9. Tüüritavad antennivõred

IEE2580 – Antennid ja raadiolevi

Kaalutud summa

- Mäletatavasti oli lineaarse ühtlase võre võretegur kujul

$$AF = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(n-1)\psi}$$

kus

$$\psi = kd\cos\theta + \beta$$

- Seoses külglehtede mahasurumisega tõime eelnevalt sisse kaalud w_n millega iga liidetav üllatoodud summas on läbi korrutatud:

$$AF = \sum_{n=1}^{N} w_n \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}(n-1)\psi}\,.$$

Kaalutud summa

- Kasutame astendamise kohta kehtivat seost $a^{x+y} = a^x \cdot a^y$ ja väljendame n-inda elemendi kaalu kujul $w_n = a_n e^{j(n-1)\beta}$.
- Kaalude amplituudid a_n määravad külglehtede mahasurumise ulatuse ja pealehe laiuse. Faasinihe β järjestikuste elementide vahel määrab aga **pealehe suuna**.
- Tuletame meelde, et kui $\beta = 0$ oli meil tegemist horisontaalkiirgusega antennivõrega (*broadside array*). Kui aga $\beta = \pm kd$ siis oli tegemist pikikiirgus-antennivõrega (*endfire*).
- Kui faasinihe jääb nende piiride vahele on võimalik pealehte elektrooniliselt suunata **mistahes suunas**.

Suunadiagrammi pealehe suund

- Mäletatavasti oli võreteguri avaldis

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)}.$$

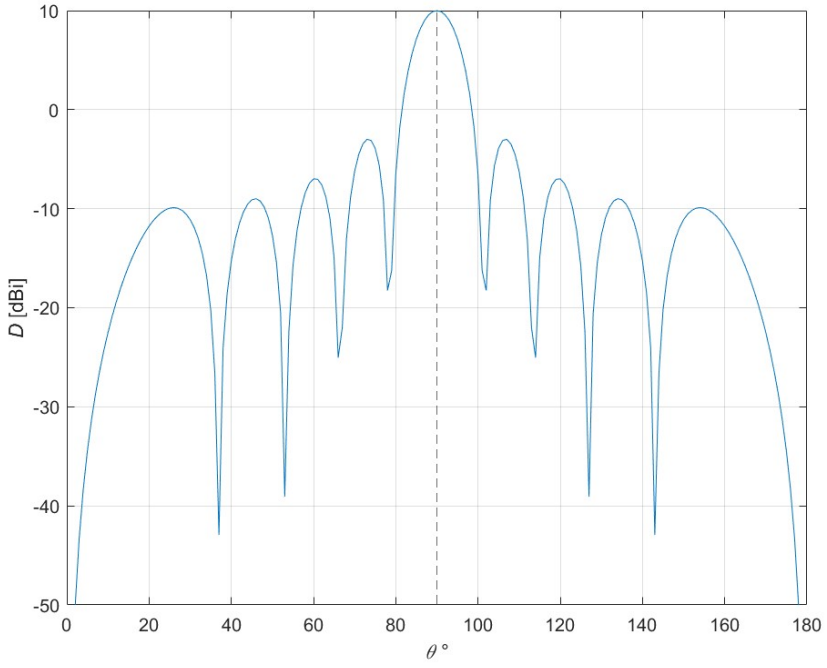
- Maksimum asub suunas kus lugejas oleva siinusfunktsiooni argument on võrdne nulliga ehk

$$\psi = kd\cos\theta + \beta = 0$$

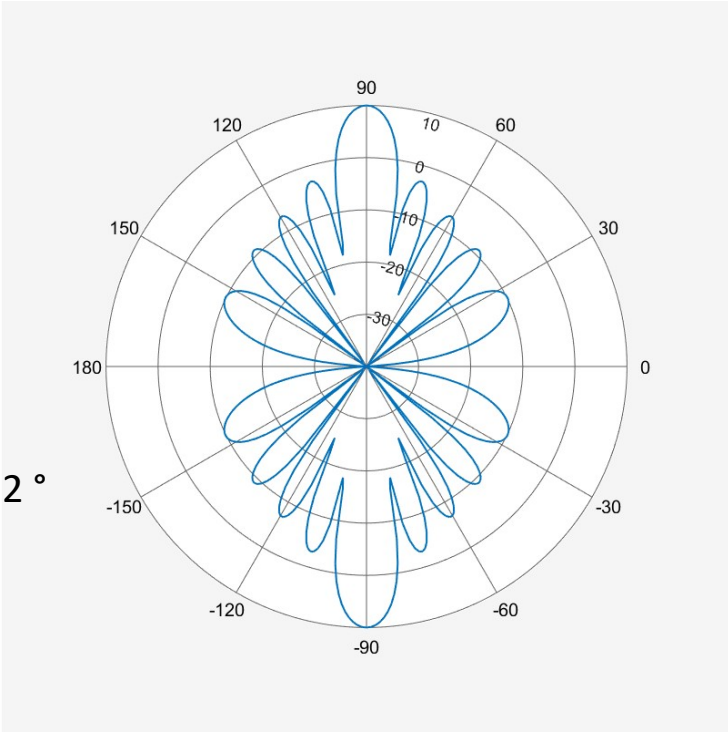
- Viimasest saame, et pealehe tüürimiseks suunda θ_0 peab faasinihe olema

$$\beta = -kd\cos\theta_0 .$$

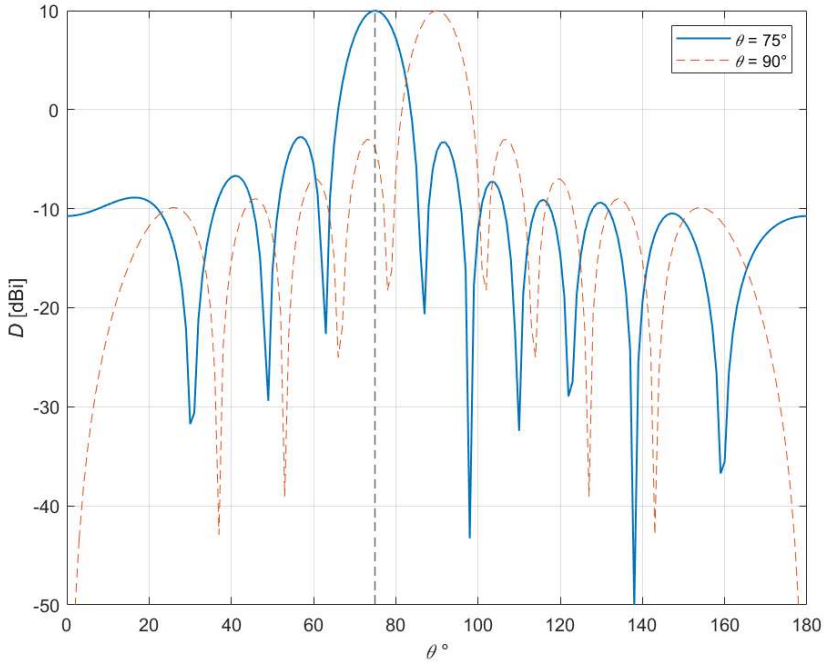
Näide – pealeht võre normaali sihis



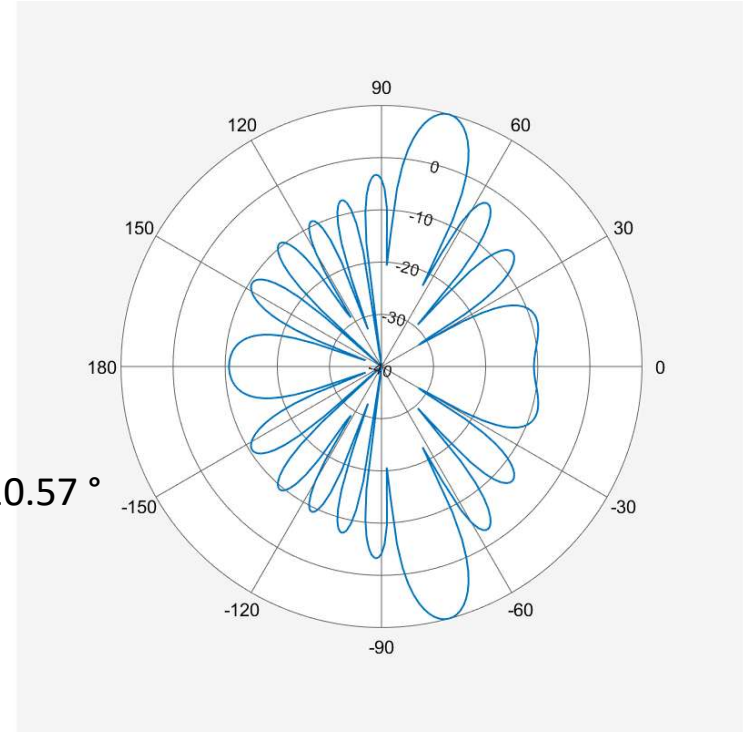
$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 0$
$\theta = 90°$
HPBW = 10,2 °



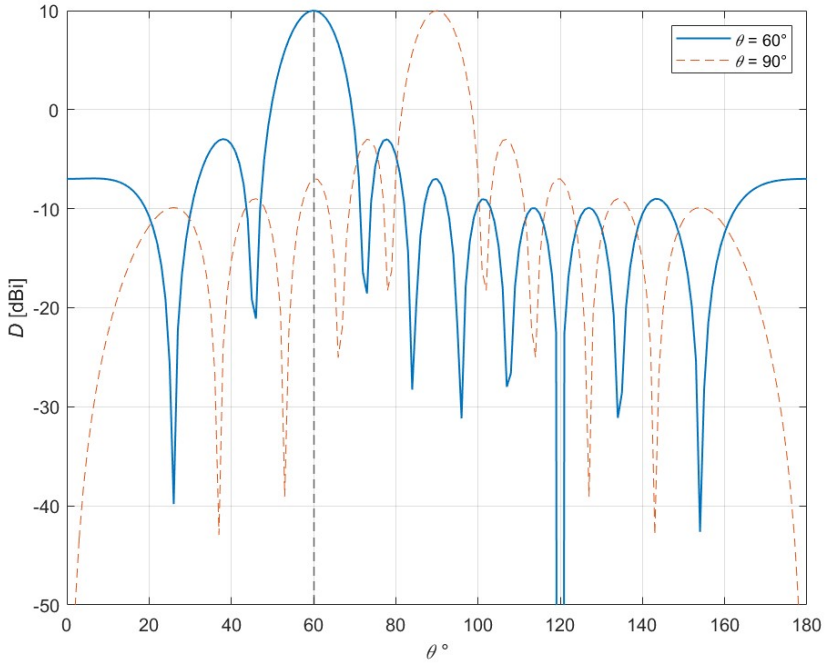
Kõrvalekalle 15°



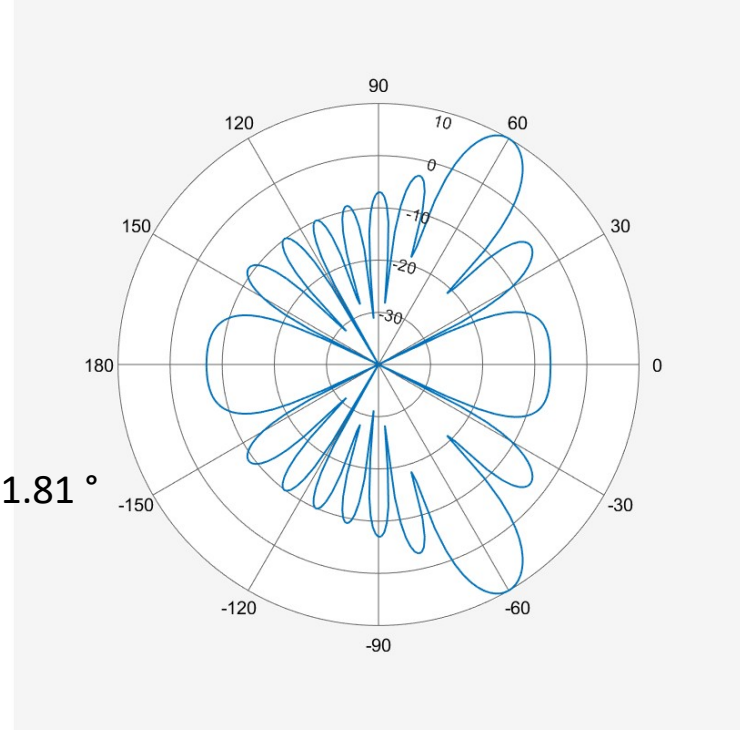
$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 0{,}835$
$\theta = 75°$
HPBW = 10.57 °



