antene
- Prihvatljiva geometrija antenskog niza
- Elektronska stabilizacija snopa (*beam-a*)

Teorijska osnova AN – Primene: Radari

❖ Radari sa faziranim antenskim rešetkama:

- Radari vojne namene
- Visokorezolucioni radari sa sintetičkom antenom
- Radari civilne namene (radari za potrebe kontrole leta – *Air Traffic control*)
- Meteorološki radari

Radarski sistem za rano otkrivanje balističkih raketa *Pave Paws*

1972 elementa u antenskoj rešetki
322 W snage po elementu
Detekcija cilja sa radarskom
refleksnom površinom od 10 m² na
udaljenosti od 6000 km



Teorijska osnova AN – Primene: Radari

Radarski sistem sa faziranom antenskom rešetkom za otkrivanje pozicije minobacača



Teorijska osnova AN – Primene: Radari

Antenski niz
izohorizontalnog radara
u VF opsegu



Teorijska osnova AN – Primene: Radari

**Metreorološki radar
sa antenskim nizom**

**Metrološki radar
AN/SPY-1A postavljen u
*National Severe Storms
Laboratory, Oklahoma*
Predikcija oluja i tornada**



Teorijska osnova AN – Primene: Radio astronomija

- ❖ **Detekcija signala sa nebeskih objekata i procena njihovih parametara**
- ❖ **Antenski nizovi sa veoma velikom otvorom (bazom) - od nekoliko desetina km do nekoliko hiljada kilometara**
- ❖ **Tipicni primeri: *National Radio Astronomy Observatory* i *Cambridge telescope***
- ❖ **Problemi: sinhronizacija sa rotacijom zemlje, Različite karakteristike propagacije na različitim lokacijama antena, vremenska sinhronizacija**

Teorijska osnova AN – Primene: Radio astronomija



**Radio teleskop u milimetarskom
RF opsegu**

***The Very Large Array, a radio
interferometer u New Mexico, USA***

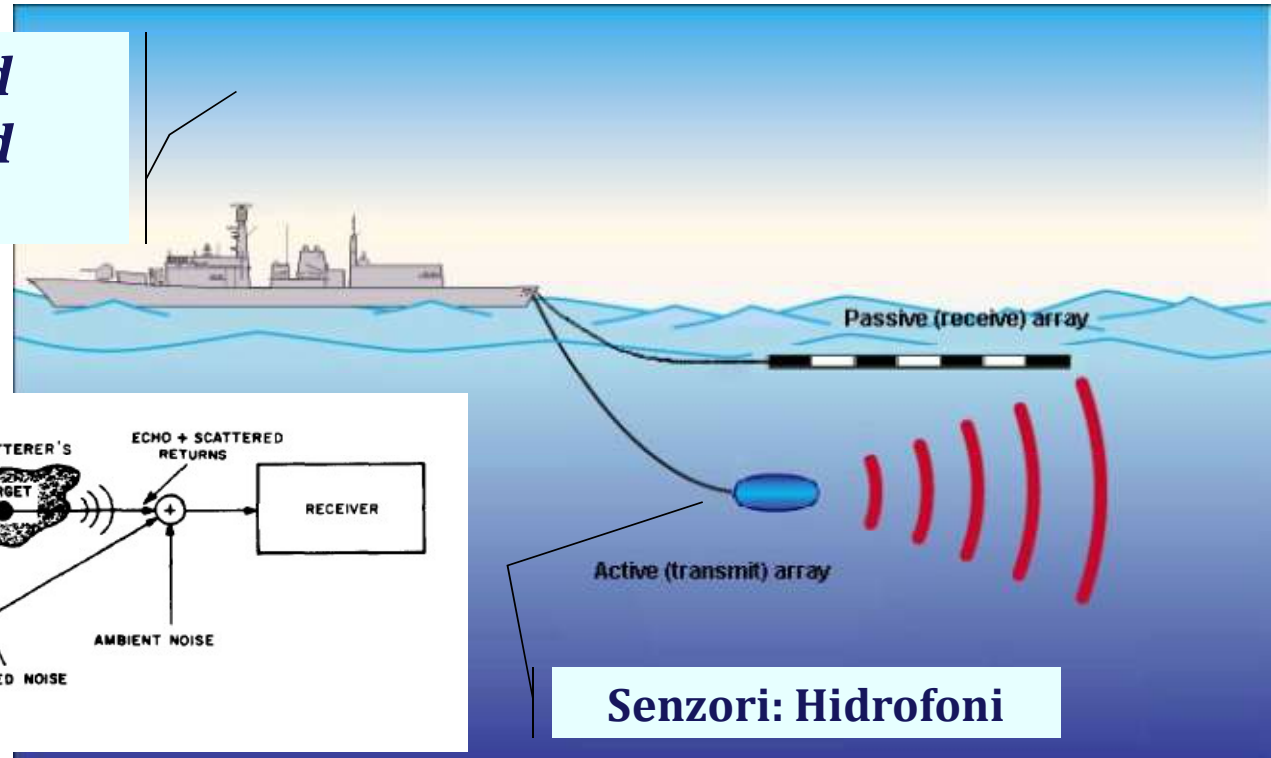
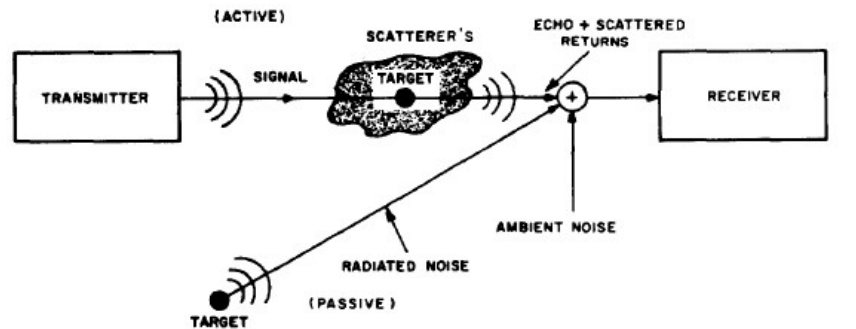


