8. Antennivõre

IEE2580 – Antennid ja raadiolevi



Antennivõre

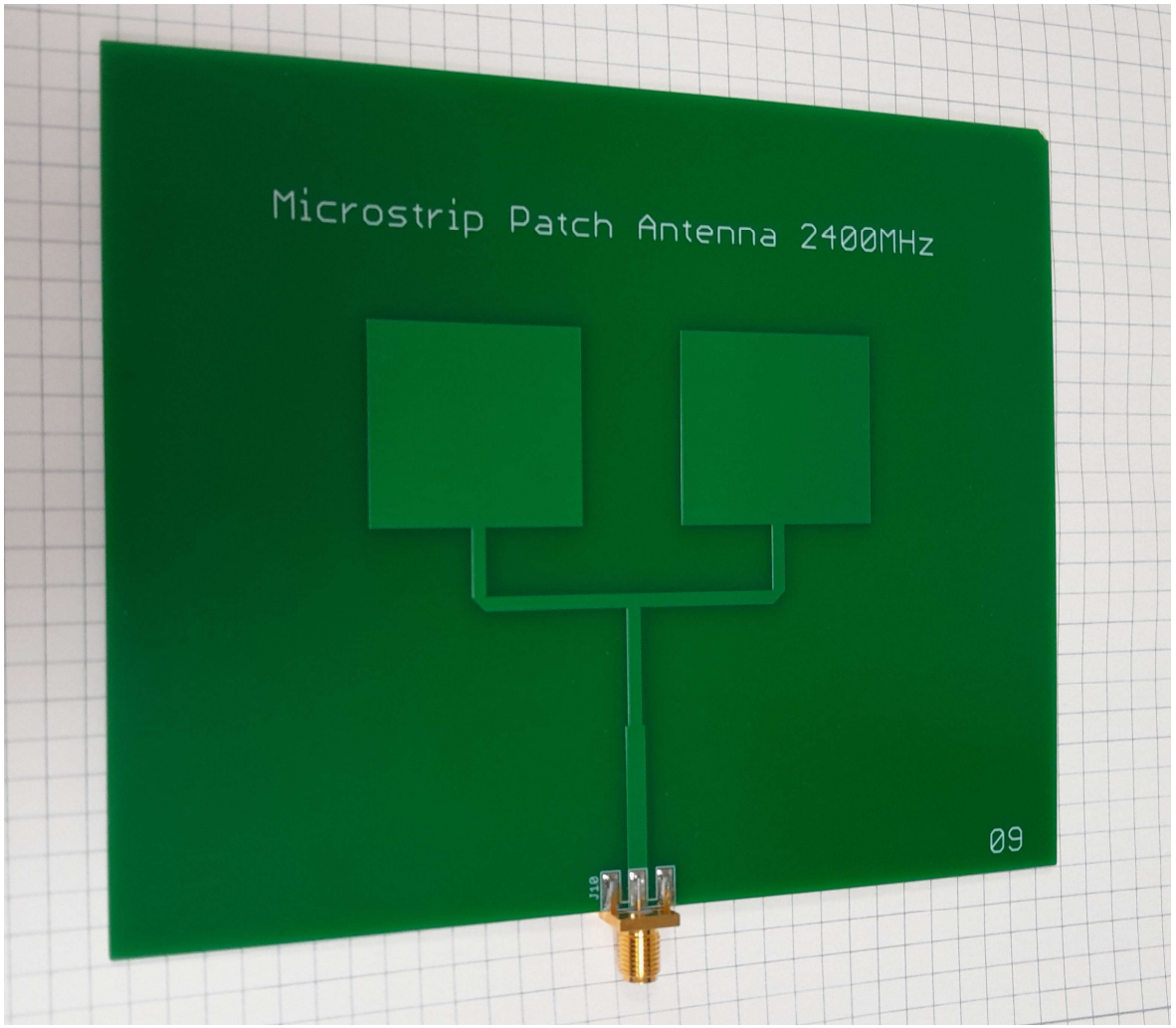
Antennivõre

- Ühe-elemendiliste antennide, nagu dipool, monopol, raam- või planaarantenn, võimendus on üldiselt madal.
- Paljudes rakendustes on, sidekauguse tõstmiseks, vaja antenne millel on suur võimendus.
- Üheks võimalikuks lahenduseks on elemendi mõõtmete suurendamine.
- Antenni mõõtmeid saab suurendada ka kui kasutada korraga mitut elementi. Selliseid, mitmest antennist koosnevaid süsteeme, nimetatakse **antennivõredeks** (*antenna array*).

Antennivõre suunadiagramm

- Antennivõre koosneb üldjuhul identsetest elementidest.
- Suunadiagrammi kujundamiseks sellisel juhul on meil viis võimalust:
  - Võre geomeetrilise konfiguratsiooni valik: lineaarne, ümmargune, planaarne jne.
  - Võre elementide vahelise kauguse valik.
  - Individuaalsete elementide ergutuspinge amplituudi valik.
  - Individuaalsete elementide ergutuspinge faasi valik.
  - Võre elementide suunadiagrammi kuju – teisisõnu millistest antennidest võre koosneb.

Elementaarne võreantenn



Elementaarne võreantenn

- Kõige lihtsam, **elementaarne võreantenn** (*two-element array*) koosneb, nagu nimigi ütleb, kahest elemendist.
- Vaatame järgnevalt näidet kus võre elementideks on lõputult lühikesed dipoolid, elemendi elektrivälja tugevus kaug-tsoonis on:

$$E_\theta = \mathrm{j}\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr} \cos\theta \,,$$

- kus voolu I_0 positiivne suund on *y*-telje sihis ja *l* tähistab siin dipooli pikkust. Esimene on ka põhjuseks miks avaldises on $\sin\theta$ asemel $\cos\theta$.