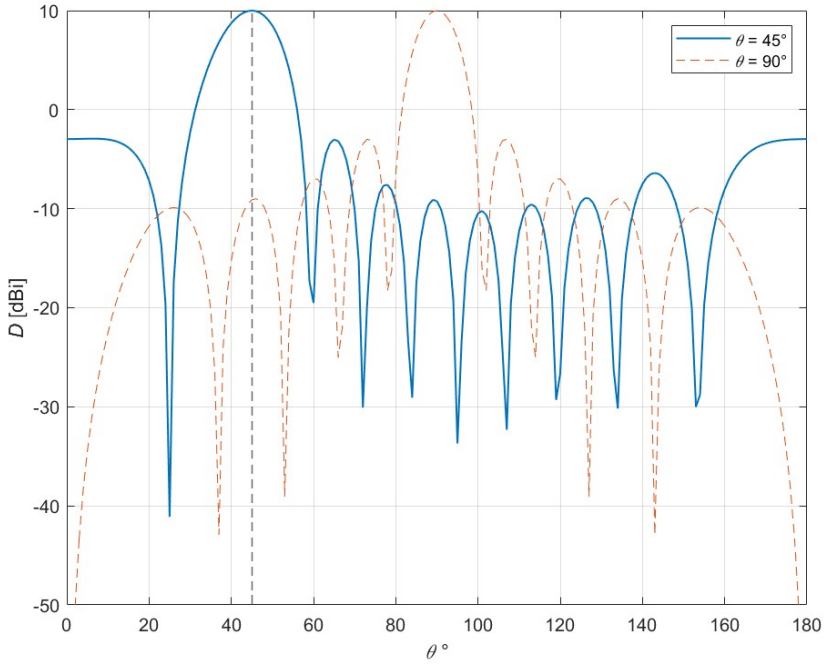
Kõrvalekalle 30°



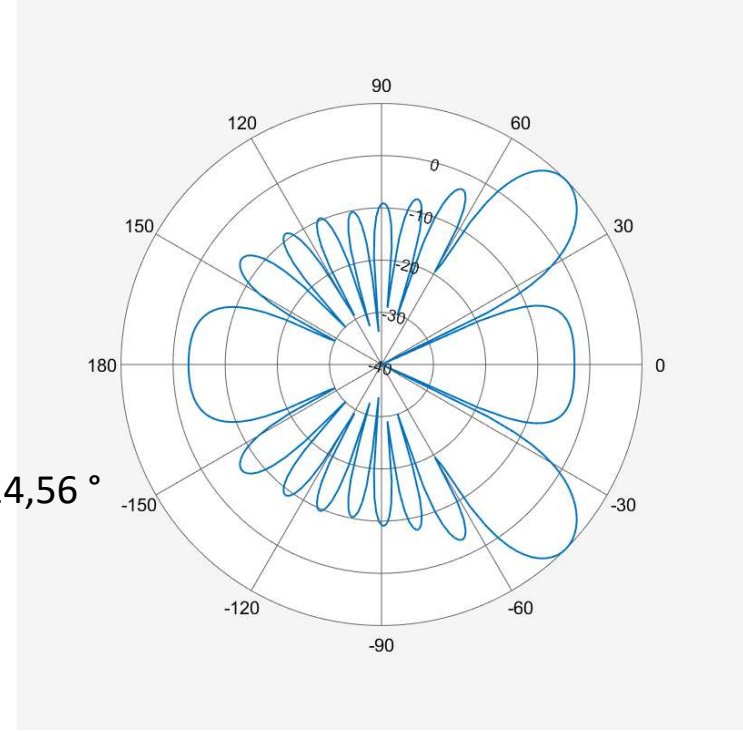
$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 1{,}571$
$\theta = 60°$
HPBW = 11.81 °



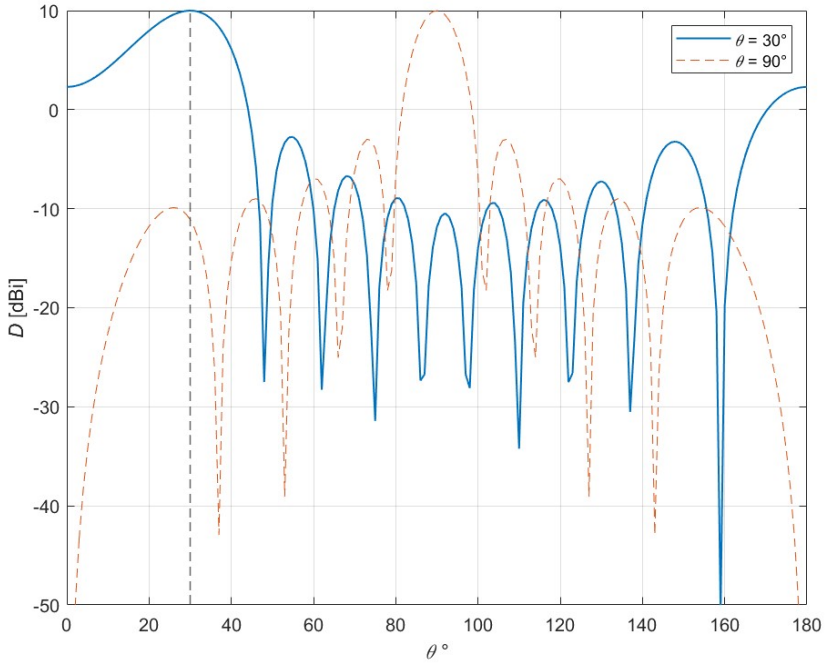
Kõrvalekalle 45°



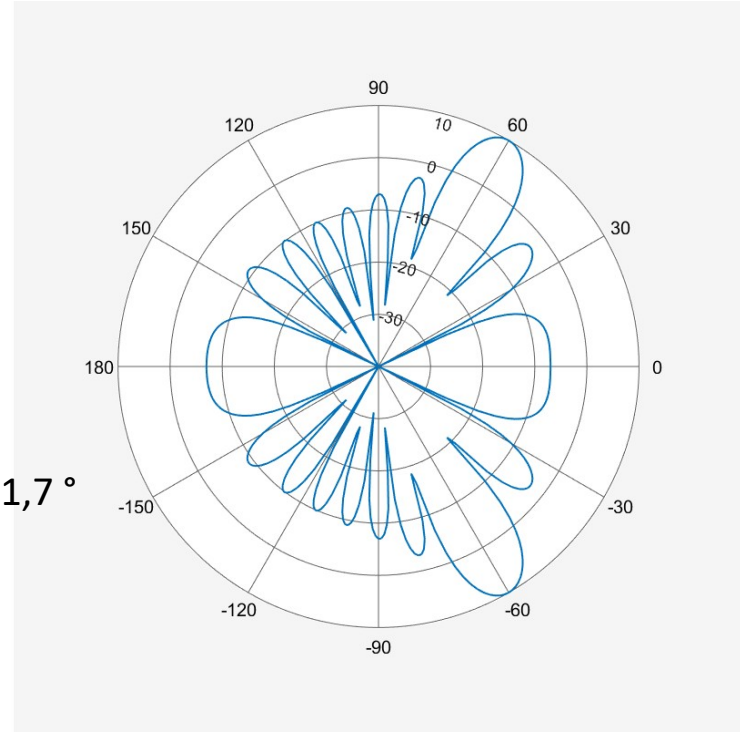
$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 2{,}221$
$\theta = 45°$
HPBW = 14,56 °



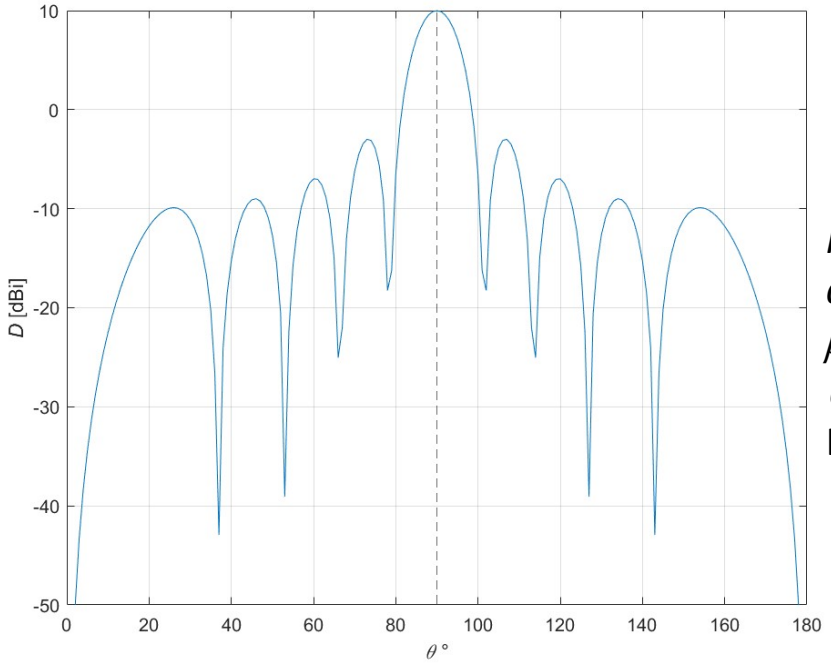
Kõrvalekalle 60°



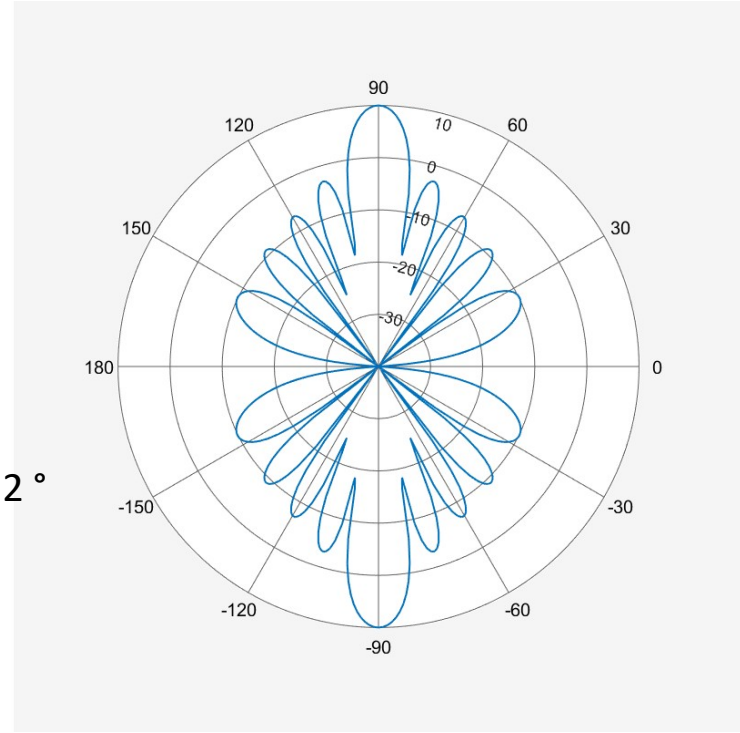
$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 2{,}721$
$\theta = 30°$
HPBW = 21,7 °



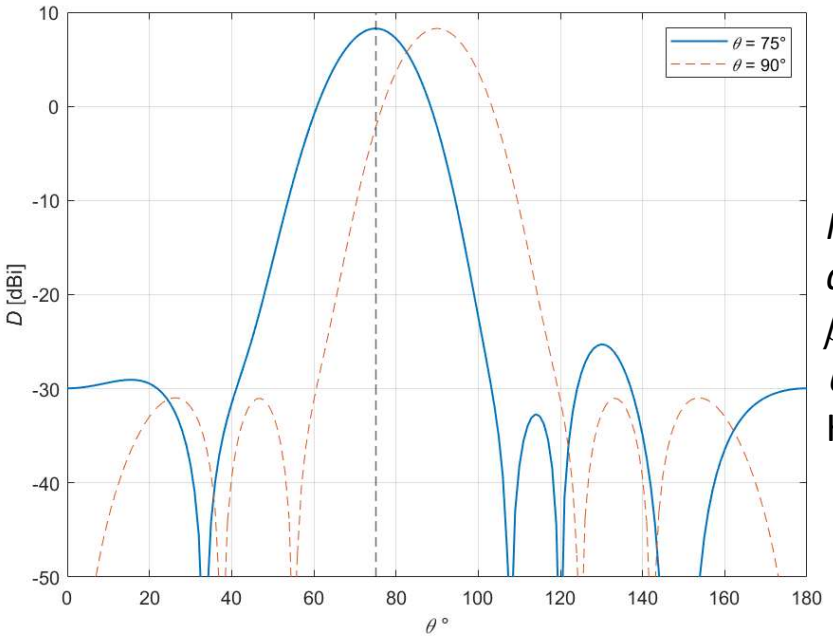
Näide – Taylori koondetegur (*taper*)



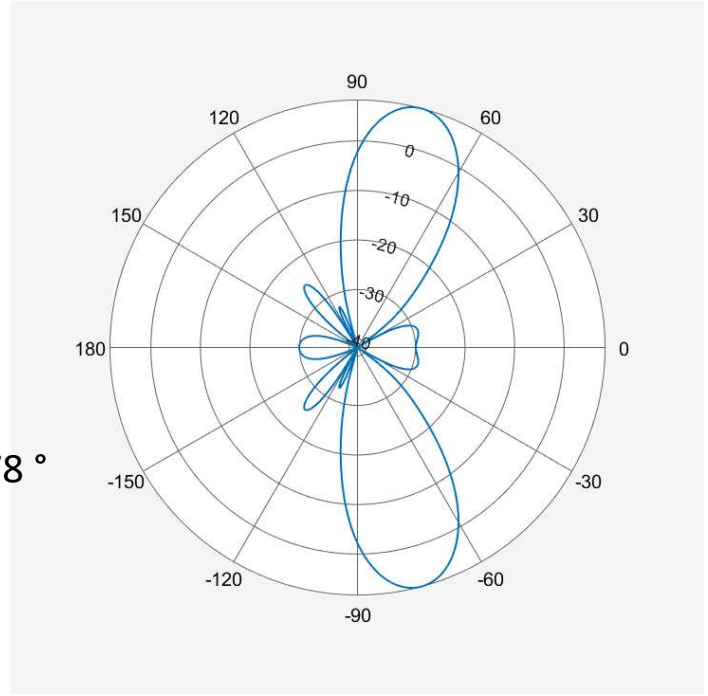
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 0
θ = 90°
HPBW = 16,2 °