Teorijska osnova AN – Primene: Sonari

- ❖ **Aktivni SONARI – emitovanje akustičke energije u vodi, prijem reflektovanih signala hidrofonskim nizom i procesiranje u cilju detekcije i prepoznavanja objekata od interesa u vodi (Akustički radar)**
- ❖ **Pasivni sonari – prijem akustičke energije u vodi u cilju procene vremenskih i prostornih parametara akustičkog ambijenta**
- ❖ **Detekcija podmornica**
- ❖ **Specifični problemi: Propagacija akustičkog signala u vodi, ambijentalni šum, reverberacija**

Teorijska osnova AN – Primene: Sonari

**SONAR - *SO*und
*N*avigation And
*R*anging**



Senzori: Hidrofoni

Teorijska osnova AN – Primene: Sonari

SONAR - *SOund Navigation And Ranging*



Source : EdgeTech

Teorijska osnova AN – Primene: Sonari

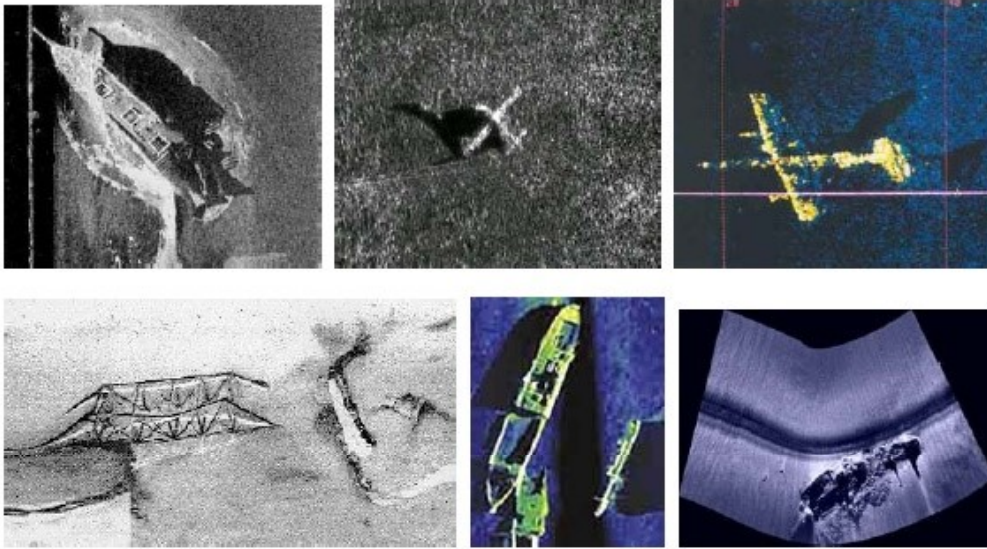


Figure 19.28: A few interesting sidescan sonar images

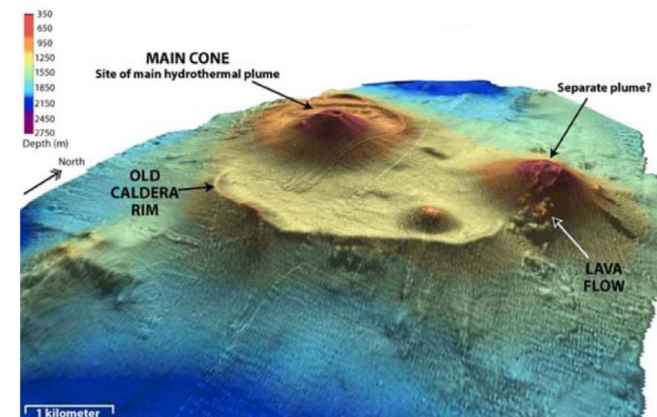


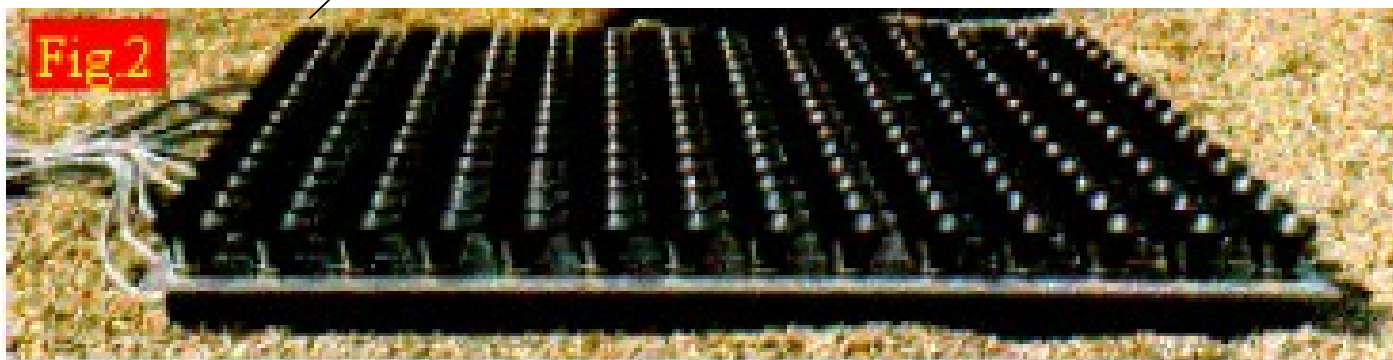
Figure 19.27: Sonar image of the Nikko submarine volcano

Teorijska osnova AN – Primene: Akustika

❖ Mikrofonski nizovi

- Vojne primene: Lociranje mesta eksplozije artilj. raketnih orudja, lociranje snajpera, praćenje borbenih vozila na bojištu, akustički monitoring bojišta, akustički radari, akustičke komunikacije
- Civilne primene: Automobilaska industrija, monitoring buke i ekološki monitoring, akustika na otvorenom i zatvorenom prostoru.