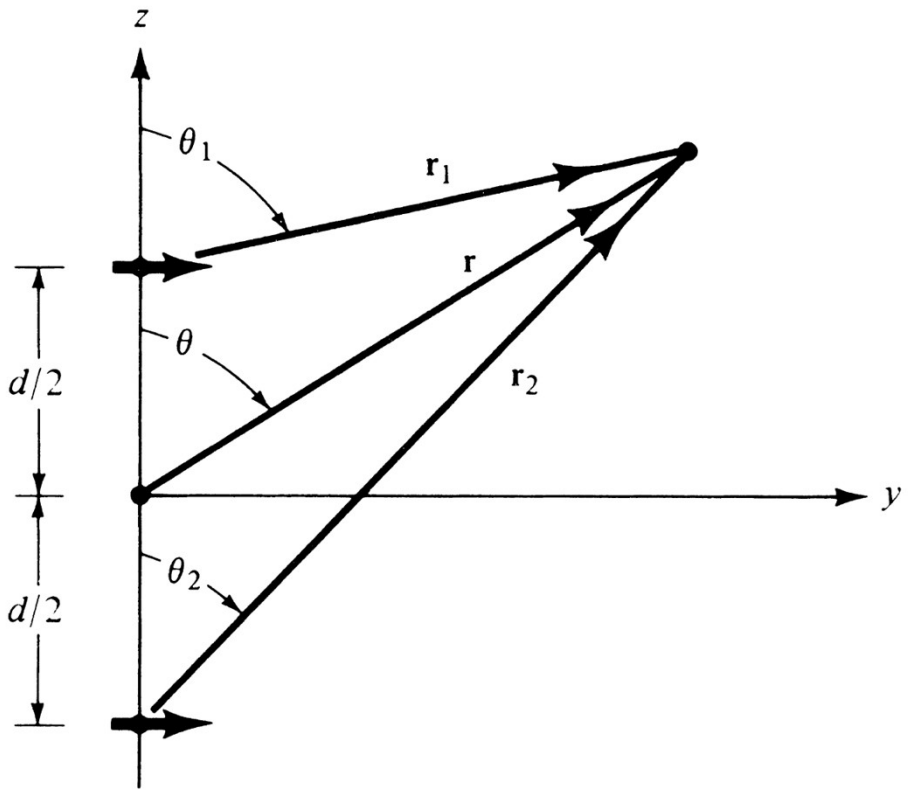
Elementaarne võreantenn

- Summaarne elektriväli, eeldusel, et elementide vahel puudub **vastastikune sidestus** (*mutual coupling*) oleks:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \mathrm{j}\eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left[\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\left(kr_1 - \frac{\beta}{2}\right)}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\left(kr_2 + \frac{\beta}{2}\right)}}{r_2} \cos\theta_2 \right] \mathbf{a}_\theta,$$

- kus β on elementide ergutuspingete vaheline faasinihe ning r_1, r_2 ja θ_1, θ_2 on vastavalt kaugused ja tõusunurgad elementide keskpunktidest punktini milles summaarset elektrivälja tugevust **E** vaatleme.

Elementaarne võreantenn - geomeetria

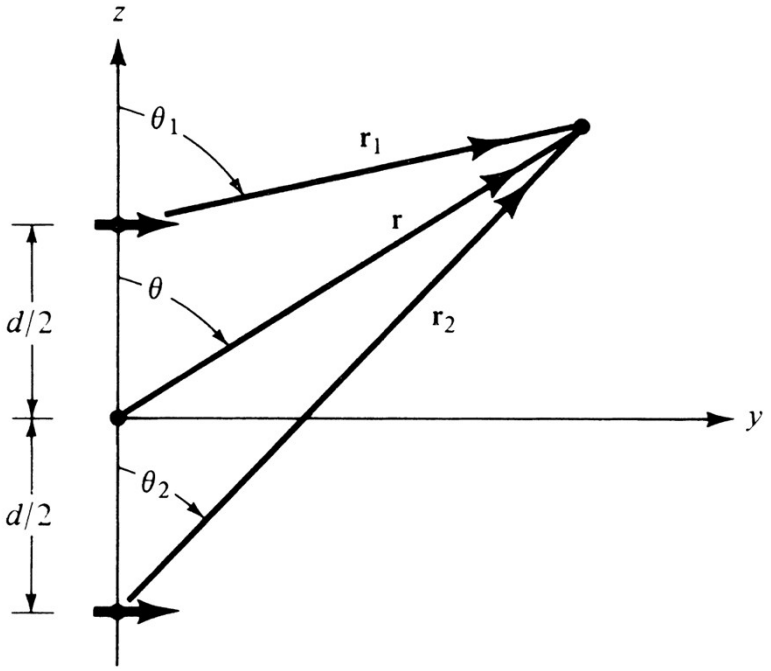


- Kui vaatleme kaugvälja, siis
$$\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta.$$
- Faasi mõju arvestamiseks:
$$r_1 \approx r - \frac{d}{2}\cos\theta\,,$$
$$r_2 \approx r + \frac{d}{2}\cos\theta\,.$$
- Amplituudide leidmisel aga:
$$r_1 \approx r_2 \approx r.$$

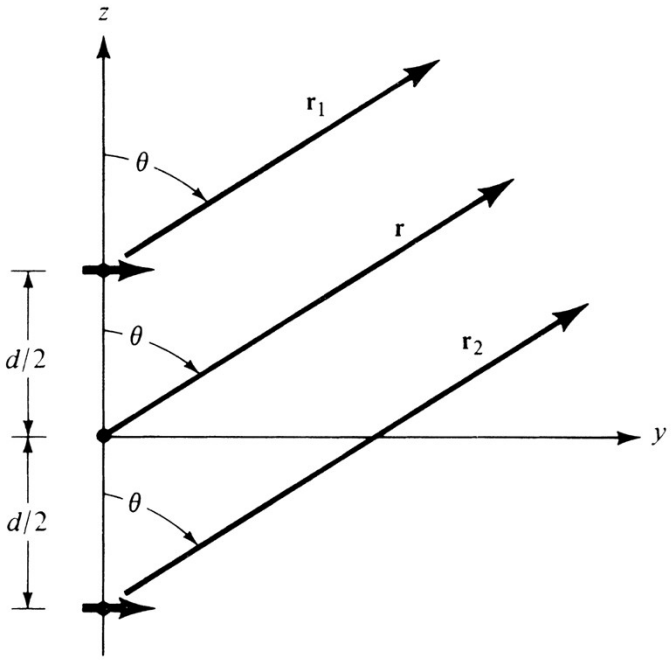
Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

Elementaarne võreantenn - geomeetria

Tegelik



Lihtsustatud



Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

Elementaarne võreantenn

- Ülaltoodud lihtsustusi rakendades saame

$$\mathbf{E} = \mathrm{j}\eta \frac{kI_0 l}{4\pi \mathrm{r}} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr} \cos\theta \left[\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{kd\cos\theta+\beta}{2}} + \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{kd\cos\theta+\beta}{2}} \right] \mathbf{a}_\theta,$$

- Viimast saame lihtsustada kujule

$$\mathbf{E} = \mathrm{j}\eta \frac{kI_0 l}{4\pi \mathrm{r}} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k} \cos\theta \cdot 2\cos\left(\frac{kd\cos\theta+\beta}{2}\right) \mathbf{a}_\theta.$$

- Näeme, et sinisega markeeritud osa tulemusest on võre elemendi elektrivälja avaldis.

Võretegur

- Eelmisel slaidil toodud tulemuse teist poolt, antennivõre elemendi väljatugevuse avaldise kordajat nimetatakse **võreteguriks** (*Array Factor*):

$$AF = 2\cos\left(\frac{kd\cos\theta + \beta}{2}\right).$$

- Viimast esitatakse tihtipeale normeeritud kujul

$$AF_n = \cos\left(\frac{kd\cos\theta + \beta}{2}\right).$$

- Näeme, et võretegur sõltub võre geomeetriast *d* ja/või elementide toitesignaalide vahelisest faasinihkest β.