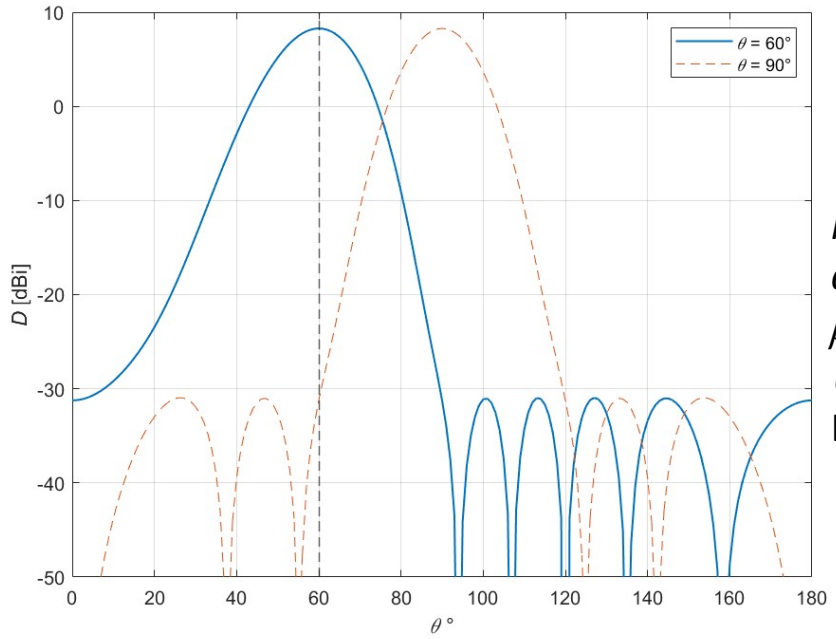
Kõrvalekalle 15°



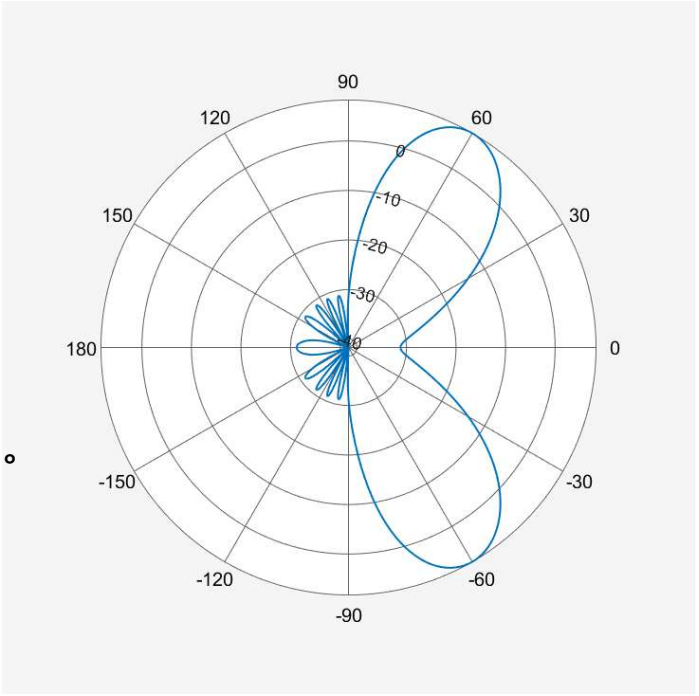
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 0,835
θ = 75°
HPBW = 16,78 °



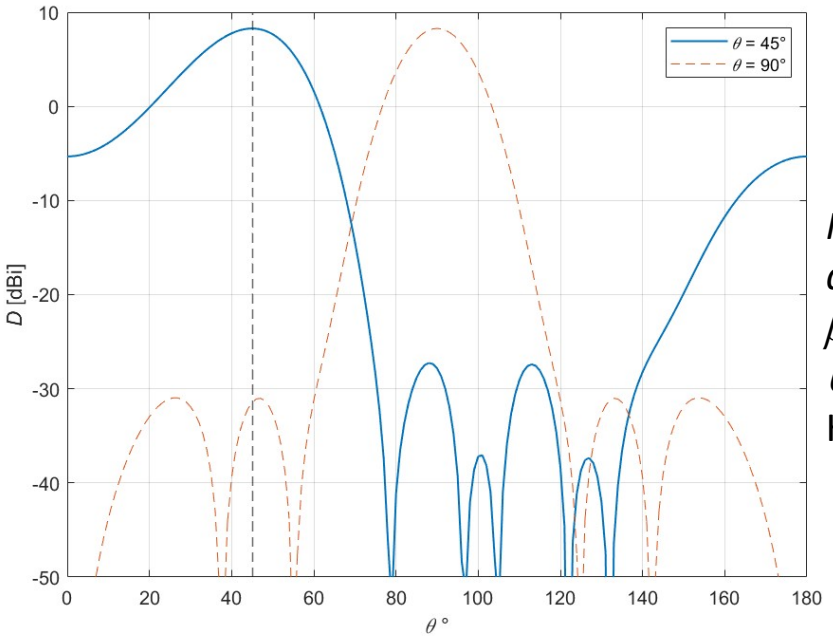
Kõrvalekalle 30°



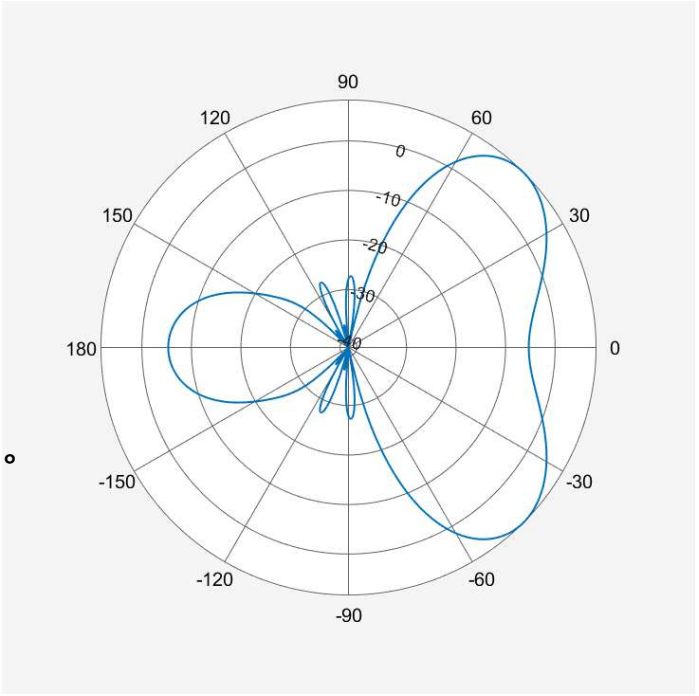
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 1,571
θ = 60°
HPBW = 18,8 °



Kõrvalekalle 45°

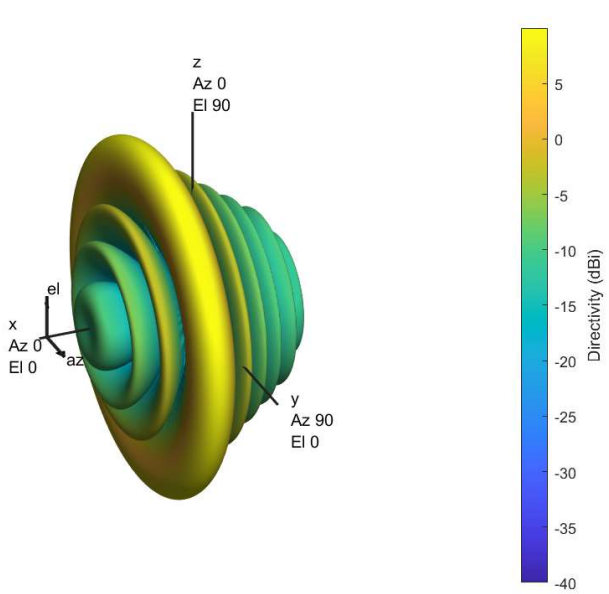


N = 10
$d = \lambda/2$
β = 2,221
θ = 45°
HPBW = 23,5 °

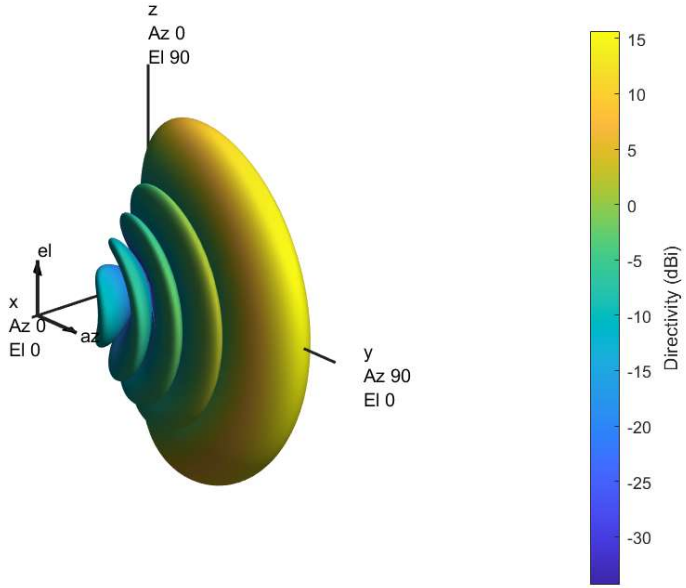


Võreelemendi mõju suunadiagrammile

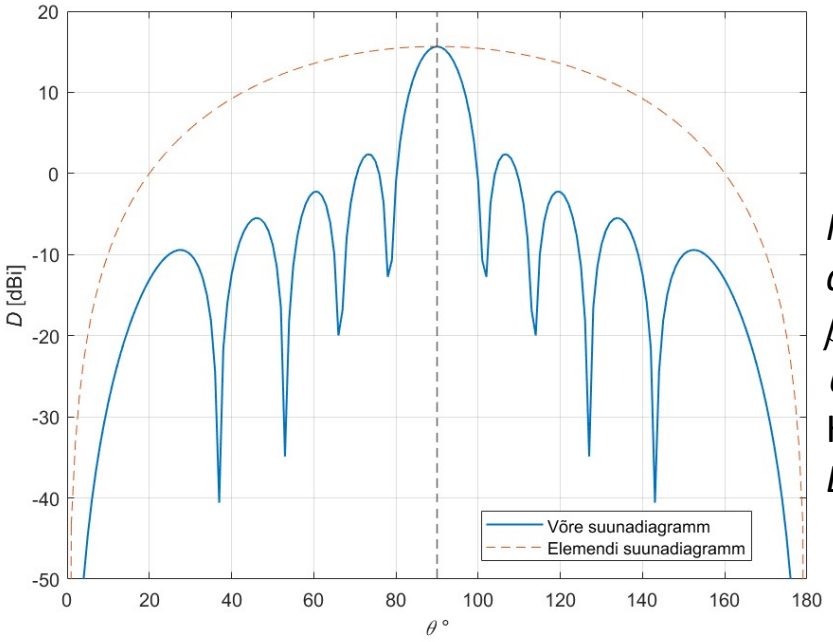
Isotroopsed kiirgurid



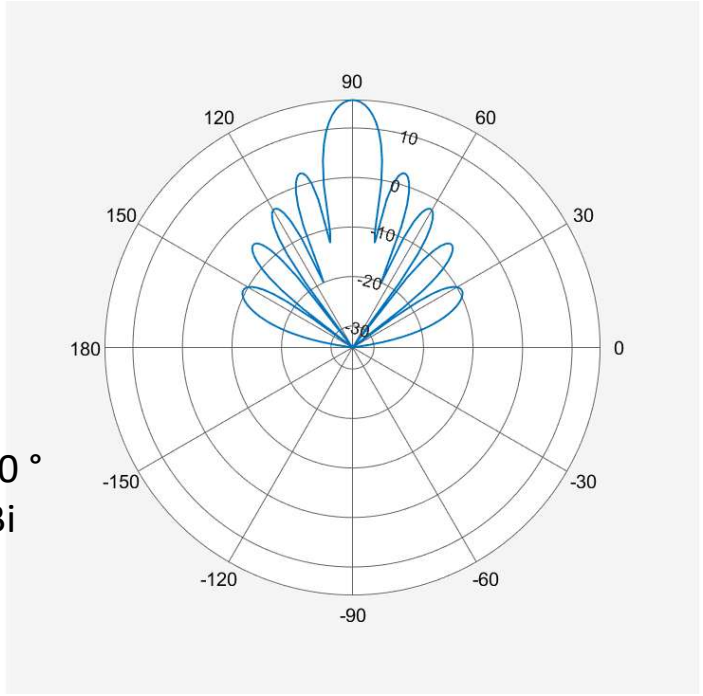
Koosinusantenn



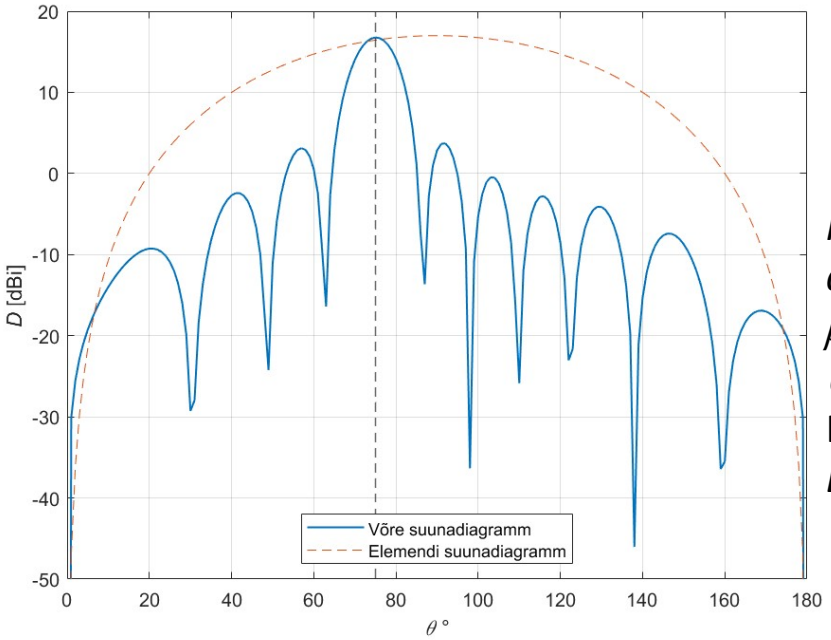
Näide – koosinusantenn võreelemendiks



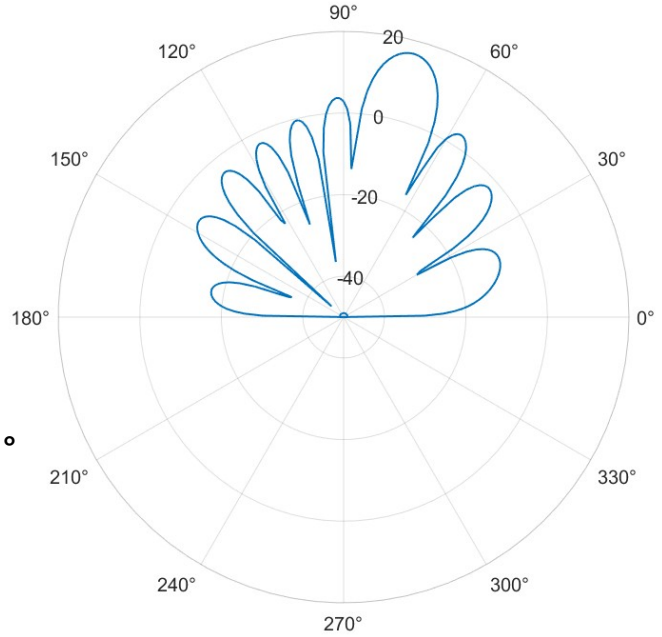
$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 0$
$\theta = 90°$
HPBW = 10,20 °
D_0 = 16,99 dBi