Mikrofonski niz za akusticko sondiranje atmosfere



Teorijska osnova AN – Primene: Lokalizacija

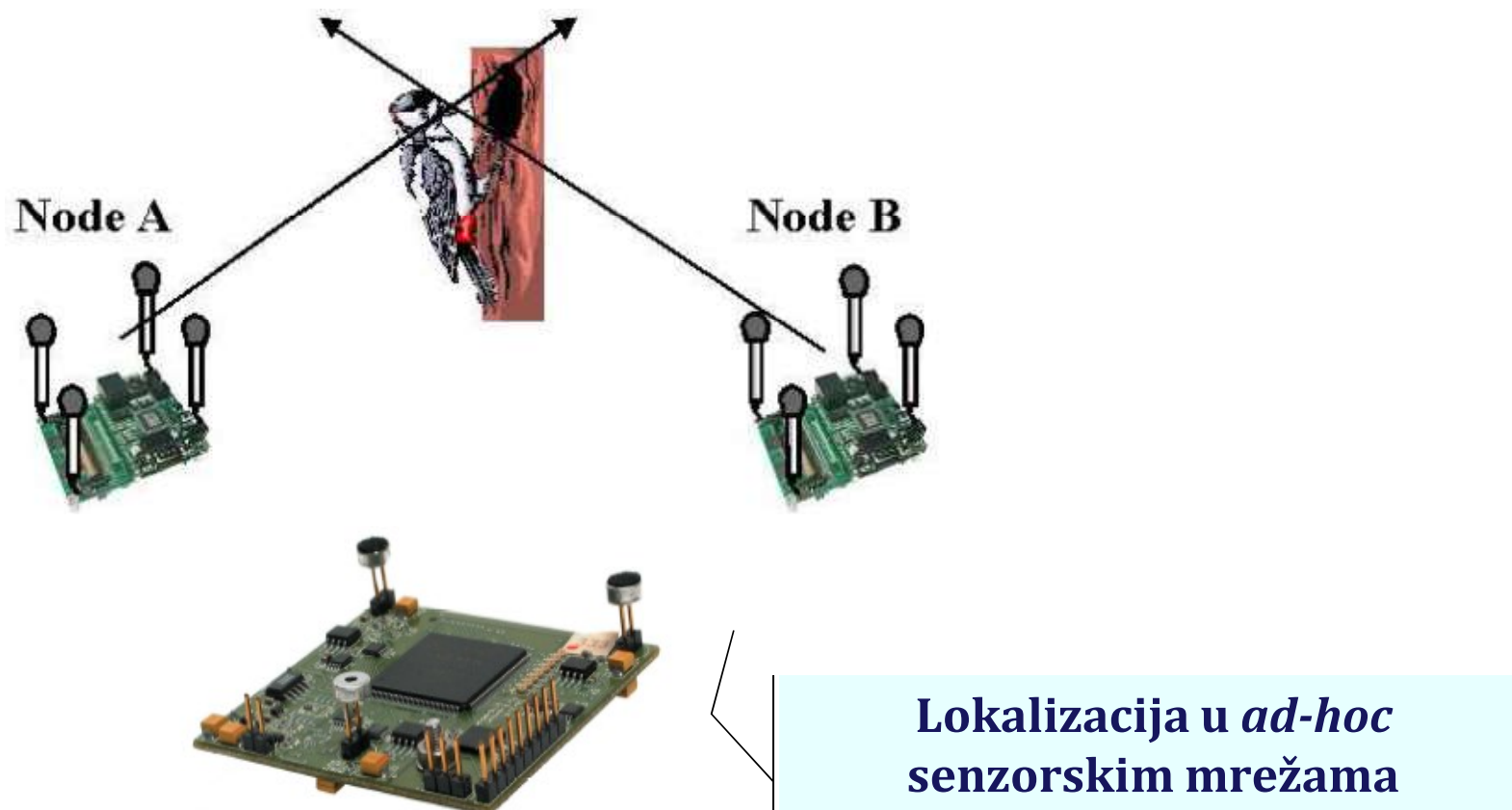


Figure 2. FPGA acoustic sensor board

Teorijska osnova AN – Primene: Lokalizacija

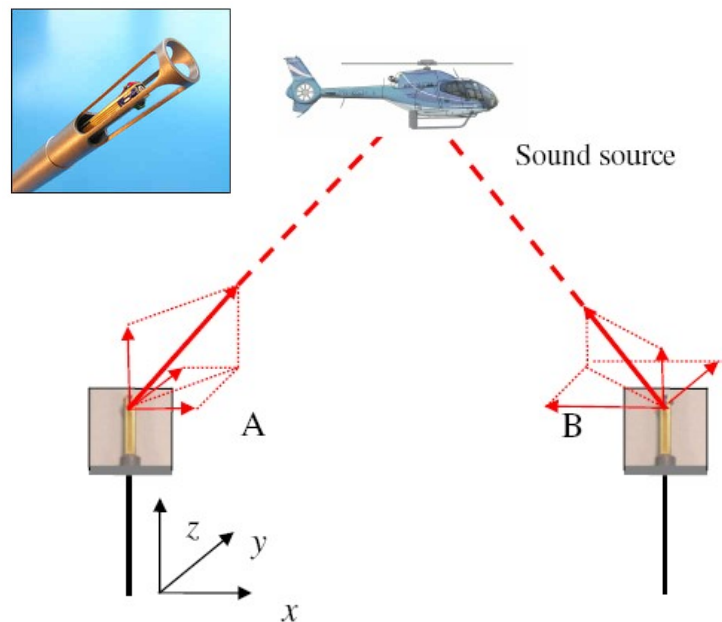


Figure 1. Two 3D probes to track the sound source location



Figure 1. First balloon used for signature collection and wind noise evaluation.