Võretegur

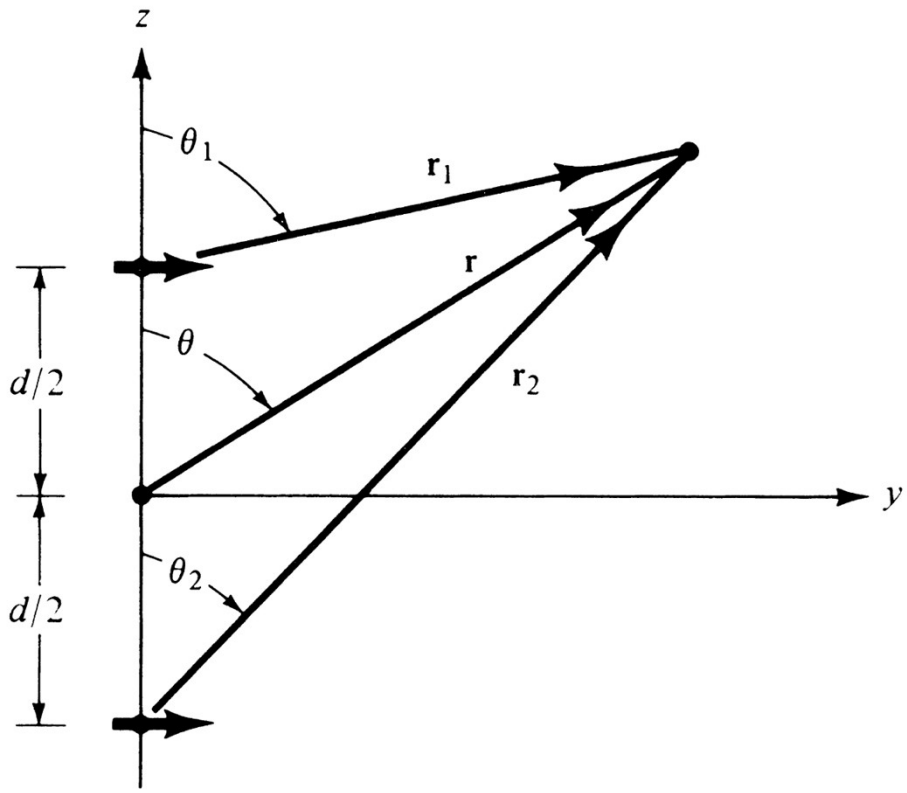
- Antennivõre elektrivälja tugevus on ka üldjuhul võrdne elemendi poolt tekitatava väljatugevuse ja võreteguri *AF* korrutisega (*pattern multiplication*).
- Võretegur sõltub võre elementide arvust *N*, nende paiknemise geomeetriast ning nende toitesignaalide suhtelistest amplituudidest ja faasidest.
- Võreteguri kuju on lihtsam, kui elementide vahekaugused ning toite amplituudud ja faasid on võrdsed.
- Võretegur ei sõltu võres kasutatavatest elementidest!

Kahe elemendiga võre

- Olgu võre elementide asukohad jätkuvalt $z = -d/2$ ja $z = d/2$.
- Eeldame, et $\beta = 0$, normeeritud võretegur on siis:

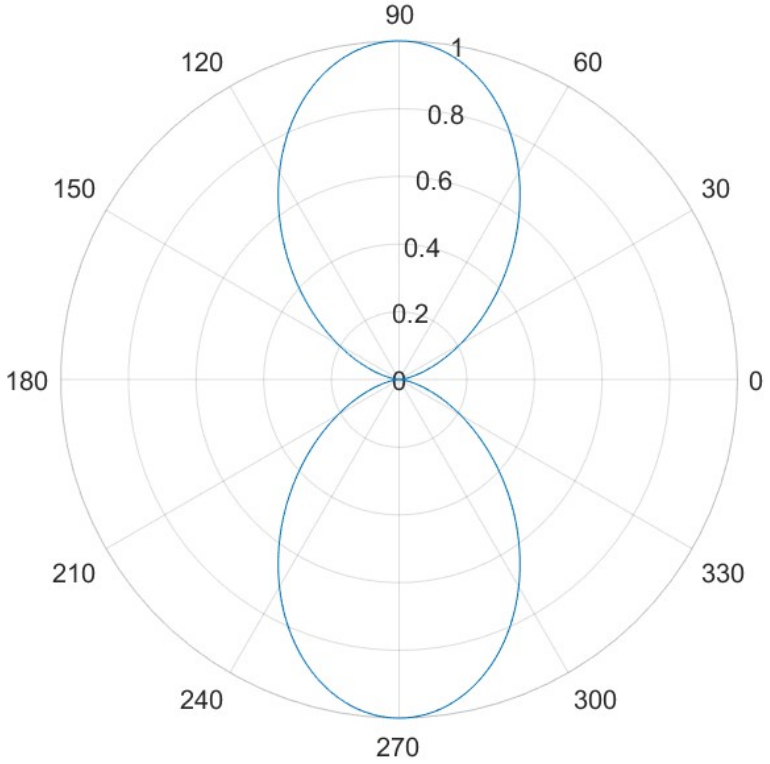
$$AF_n = \cos\left(\frac{kd\cos\theta}{2}\right) =$$