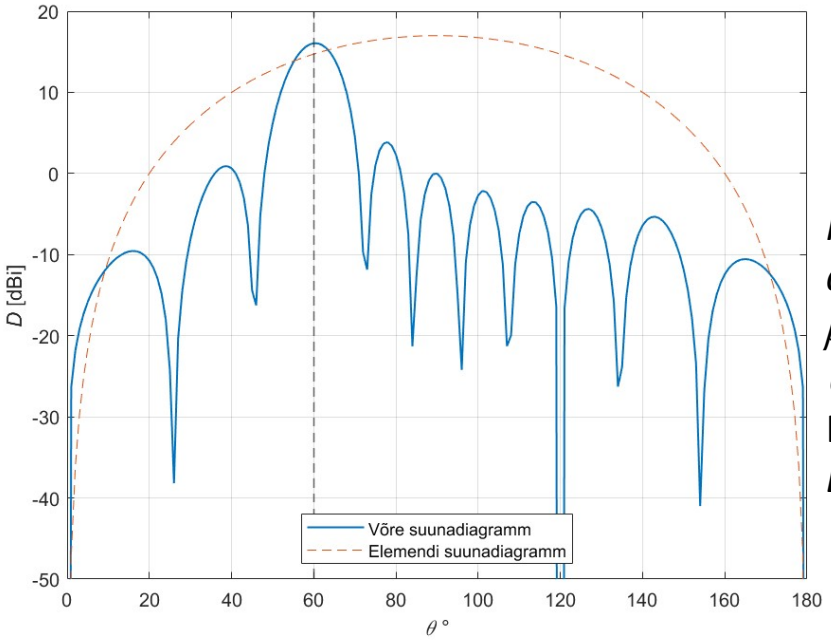
Kõrvalekalle 15°



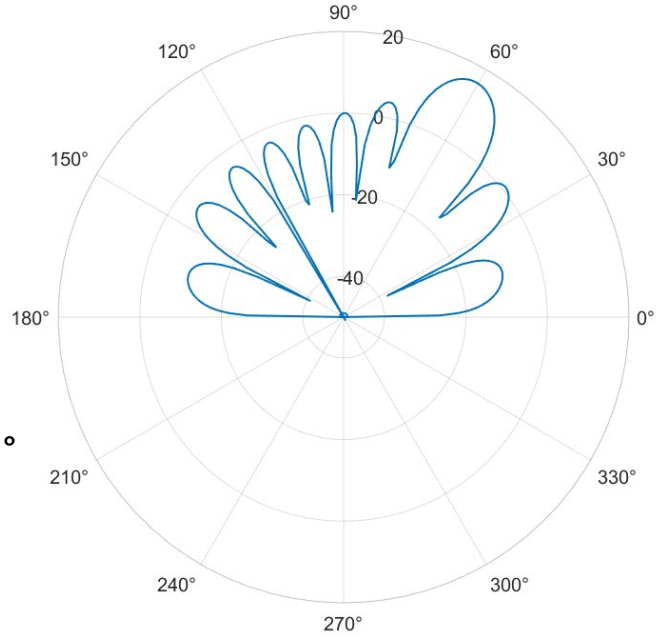
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 0,835
θ = 75°
HPBW = 10,57 °
D_0 = 16,76 dBi



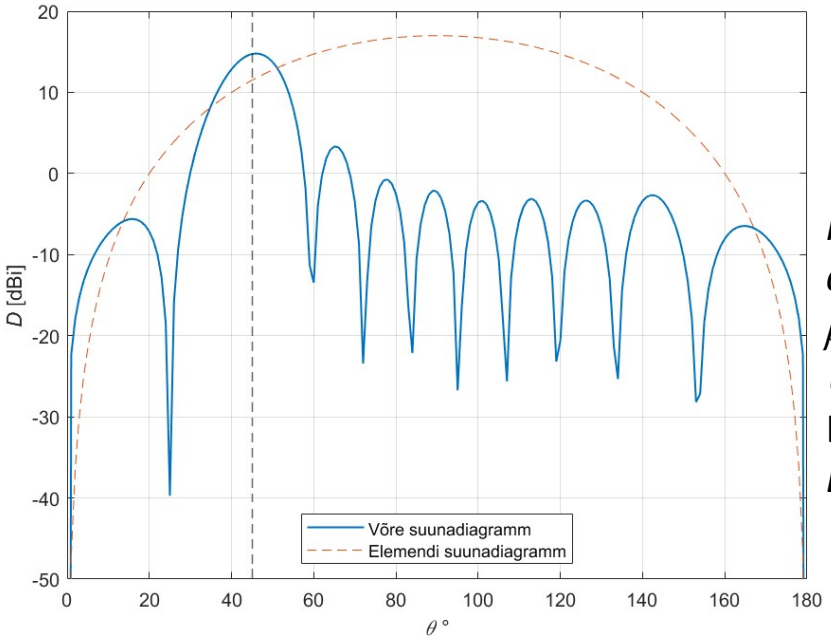
Kõrvalekalle 30°



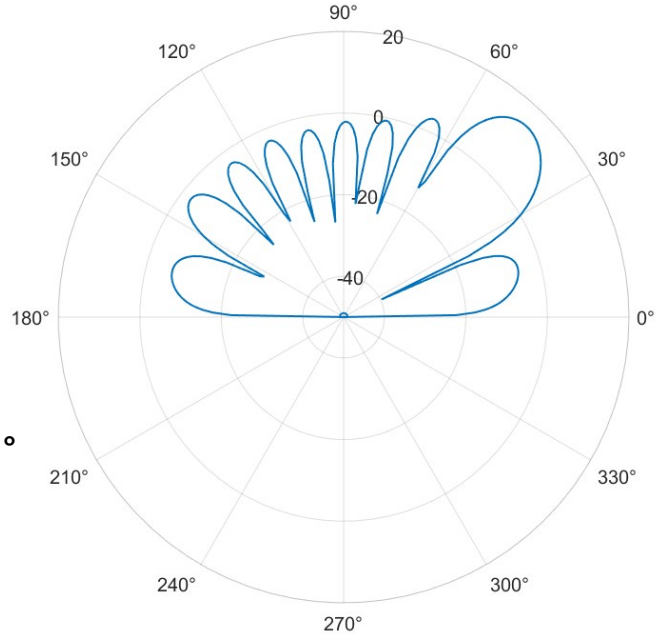
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 1,571
θ = 60°
HPBW = 11,81 °
D_0 = 16,05 dBi



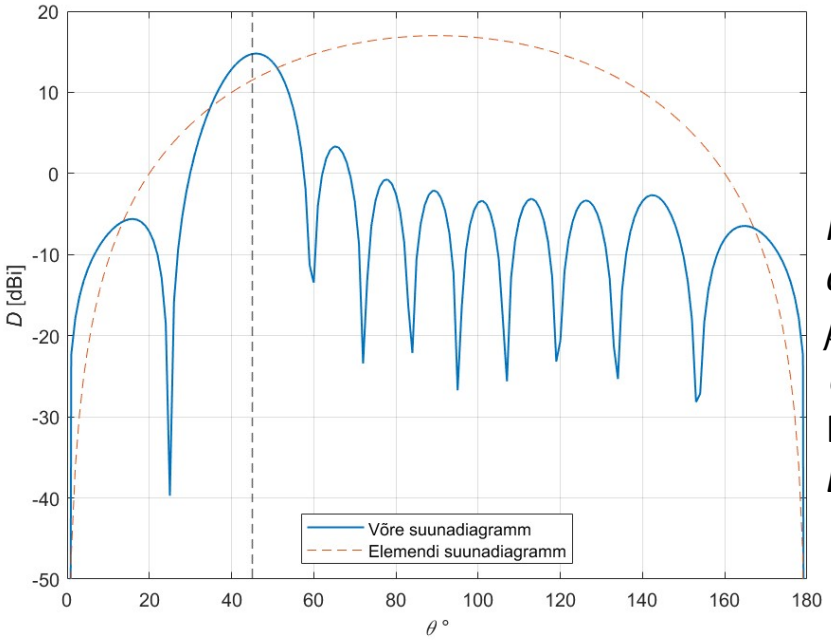
Kõrvalekalle 45°



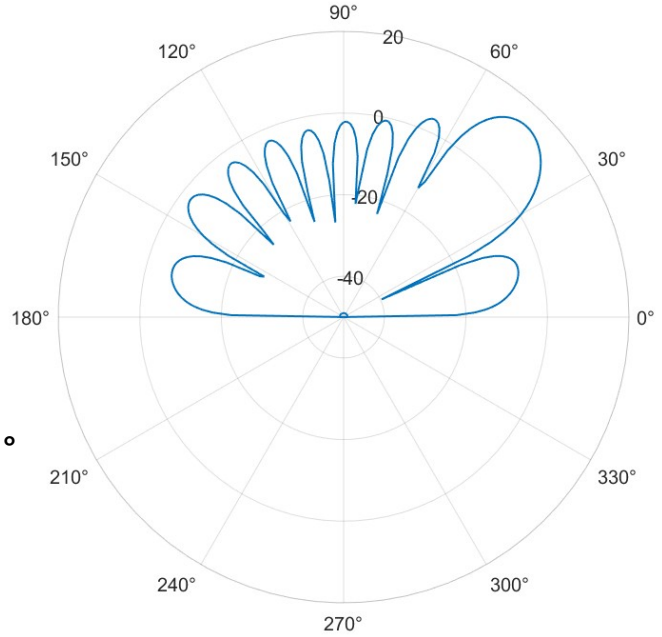
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 2,221
θ = 45°
HPBW = 14,56 °
D_0 = 14,79 dBi



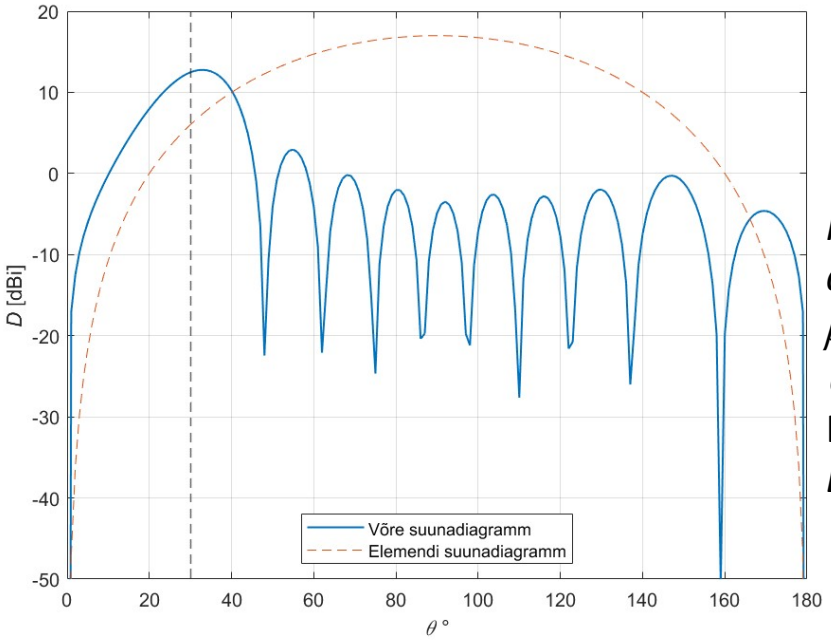
Kõrvalekalle 45°



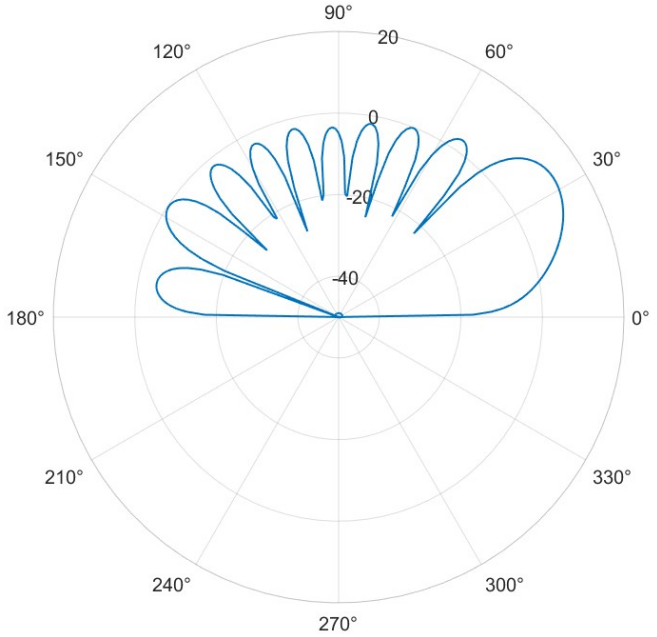
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 2,221
θ = 45°
HPBW = 14,56 °
D_0 = 14,79 dBi



Kõrvalekalle 60°



N = 10
$d = \lambda/2$
β = 2,721
θ = 30°
HPBW = 21,7 °
D_0 = 12,77dBi



Suunadiagrammi formeerimine

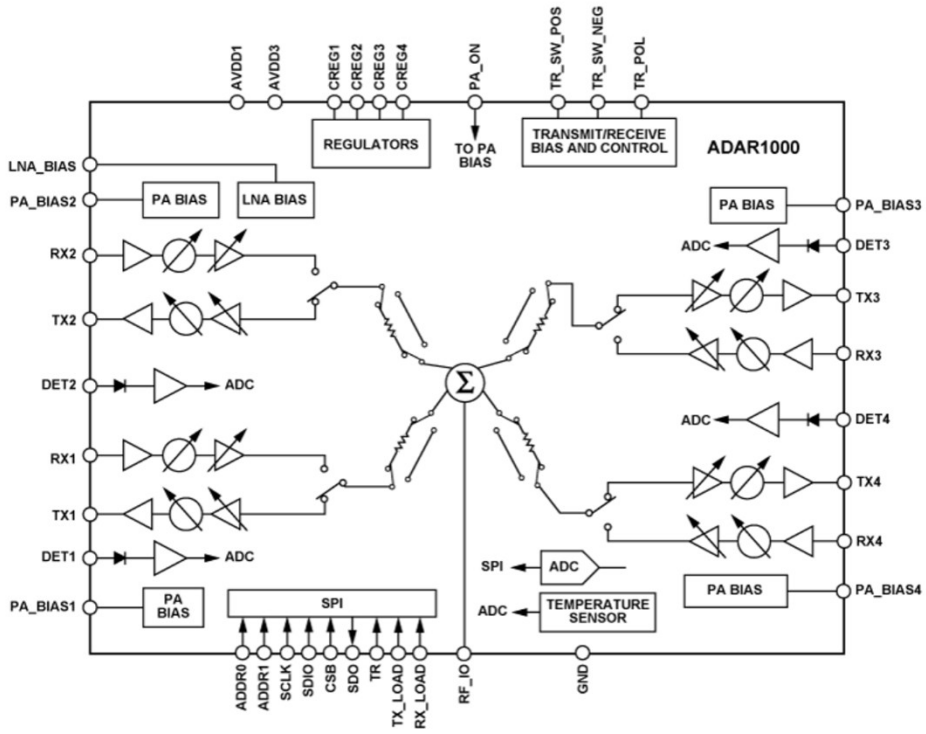
- Suunadiagrammi saab formeerida analoogtehnikas. Kasutades muudetava faasinihkega ahelaid ja atenuaatoreid. Odavam ja lihtsam lahendus. Saab formeerida samaaegselt ainult ühe suunadiagrammi.
- Iga elemendi jaoks oma digitaal-analoogmuundur ja võimendi. Suunadiagrammi formeerimine täisdigitaalselt. Maksimaalne paindlikkus, samaaegselt mitme diagrammi formeerimine kuid kallim ja energiakulukam.
- Hübriidversioon – analoog- ja digitaallahenduste kombineerimine.