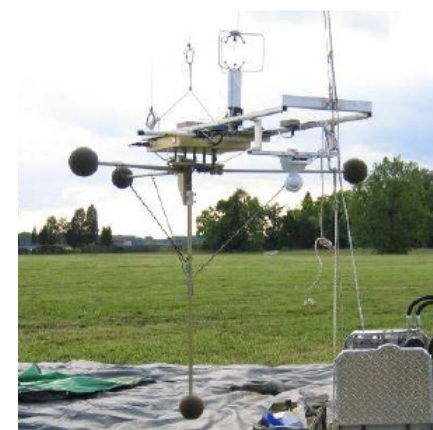


Figure 11. Complete payload.

Teorijska osnova AN – Primene: Lokalizacija

Army Research Lab – ARL Sistem za detekciju minobacača

Sistem za detekciju snajpera

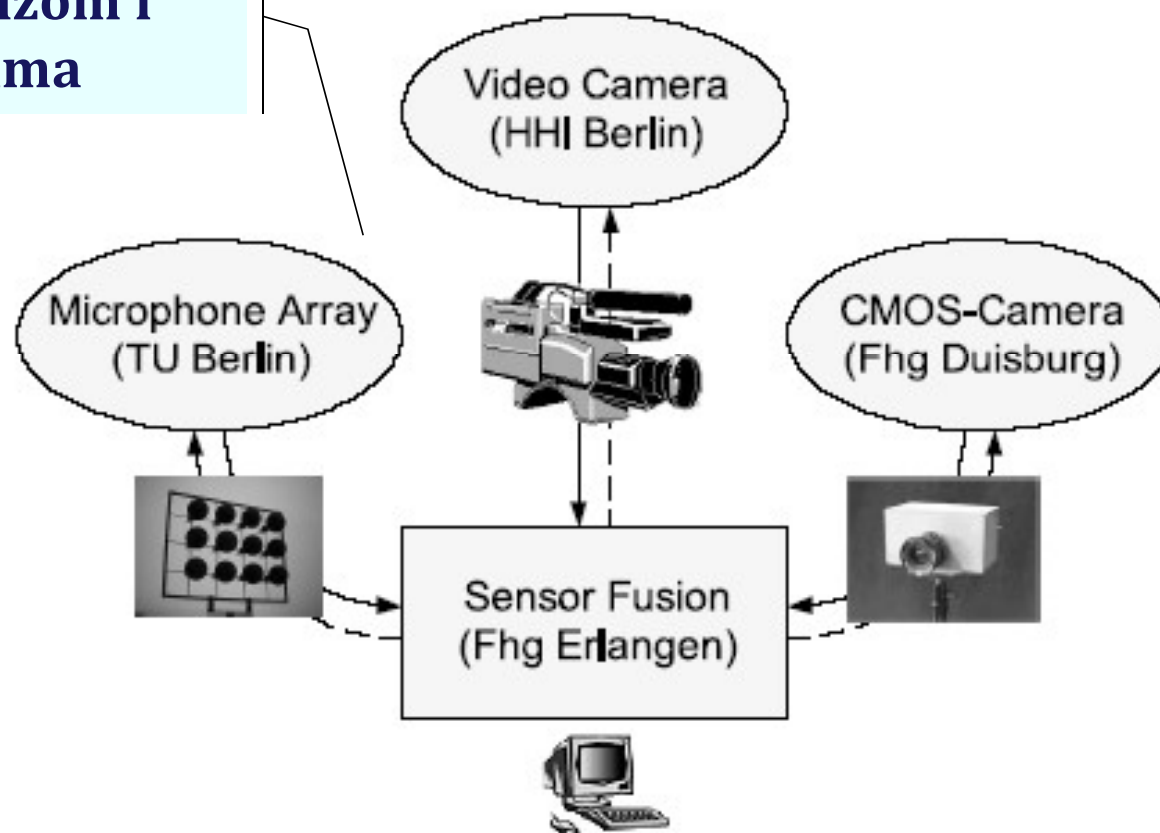


Fig. 1 – Tetrahedral Microphone Array



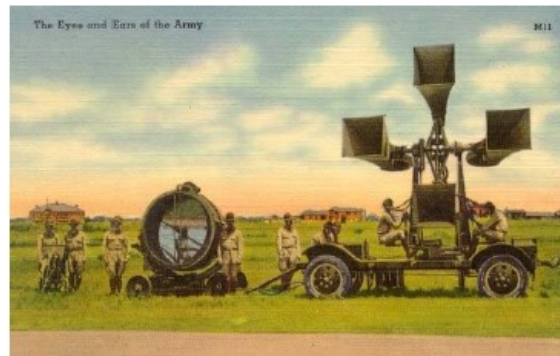
Teorijska osnova AN – Primene: Lokalizacija