$$= \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\cos\theta\right).$$

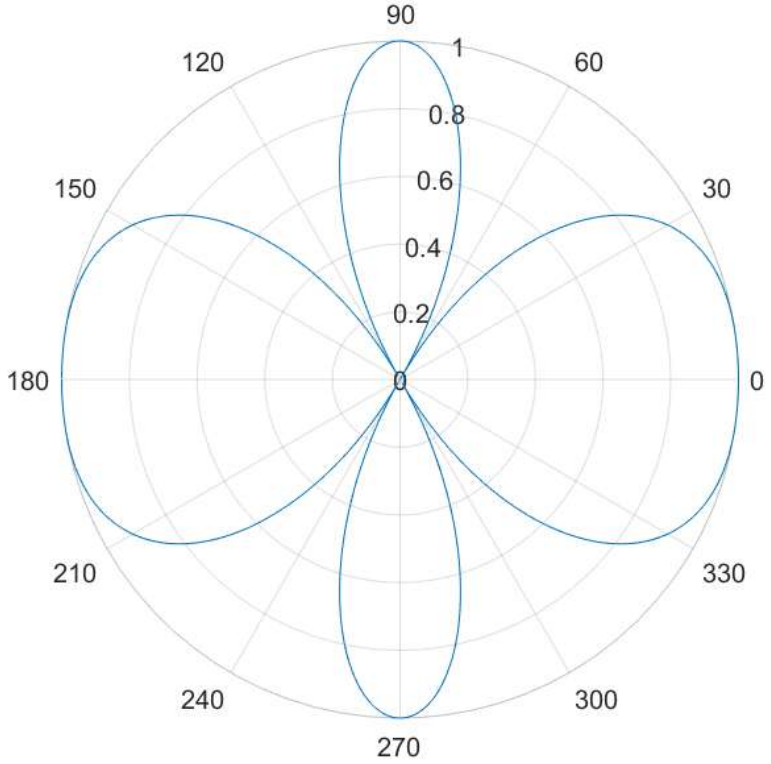


Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

Kahe elemendiga võre

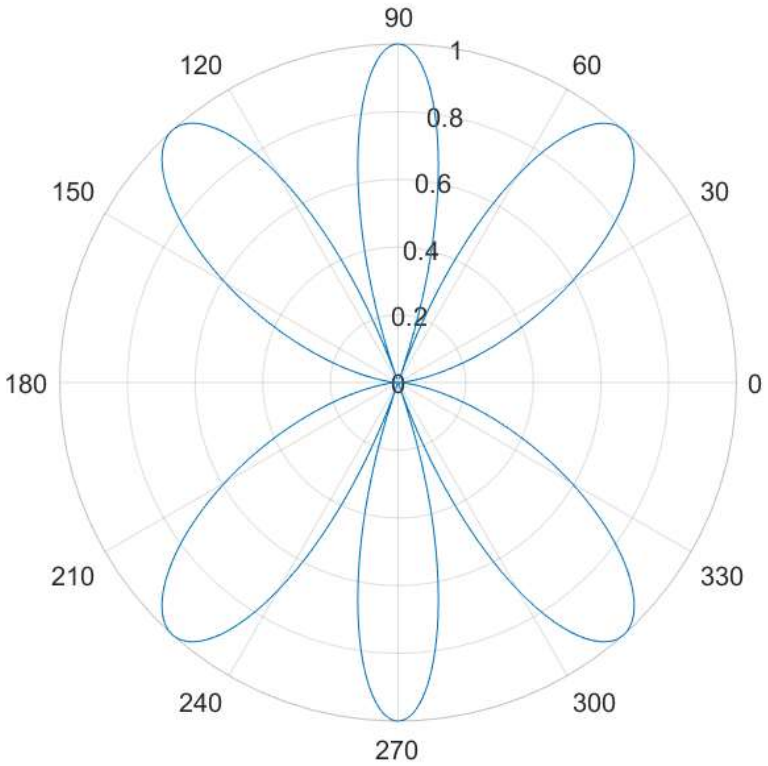


$d = \lambda/2$

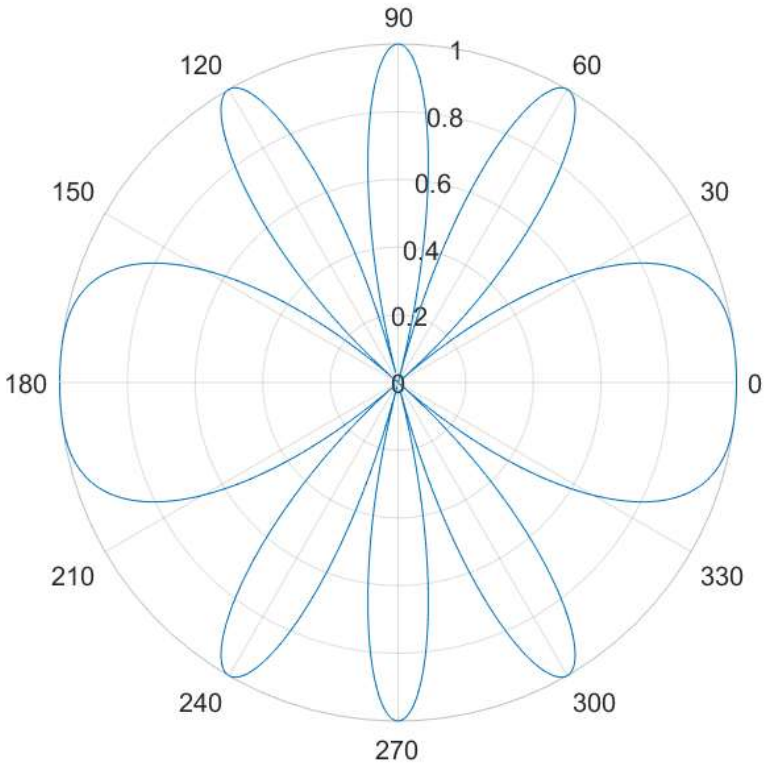


$d = \lambda$

Kahe elemendiga võre



$d = 3 \cdot \lambda / 2$



$d = 2 \cdot \lambda$

Võrede klassifitseerimine

- Antennivõre võib olla nii ühe-, kahe- kui ka kolmemõõtmeline.
- Kui elementide vahekaugus võres on konstantne siis sellist võret kutsutakse **ühtlaseks** (*uniform array*).
- Kui kõik võre elemendis paiknevad ühtlaste vahekaugustega ühes reas siis on tegemist **ühtlase lineaarse võrega** (*Uniform Linear Array ULA*).
- Kui võre suunadiagramm on risti joone või tasandiga, millel elemendid paiknevad siis on tegemist **horisontaalkiirgusega antennivõrega** (*broadside array*).
- Kui kiirguse maksimum on joone suunas on tegemist **pikikiirgus-antennivõrega** (*endfire*). Lühidalt ka pikikiirgusantenn.

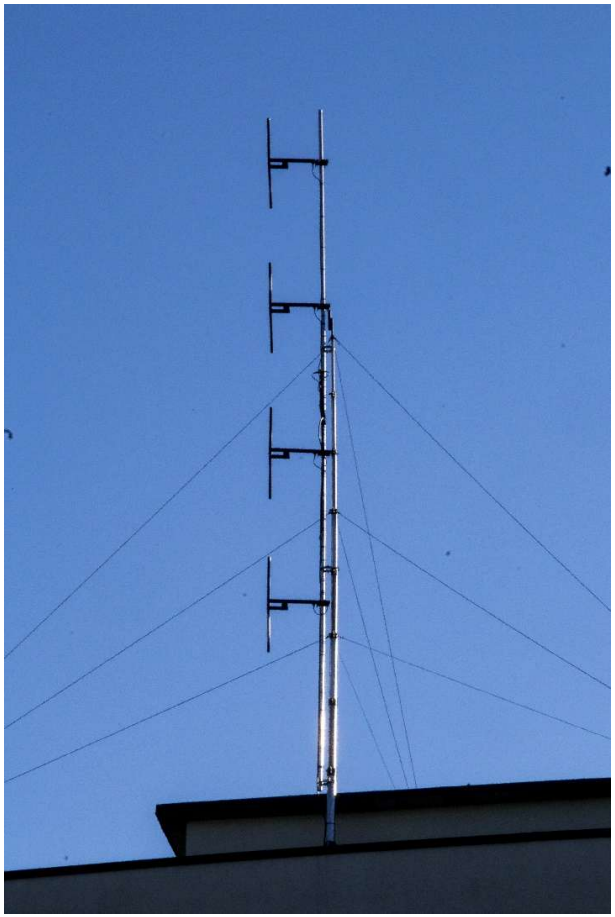
Ühtlane lineaarne võre

- Kui võre elementide vaheline kaugus on *d* ja võres on kahe asemel kokku *N* elementi siis võretegur avaldub kujul