Faasinihke tekitamine

- Ümberlülitavate ülekandeliinidega lahendus.
  - Faasinihe muudetav astmeliselt. Lihtne ehitus kuid kaod kasvavad võrdeliselt astmete arvuga.
- Tüüritava reaktiivelemendiga koormatud ülekandeliin.
  - Sujuvalt muudetav faasinihe.
- Peegeldustüüpi faasinihkeahel hübriidsilla ja tüüritavate reaktiivkoormustega.
  - Sujuvalt muudetav faasinihe.
- Vektormodulaator
  - Keeruline ehitus.

Näide – Analog Devices ADAR1000

- Sagedusvahemik 8 – 16 GHz.
- Faasinihe 360° sammuga 2,8°.
- Ülekanne muudetav 31 dB ulatuses 0,5 dB sammuga.



Joonis: https://www.analog.com/en/products/adar1000.html



Mitteühtlane tasapinnaline võre - interferomeeter

Foto: http://www.aoc.nrao.edu/epo/puente/views/vlaviews.index.html

Apertuuri nurklahutusvõime

- Apertuuri, nagu paraboolantenn, teleskoobi- või binokli lääts jms, **nurklahutusvõime** (*angular resolution*) on (Rayleigh' kriteerium)

$$\Delta\theta \approx 1{,}22\frac{\lambda}{D},$$

kus λ on vastuvõetava signaali lainepikkus ja D on apertuuri diameeter.

- Nurklahutusvõime on optilise seadme (nt teleskoobi, mikroskoobi või inimsilma) võime eristada kahte üksteisele väga lähedal asuvat punkti või objekti eraldiseisvatena. Kui seadme nurklahutusvõime on liiga madal, sulanduvad kaks punkti vaatleja jaoks üheks uduseks objektiks



Näide

- Tõravere 1,5 m reflektoriga AZT-12 teleskoop:
  - λ = 555 nm (roheline valgus)
  - $\Delta\theta \approx 4{,}5 \cdot 10^{-7}$ rad (0,1”)
- Arecibo 305 m raadioteleskoop:
  - λ = 3 cm
  - $\Delta\theta \approx 1{,}2 \cdot 10^{-4}$ rad (30”)

Foto: https://tartu.postimees.ee/8113316/toravere-suurel-teleskoobil-taitub-pool-sajandit-tahevaatlust

Raadiointerferomeeter

- **Raadiointerferomeetriks** nimetatakse sellist võret mille elementide vahekaugus on palju suurem lainepikkusest.
- Sellise süsteemi nurklahutusvõime on määratud antennide vahekaugusega *B*

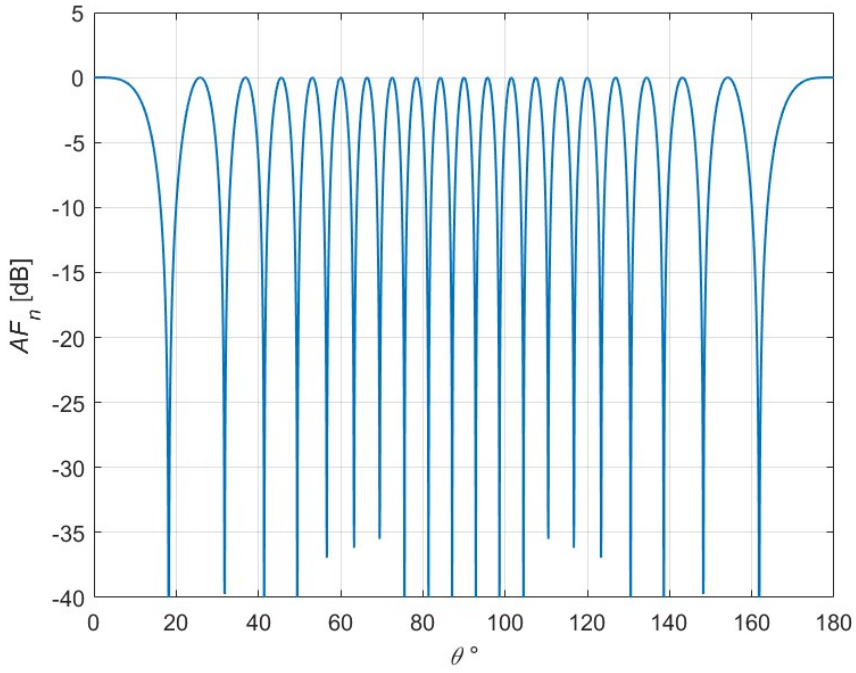
$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{B},$$

- λ = 3 cm korral annab raadioteleskoopide vaheline kaugus 81,4 km sama suure nurk-lahutusvõime kui on Tõravere observatooriumi reflektoril rohelise valguse korral.

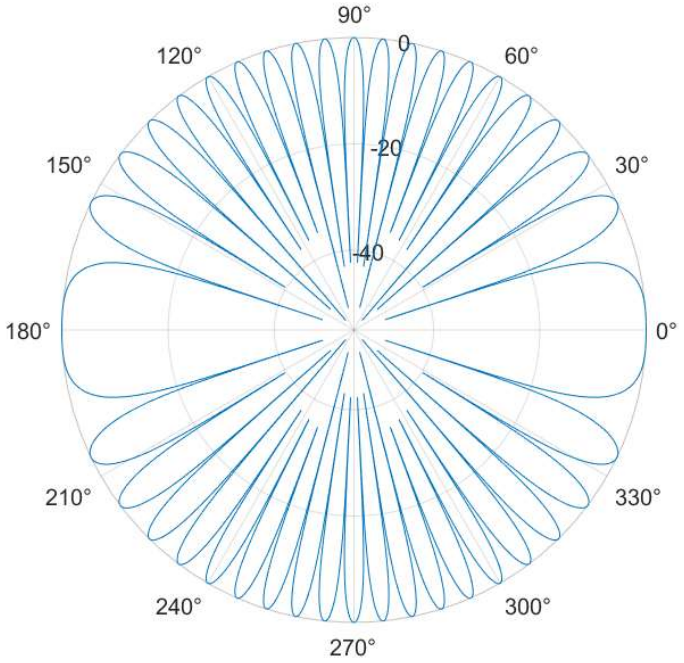


Foto: http://radio-astronomy.org/node/36

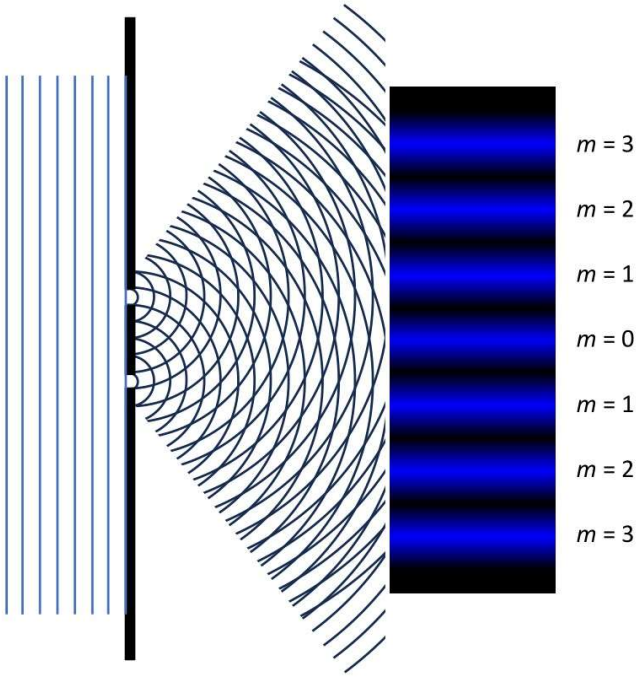
Raadiointerferomeeteri võretegur



$N = 2$
$d = 10\lambda$
$\beta = 0$
$\theta = 90°$



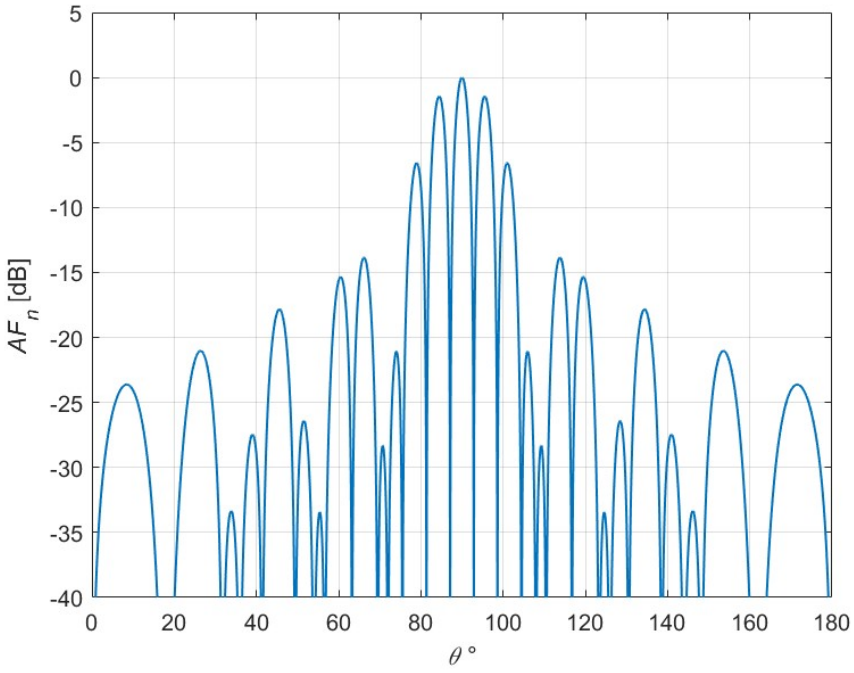
Interferentsipilt



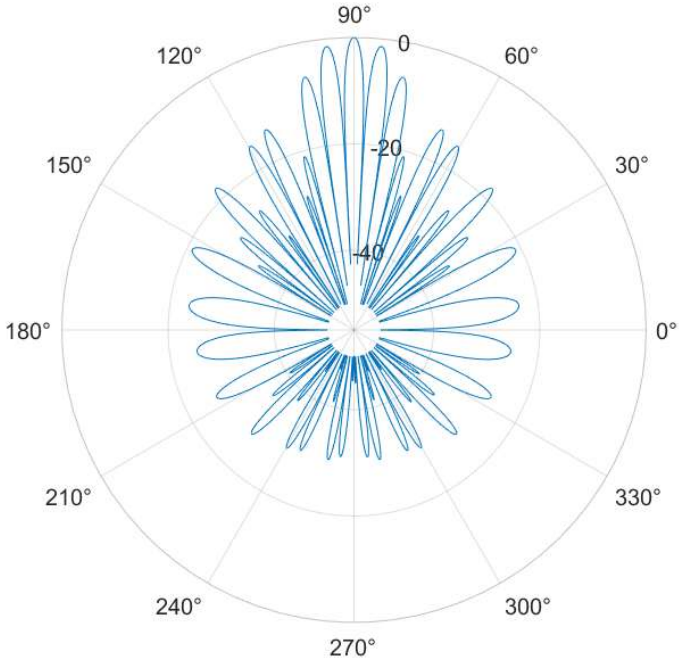
- Kaks koherentse kiirguse allikat tekitavad vahelduva interferentsipildi.
- Kahe vastuvõtuantenni suunadiagramm on interferentsipildi kujuline – näeme interferentsipildi poolt valgustatud alasid.
- Üle vaatevälja liikuv allikas moduleerib vastuvõetava signaali tugevust sõltuvalt oma asukohast.