Sistem sa integrisanim
mikrofonskim nizom i
video kamerama



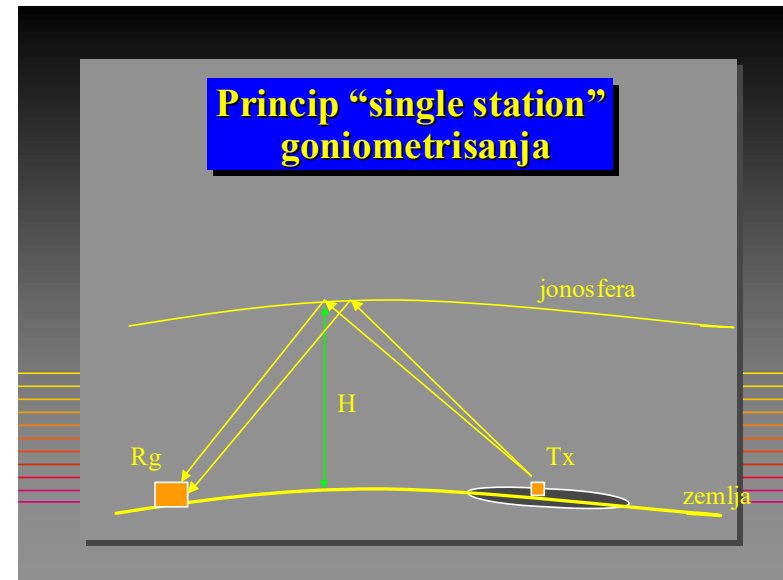
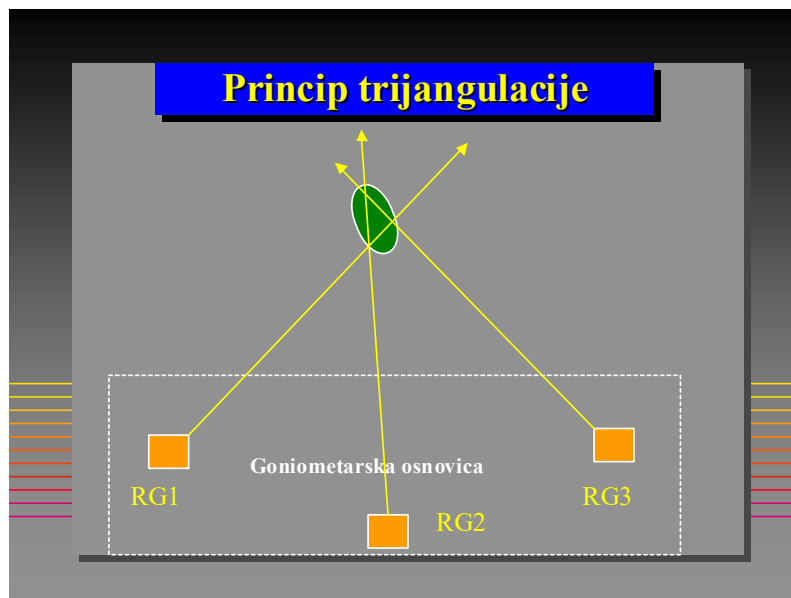
Teorijska osnova AN – Primene: Lokalizacija

Sistemi za lociranje artiljerijskih oruđa iz romantičnog vremena

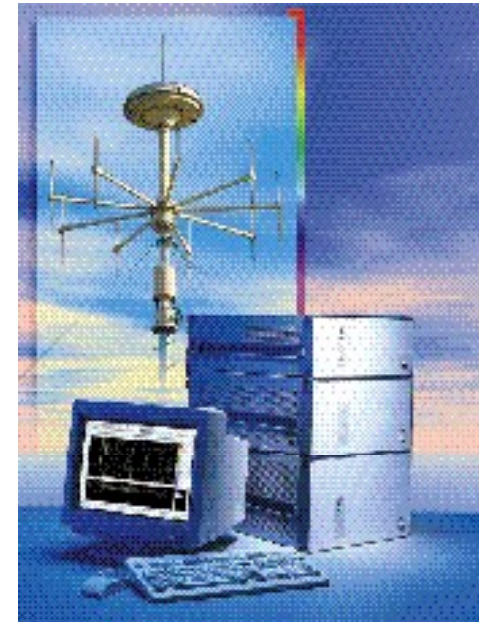


Teorijska osnova AN – Primene: Radio-gonimetrija

- ❖ Radio-gonimetrija (*Direction finding*) određivanje smeru dolaska signala
- ❖ Trijagulacijom smerova određuje se lokacija predajnika