$$AF = 1 + \mathrm{e}^{\mathrm{j}(kd\cos\theta+\beta)} + \mathrm{e}^{\mathrm{j}2(kd\cos\theta+\beta)} + \\ + \mathrm{e}^{\mathrm{j}3(kd\cos\theta+\beta)} + \cdots + \mathrm{e}^{\mathrm{j}(N-1)(kd\cos\theta+\beta)}.$$

- Summamärgi abil lühidalt:

$$AF = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(n-1)(kd\cos\theta+\beta)} = AF = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(n-1)\psi}.$$



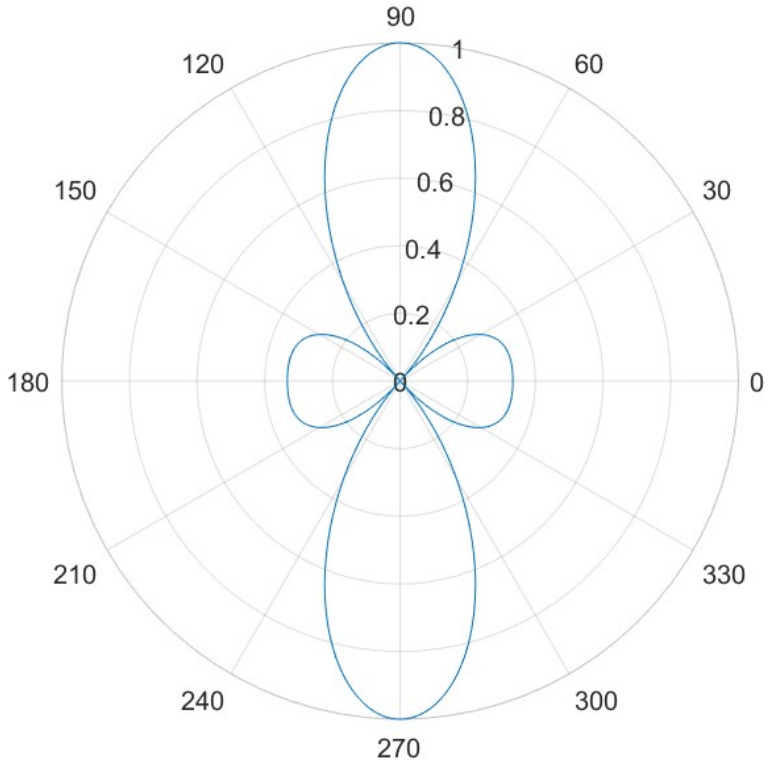
Kolme elemendiga võre

- Olgu võre elementide asukohad z = –*d*, 0 ja *d.*
- Lisaks olgu $\beta = 0$.
- Võretegur on nüüd:

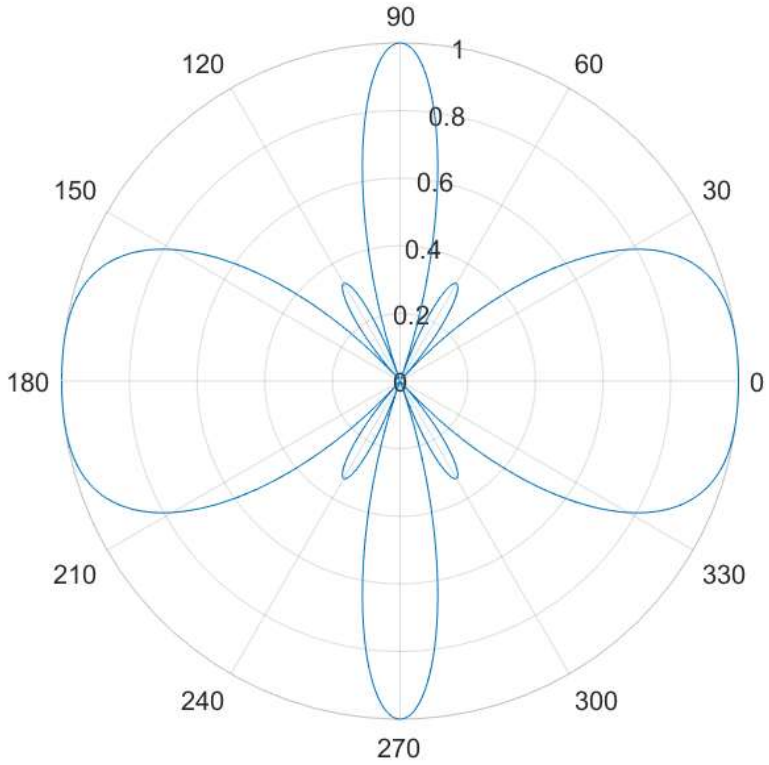
$$AF = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta} + \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi 0}{\lambda}\cos\theta} + \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta} =$$

$$= 1 + 2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta\right).$$

Kolme elemendiga võre



$d = \lambda/2$



$d = \lambda$

Ühtlase lineaarse võre võretegur

- Korrutame võreteguri

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

mõlemaid pooli konstandiga $\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi}$ ja lahutame saadud tulemusest maha esialgse võreteguri, saame:

$$AF\left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} - 1\right) = \left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}N\psi} - 1\right).$$

- Viimasest saame:

$$AF = \frac{\left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}N\psi} - 1\right)}{\left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} - 1\right)} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{N-1}{2}\psi}\left(\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{N}{2}\psi} - \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{N}{2}\psi}}{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{1}{2}\psi} - \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{1}{2}\psi}}\right).$$

Ühtlase lineaarse võre võretegur

- Viimasest omakorda:

$$AF = e^{\mathrm{j}\frac{N-1}{2}\psi}\left(\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{N}{2}\psi} - \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{N}{2}\psi}}{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{1}{2}\psi} - \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{1}{2}\psi}}\right) = e^{\mathrm{j}\frac{N-1}{2}\psi}\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)}.$$

Kui valida referentspunktiks mitte võre esimene element (*n* = 0) vaid võre keskpaik (*N* - 1)/2 muutub esimene eksponent võrdseks ühega ja tulemus lihtsustub kujule:

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

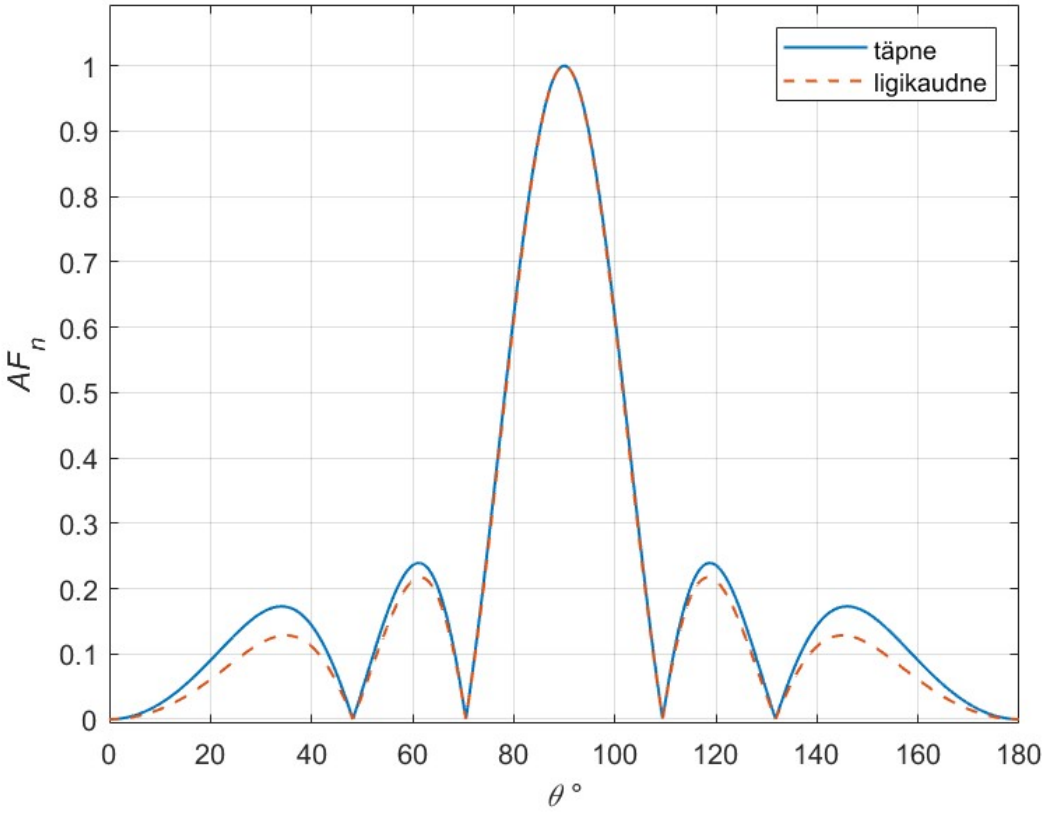
Ühtlase lineaarse võre võretegur

- Väikeste ψ väärtuste korral on

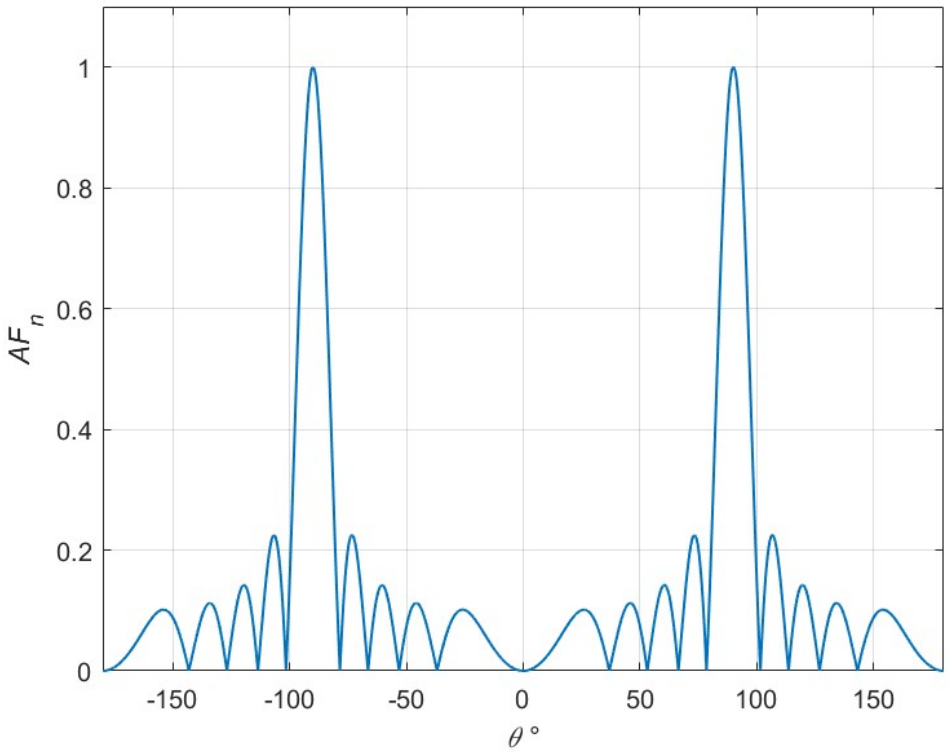
$$AF \approx \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{1}{2}\psi} = \frac{2\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\psi}.$$

- Normeeritud võretegur on

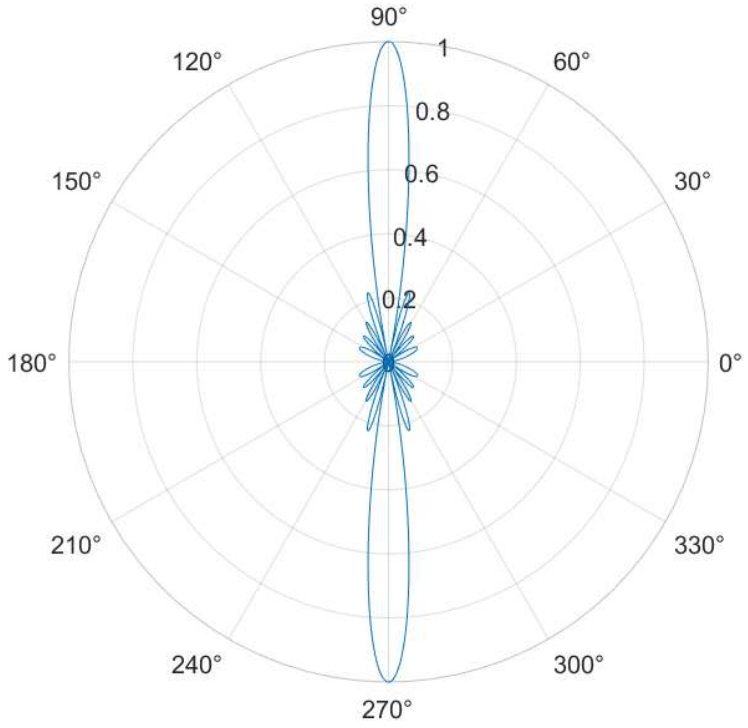
$$AF_n = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{N\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)}.$$