Joonis: https://lipa.physics.oregonstate.edu/sec_two-slit-interference.html

Antenni suunateguri mõju

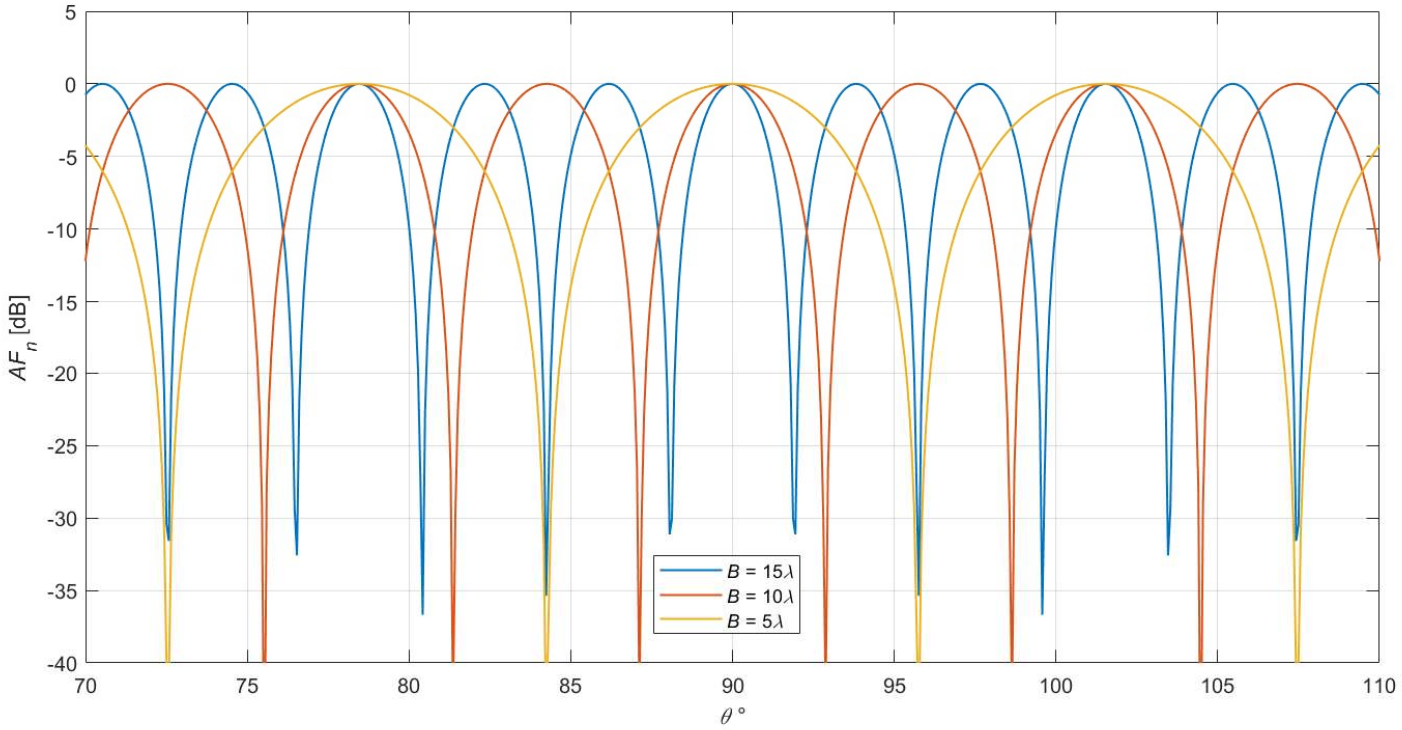


$N = 2$
$d = 10\lambda$
$\beta = 0$
$\theta = 90°$



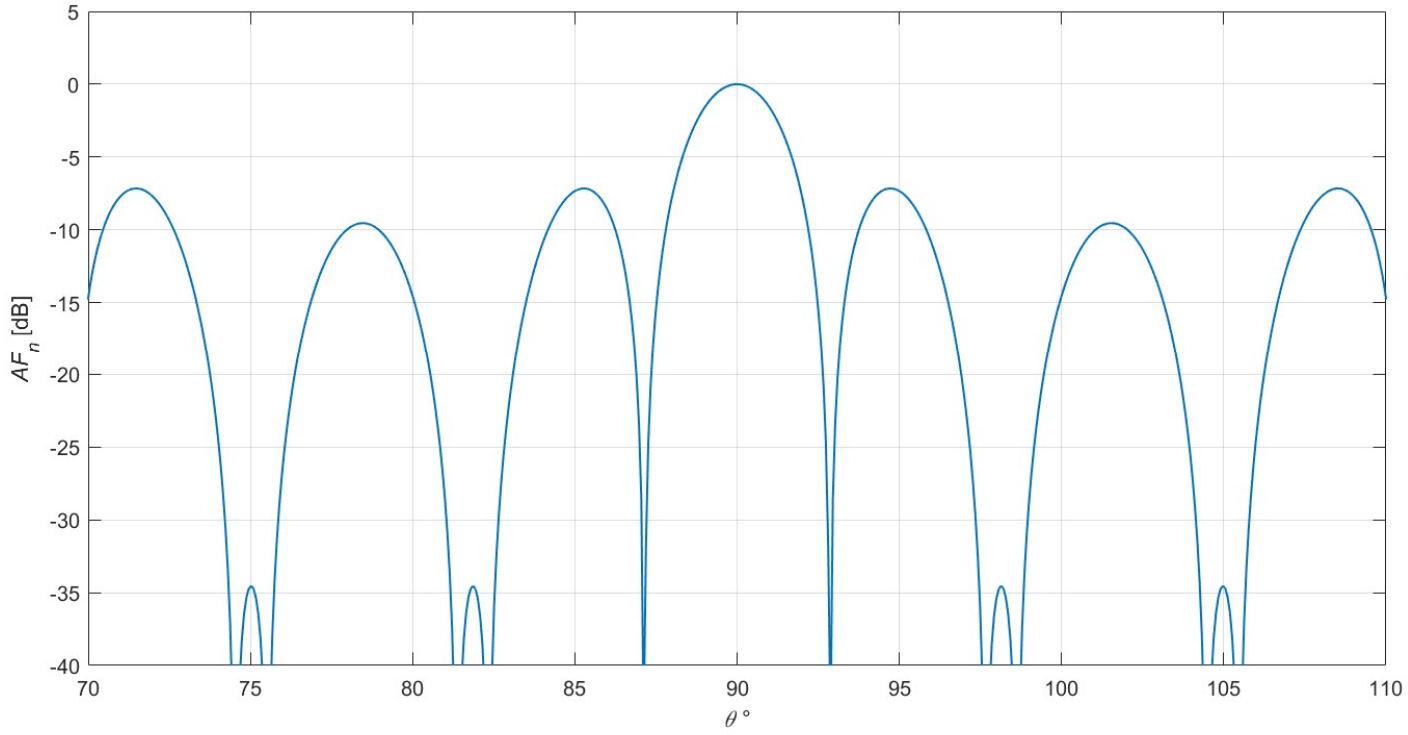
Interferentsipilt

- Interferentsimustri samm sõltub antennide vahekaugusest *B.*
- Kui kasutame korraga rohkem kui kahte antenni on võimalik moodustada erineva pikkusega *B* **baasjooned** (*baseline*).



Interferentsipilt

- Üks antennipaar moodustab ühe baasjoone.
- Kasutades *N* antenni on võimalik saada kuni *N*(*N*-1) erineva pikkusega baasjoont.



Van Cittert–Zernike teoreem

- Seob omavahel allika heleduse jaotust ühel tasandil selle mõjul tekkiva interferentsipildiga teisel, kaugel tasandil.
- Raadioastronoomia korral on vastavalt tegemist **taeva heledusega** (*sky brightness*) $T(l, m)$ ja kompleks nähtavusega $V(u, v)$ baasjoonte tasandil.
- Taeva heleduse koordinaadid l ja m on suunakoosinused (*direction cosine*).
- Kompleksnähtavuse koordinaadid u ja v on vastavalt baasjoone pikkuse projektsioonid ida- lääne ja põhja-lõuna sihis. Mõõtühikuks on lainepikkus λ.

Van Cittert–Zernike teoreem

- Kaks funktsiooni on omavahel seotud (teatud tingimustel) Fourieri teisendusega:

$$V(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} T(l,m)e^{2\pi j(ul+v\ \ )}dldm\,,$$

$$T(l,m) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} V(u,v)e^{-2\pi j(ul+v\ \ )}dudv\,.$$

- Iga punkt *V*(*u*, *v*) tasandil sisaldab endas informatsiooni kogu T(*l*, *m*) kohta.

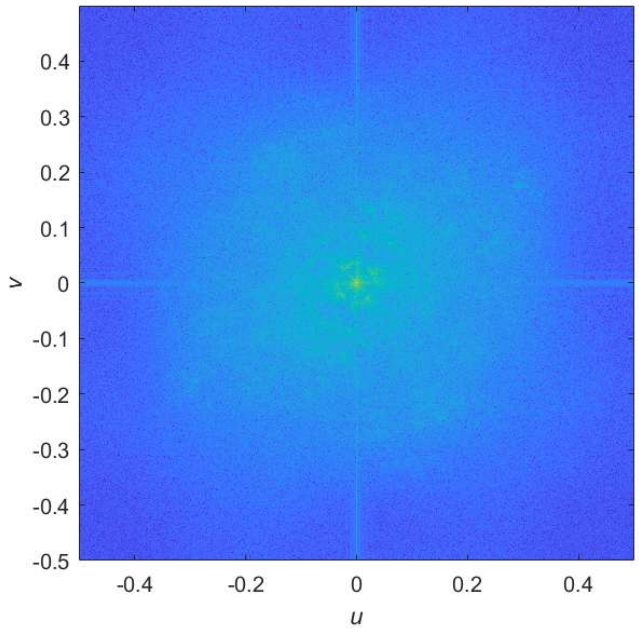
Näide



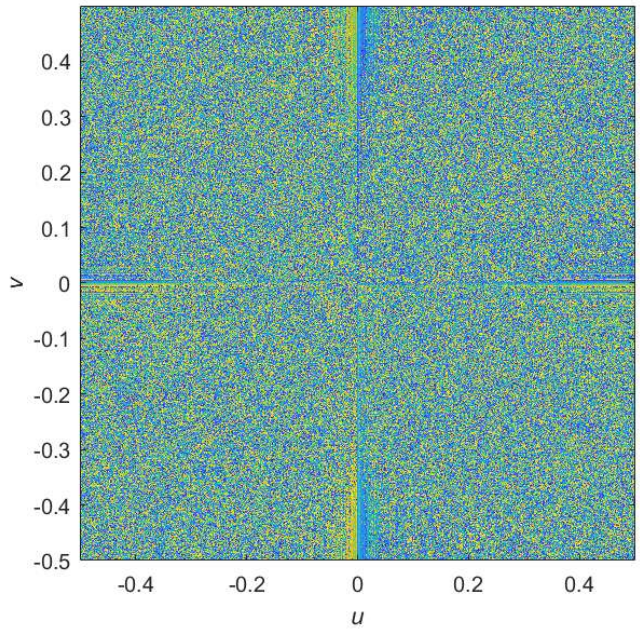
$T(l, m)$

Näide

V(*u*, *v*) moodul



V(*u*, *v*) faas



uv – tasandi täitmine

- Iga paar antenne võimaldab mõõta *uv* tasandil **kahte** punkti moodulitega *B* ja –*B*.
- Konkreetse *u* ja *v* komponendi väärtused sõltuvad paari orientatsioonist koordinaatsüsteemi suhtes.
- Mida rohkem paare seda rohkem punkte tasandil saab mõõdetud.
- Sama vahemaa ja orientatsiooniga paarid ei anna meile midagi lisaks.
- Lähestikused antennid võimaldavad näha suuri objekte.
- Suured vahemaad võimaldavad näha detaile.

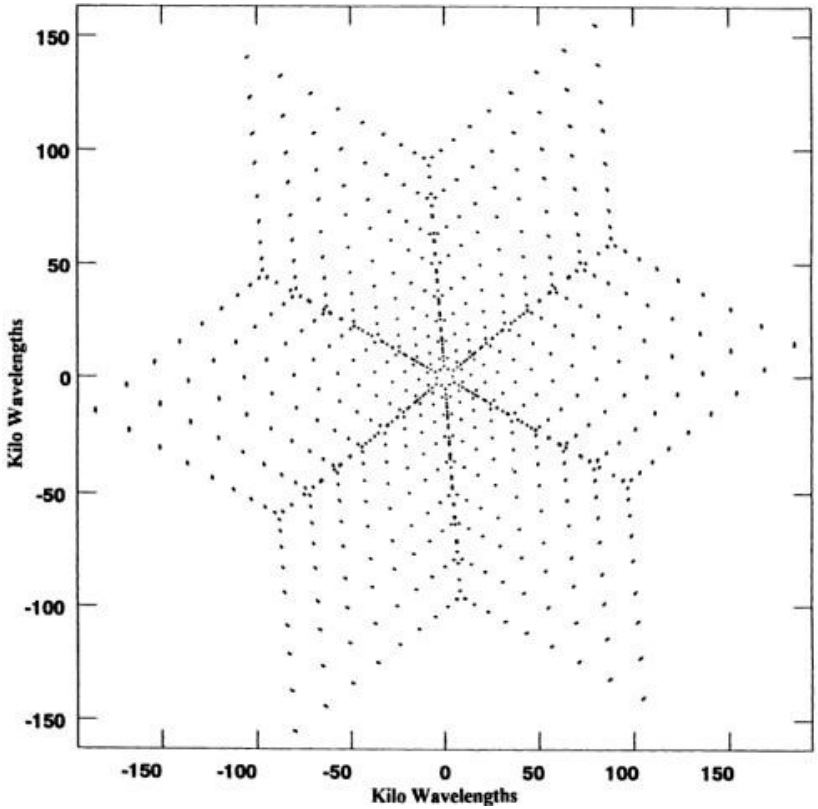
Resolutsioon ja katteala

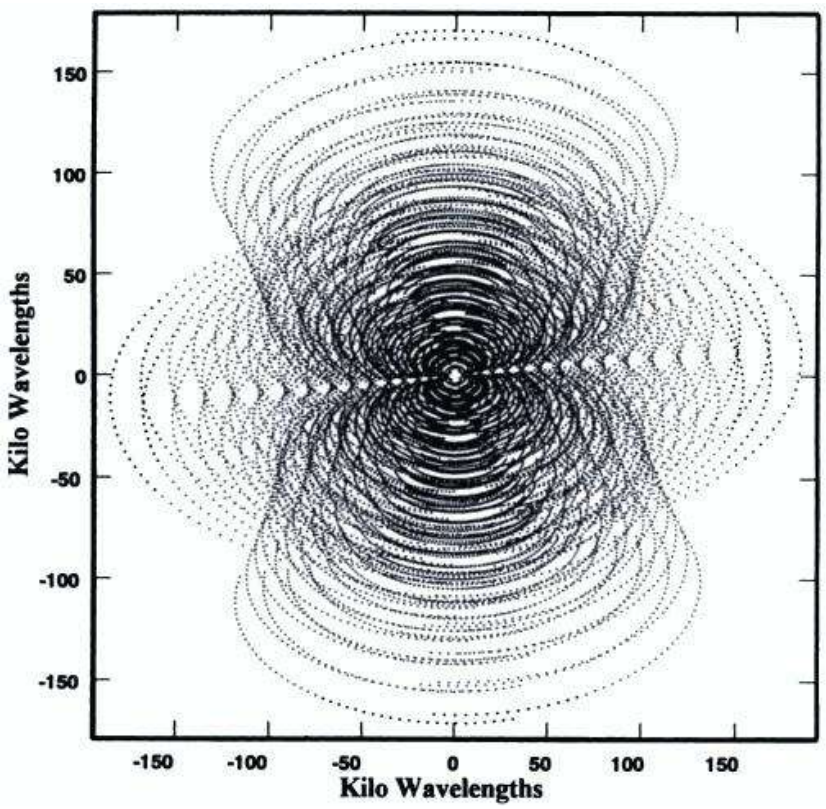
- Interferomeetrilise võre nurklahutusvõime on määratud maksimaalse antennide vahelise kaugusega

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{B_{max}}.$$

- Maksimaalne vaatenurk on omakorda määratud lüheima vahemaaga B_{min} kahe antenni vahel.
- Samaaegselt jälgitav vaateväli on aga määratud kasutatava antenni läbimõõduga ~λ/*D.*
- Antennide orientatsiooni saab muuta ja vaatevälja liigutada maksimaalse vaatenurga sees.