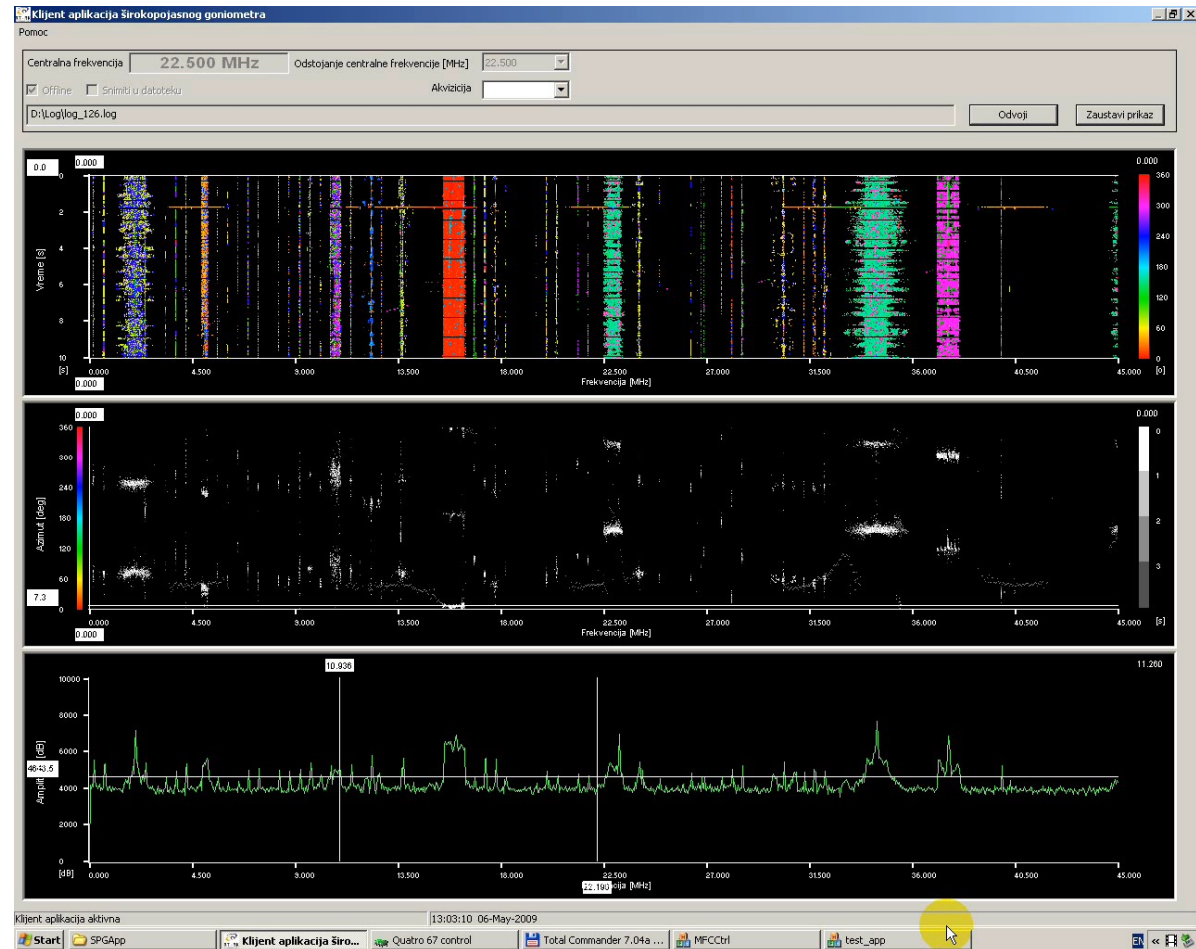
Teorijska osnova AN – Primene: Radio-gonimetrija