Näide



$N = 10$
$d = \lambda/2$
$\beta = 0$



Võre suunategur

- Antennivõre kiirguse intensiivsus on

$$U_a = \frac{r^2}{2\eta}|\mathbf{E}_{sa}(r,\theta,\phi)|^2 = \frac{r^2 AF^2}{2\eta}|\mathbf{E}_s(r,\theta,\phi)|^2.$$

- Suunategur peab seega olema

$$D_a(\theta,\phi) = AF^2 \cdot D(\theta,\phi),$$

  kus $D(\theta,\phi)$on võre elemendi suunategur.
- Võre suunategur on ligikaudu:

$$D_0 \approx 2N\frac{d}{\lambda}.$$

Võreteguri nullid ja maksimumid

- Nullide suundade θ_n leidmiseks peame lahendama võrrandi

$$\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right) = 0.$$

- Saame

$$\theta_n = \operatorname{acos}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2n}{N}\pi\right)\right],$$

kus n = 1, 2, 3, …. ja $n \neq N$.

- Kui võre elementide vahekaugus ei ületa poolt lainepikkust on võreteguril ainult üks maksimum suunas:

$$\theta_m = \operatorname{acos}\left(\frac{\lambda\beta}{2\pi d}\right).$$

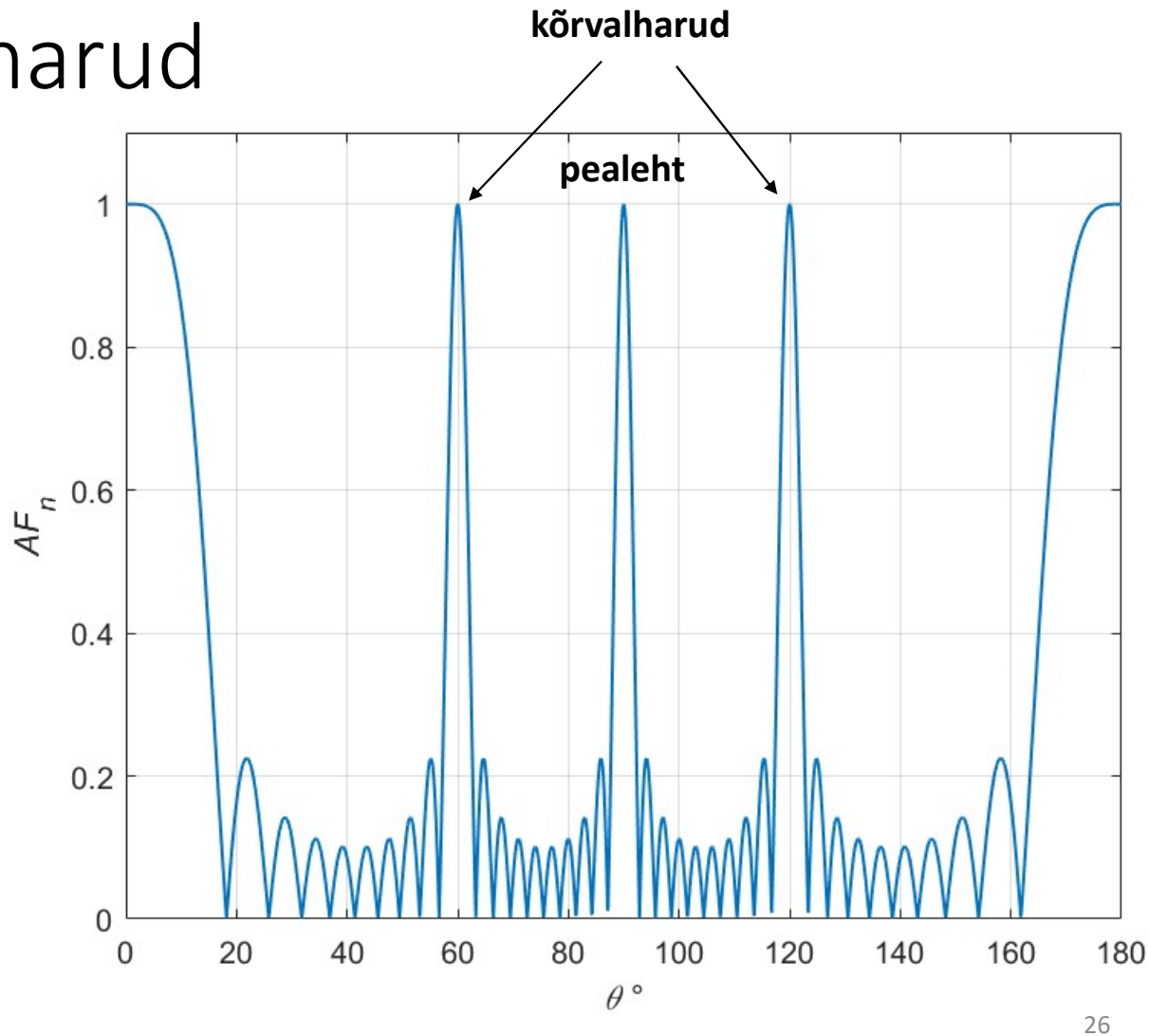
- Kõrvallehtede maksimumid:

$$\theta_s = \operatorname{acos}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\beta \pm \frac{2s+1}{N}\pi\right)\right],$$