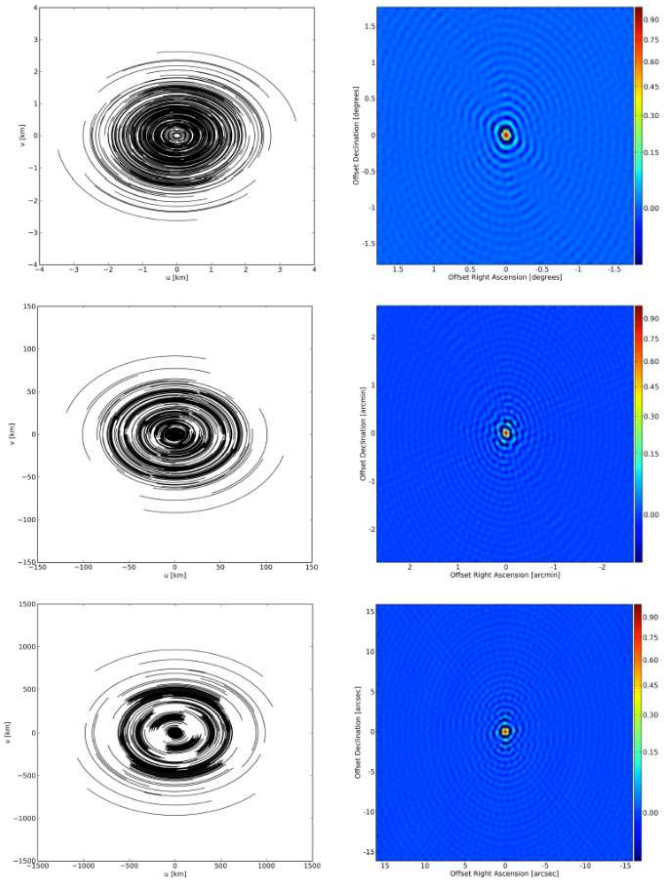
uv – tasandi täitmine

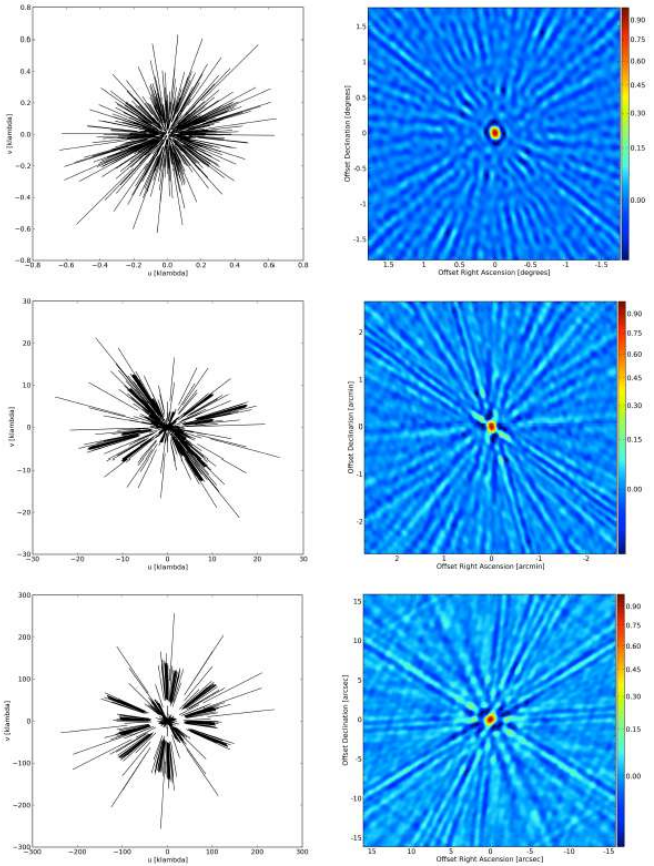




Joonised: B. F. Burke, Sir F. G.-Smith. An Introduction to Radio Astronomy, Cambridge University press.

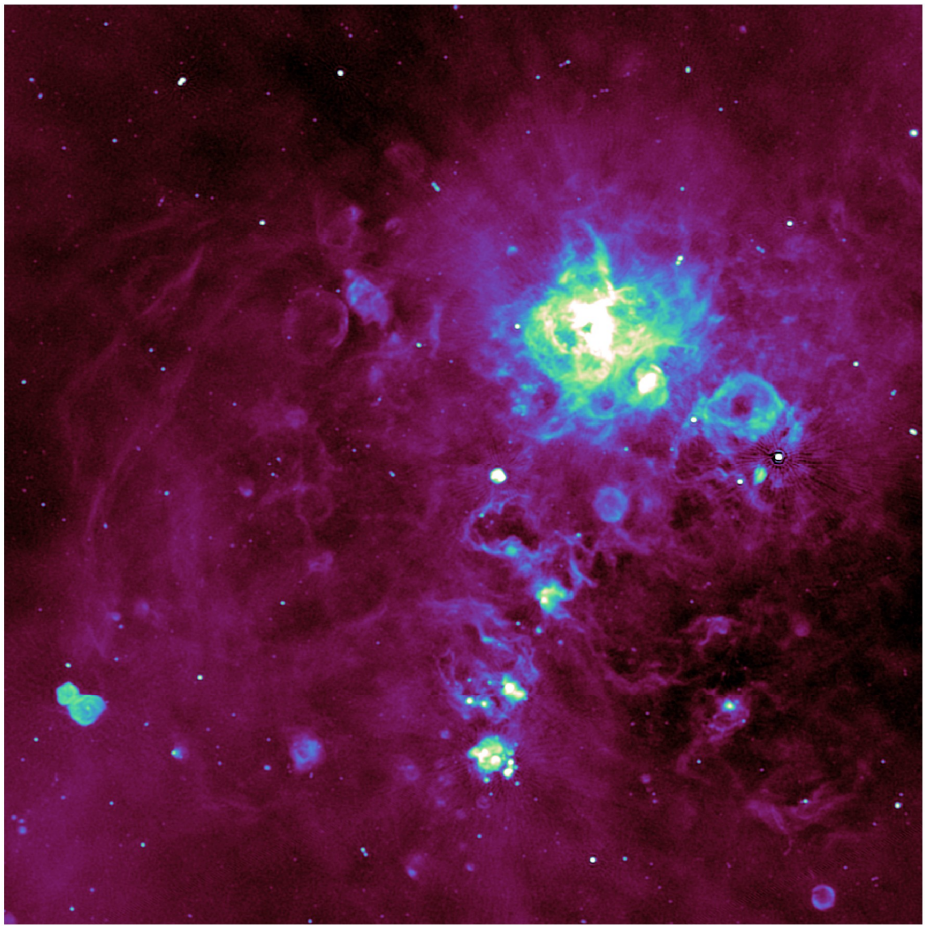
uv – tasandi täitmine





Joonised: http://www.astron.nl/

Suur Magellan’i pilv ASKAP raadioteleskoobiga





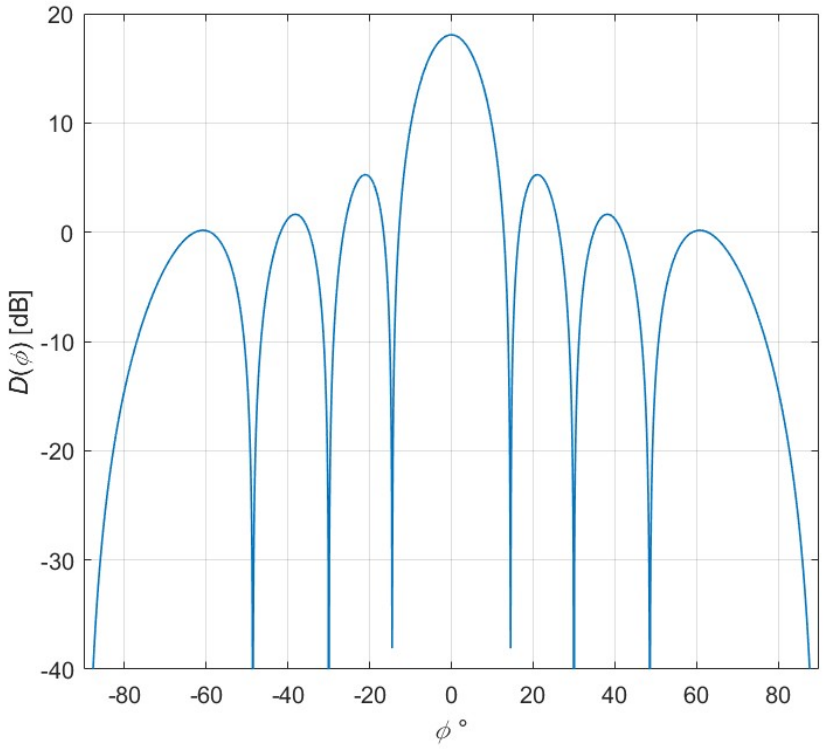
Joonised: https://www.csiro.au/



LOFAR – mitteühtlane tasapinnaline võre

Foto: http://www.astron.nl/

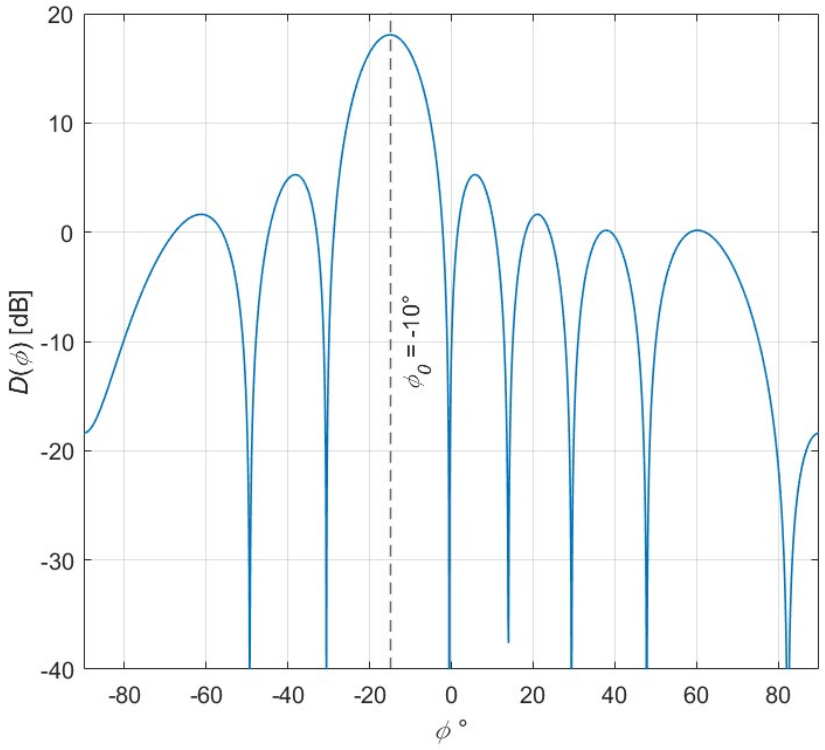
Mitme pealehe formeerimine



- Ühtlase lineaarse võre võretegur oli

$$AF = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd\sin\phi + \beta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd\sin\phi + \beta)\right]}.$$

Mitme pealehe formeerimine



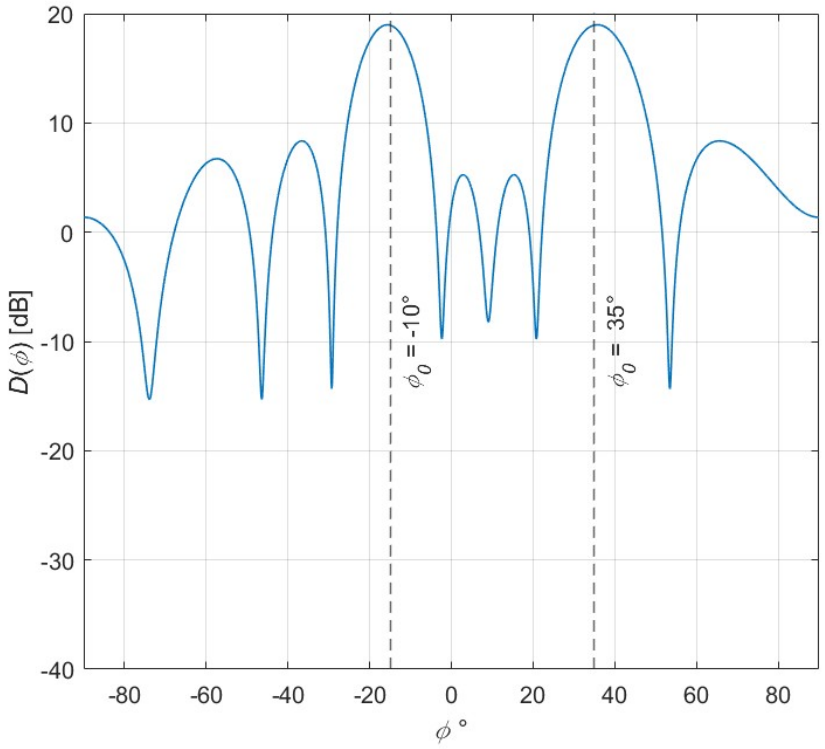
- Pealehe suunda oli võimalik valida kui seade järjestikuste võre-elementide vaheliseks faasinihkeks:

$$\beta = -kd \sin \phi_0 .$$

- Vastav tüürvektor on kujul

$$\mathbf{w}(\phi_0) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-\mathrm{j}\pi \sin \phi_0} \\ e^{-2\mathrm{j}\pi \sin \phi_0} \\ \dots \\ e^{-(N-1)\mathrm{j}\pi \sin \phi_0} \end{bmatrix}.$$