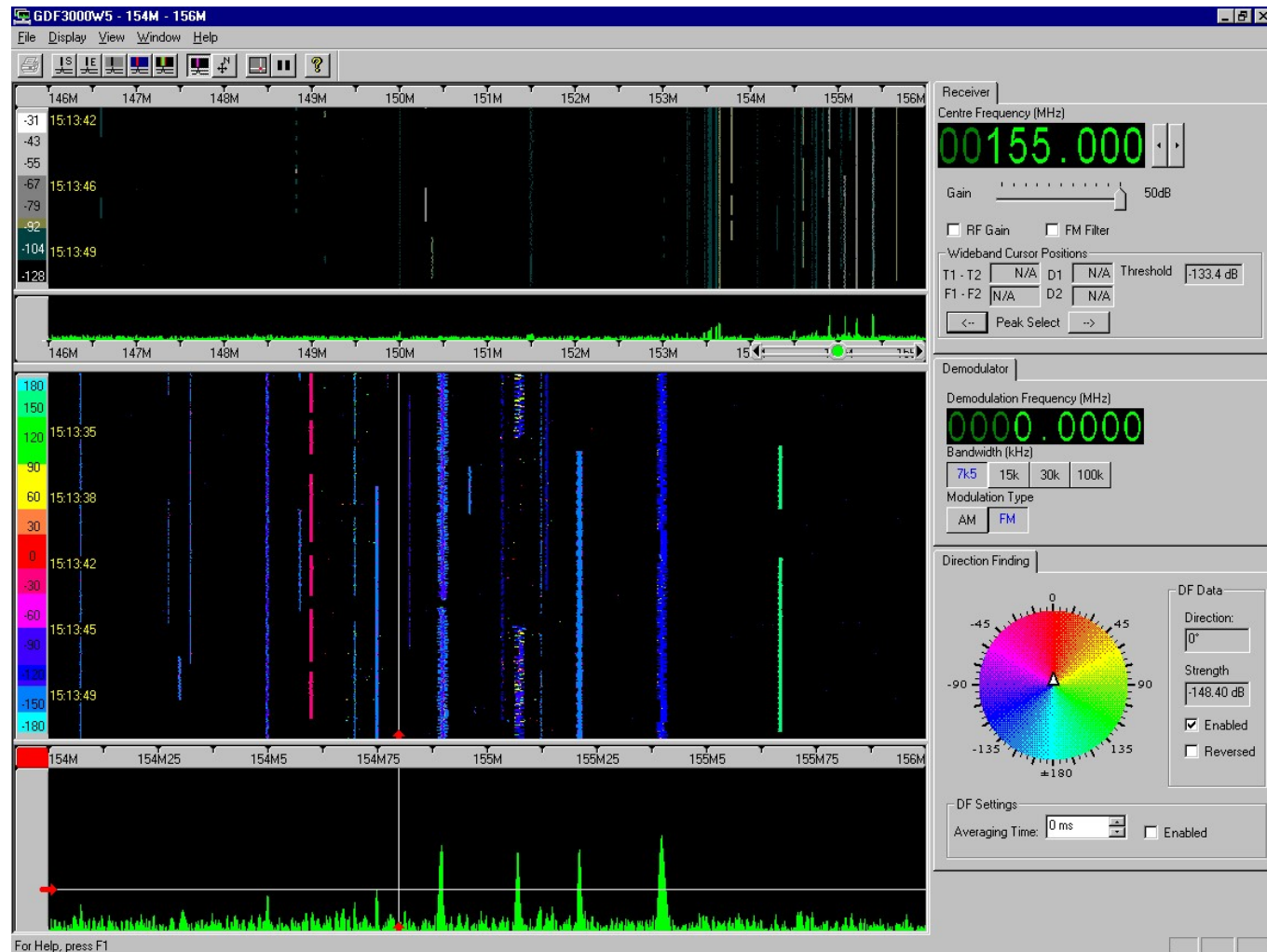
RGK 2/3 2000 g.

Teorijska osnova AN – Primene: Radio-gonimetrija

- ❖ Širokopolasni radio-goniometri
- ❖ WIDE-BAND intercept/DF stanice
 - Presretanje emisija sa frekventijskim skakanjem
 - Goniometrisanje DS-SS signala
 - Goniometrisanje učesnika u GSM mreži



Teorijska osnova AN – Primene: Radio-gonimetrija



Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Katedra za telekomunikacije

15:38

Antenski nizovi u TK sistemima (13m031ant)
2024/2025 #43