Mitme pealehe formeerimine

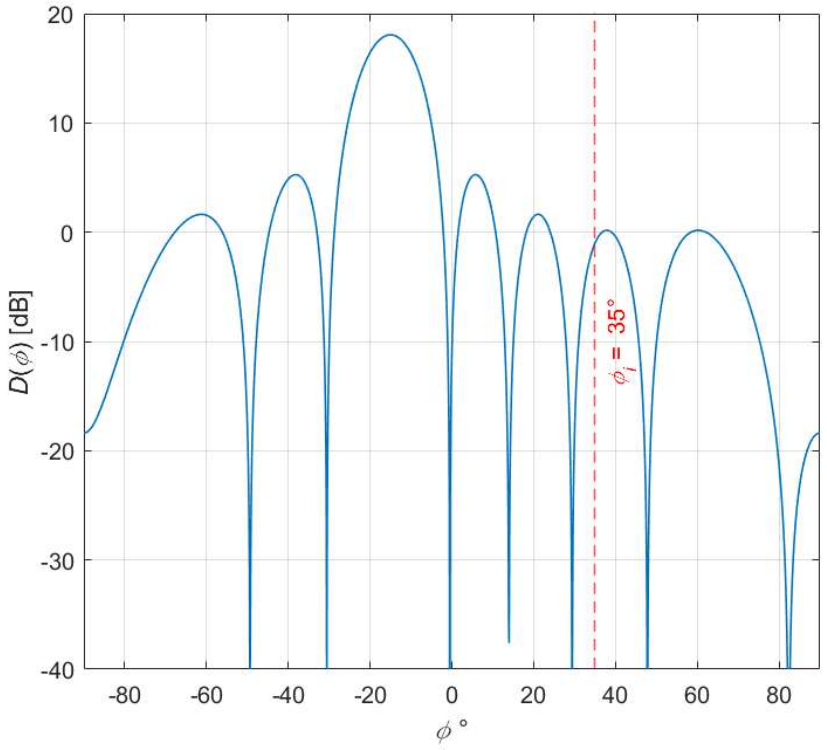


- Liites kokku kaks (või enam) tüürvektorit on võimalik formeerida samaaegselt võre pealeht mitmes suunas.
- Antud näites:

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}(-10°) + \mathbf{w}(35°).$$

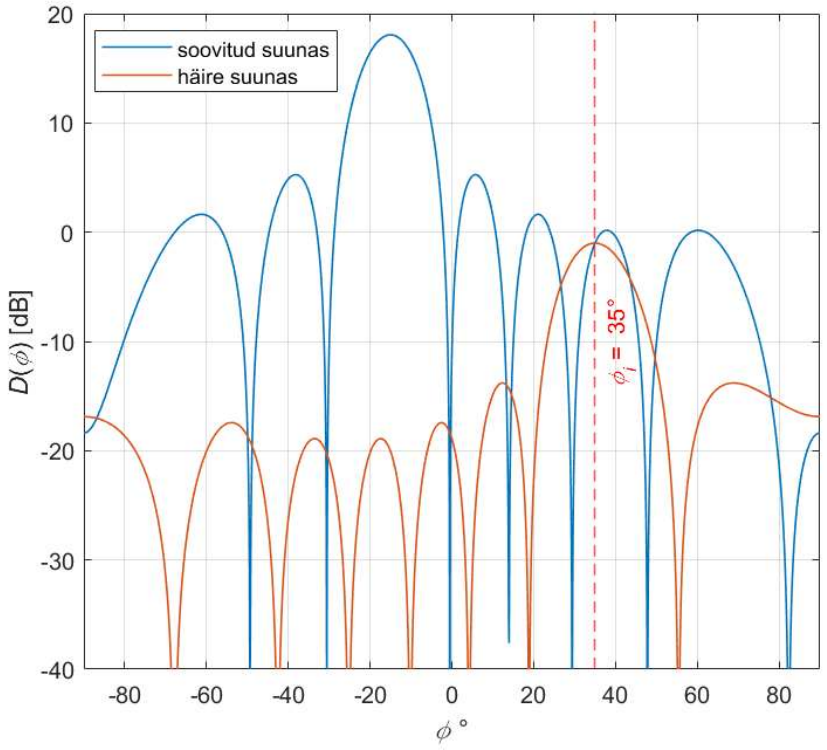
Suunadiagrammi nullide formeerimine

- Juuresoleval näitel saabud soovitav signaal suunast ϕ_d = -15° ning häiresignaal samal ajal suunast ϕ_i = 35°.
- Võre surub viimast alla u 20 dB võrra mis ei pruugi olla piisav.
- Üheks lahenduseks on võre suunadiagrammi nihutamine u 5° võrra paremale. Kuid siis väheneb ka soovitud signaali nivoo.

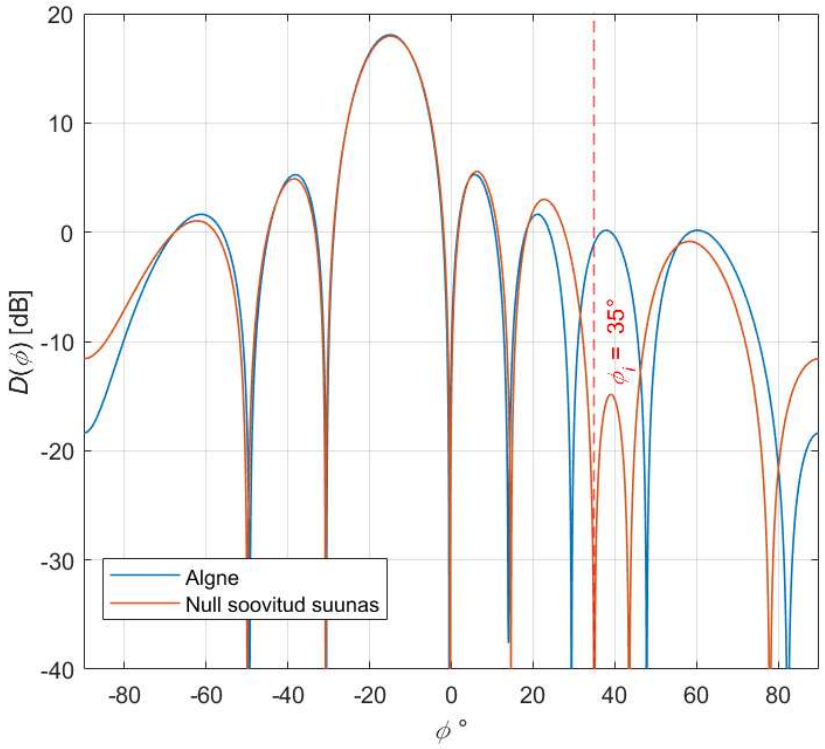


Suunadiagrammi nullide formeerimine

- Formeerime esimese suunadiagrammi maksimumi soovitud suunas ϕ_d = -15°.
- Lisaks formeerime teise suunadiagrammi mille maksimum on häire suunas ϕ_i ja mille suunategur D_{i0} on võrdne esimese suunadiagrammi suunateguriga häire suunal $D_d(\phi_i)$.



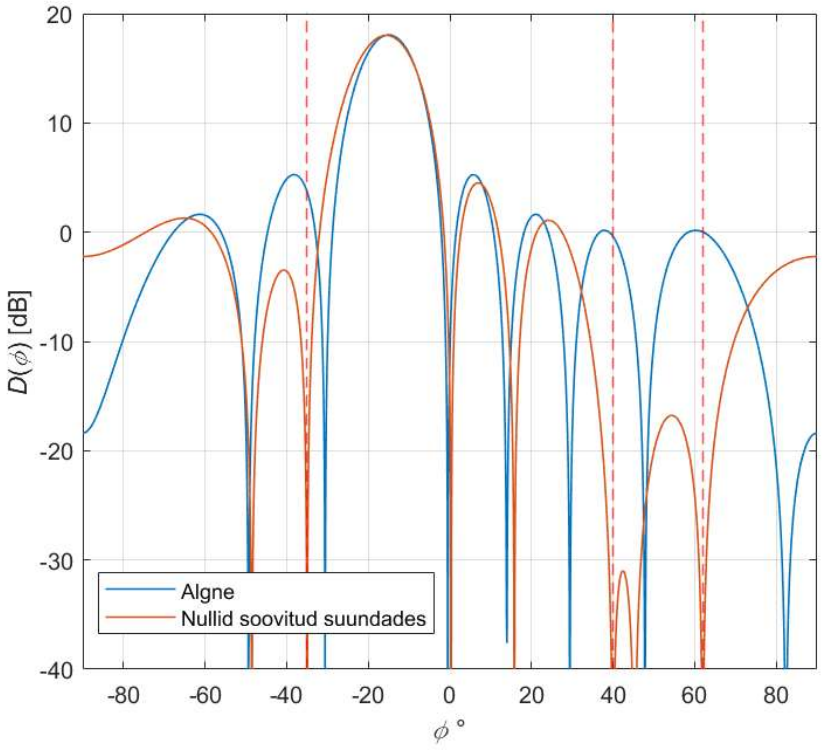
Suunadiagrammi nullide formeerimine



- Lahutades esimese suunadiagrammi tüürvektorist teise suunadiagrammi normeeritud tüürvektori saamegi formeerida soovitud suunda ϕ_i suunadiagrammi nulli.
- Samal ajal jääb ülekanne soovitud suunas praktiliselt samaks.

Suunadiagrammi nullide formeerimine

- *N* elemendiga võre korral on võimalik formeerida kuni *N* - 1 nulli soovitud suundades.
- Juuresoleval näitel nullid suundades -35, 40 ja 62°.

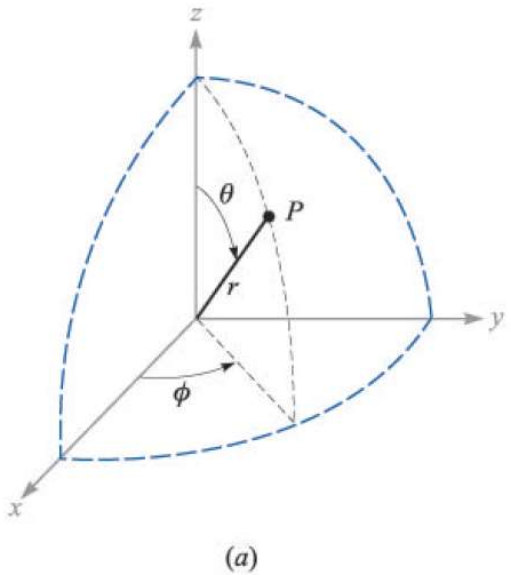


Materjalid

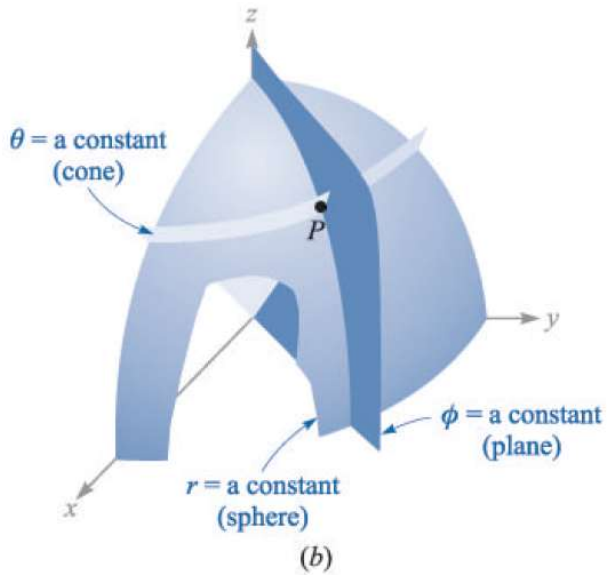
- Balanis, CA 2016, **Antenna Theory : Analysis and Design**, John Wiley & Sons
  - 6. peatükk „*Arrays: Linear, Planar, and Circular*”
- Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. **Antenna theory and Design.**
  - 8. peatükk „*Array Antennas*“
- MacGregor M. **Introduction to Radio Interferometry**. https://science.nrao.edu/facilities/alma/naasc-workshops/nrao-cd-jhu18/Interferometry_Basics.pdf, 27.10.2026



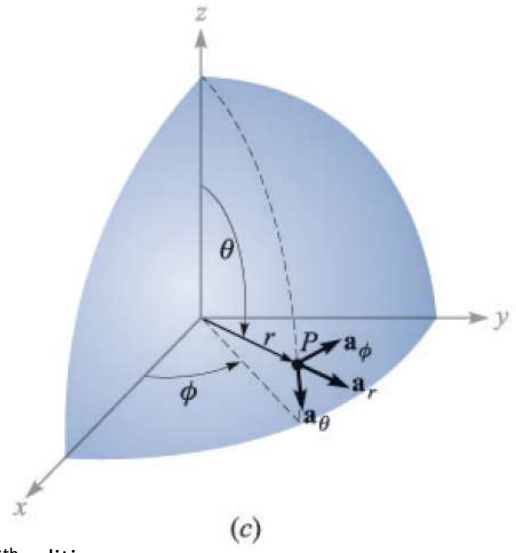
Lisa A: Sfäärilised koordinaadid



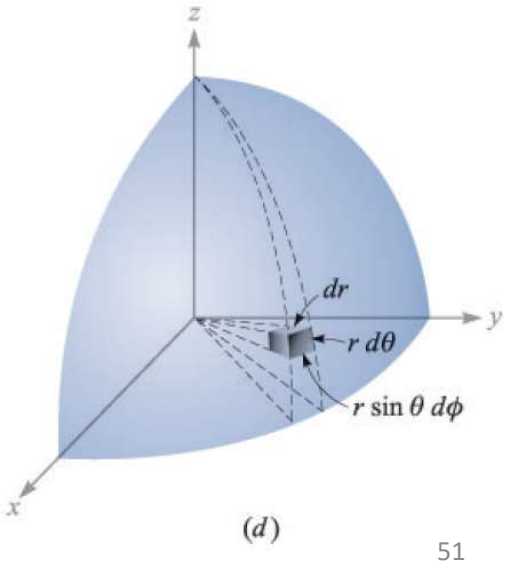
(a)



(b)



(c)



(d)

Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.