kus s = 1, 2, 3,…

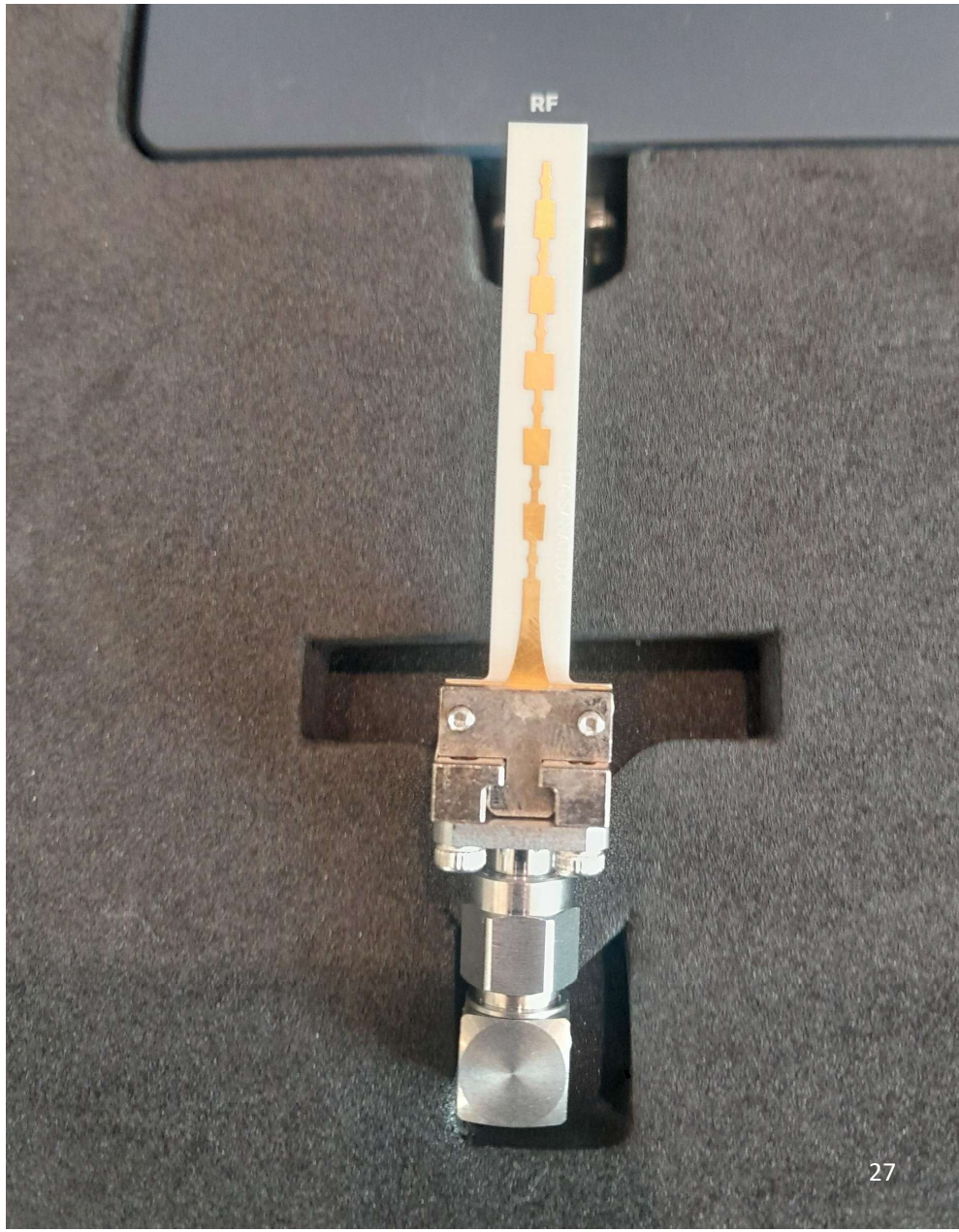
Võreteguri kõrvalharud

- Kui võre elementide vaheline kaugus on suurem poolest lainepikkusest siis tekivad võretegurile **kõrvalharud** (*grating lobes*).
- Nyquisti kriteerium.



Horisontaalkiirgusega antennivõre

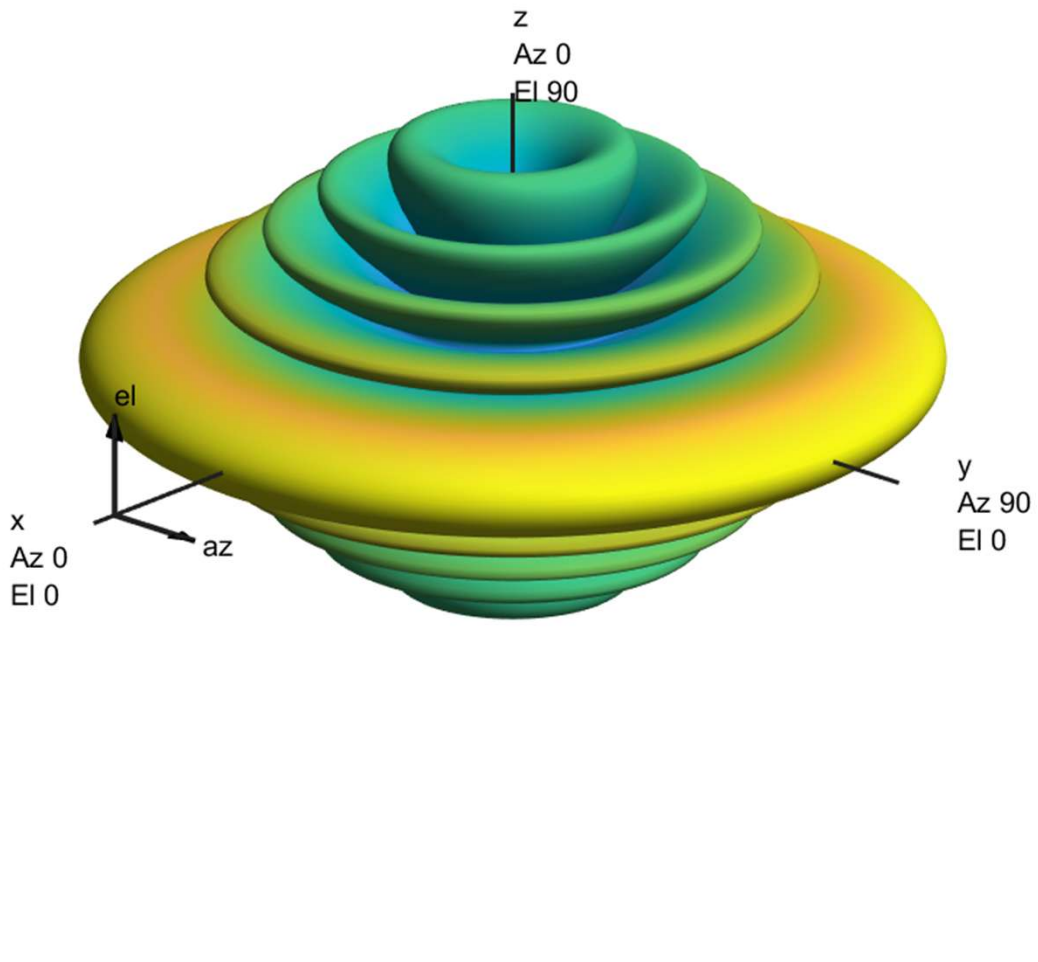
- Paljudes rakendustes soovitakse, et antennivõre kiirguse maksimum oleks võre normaali suunas.
- Sellisel juhul peavad nii võre, kui selle elementide suunategurid olema maksimaalsed suunas θ_n = 90°.
- Selleks, et võreteguri maksimum oleks soovitus suunas peab β = 0.



Võre 3D suunategur

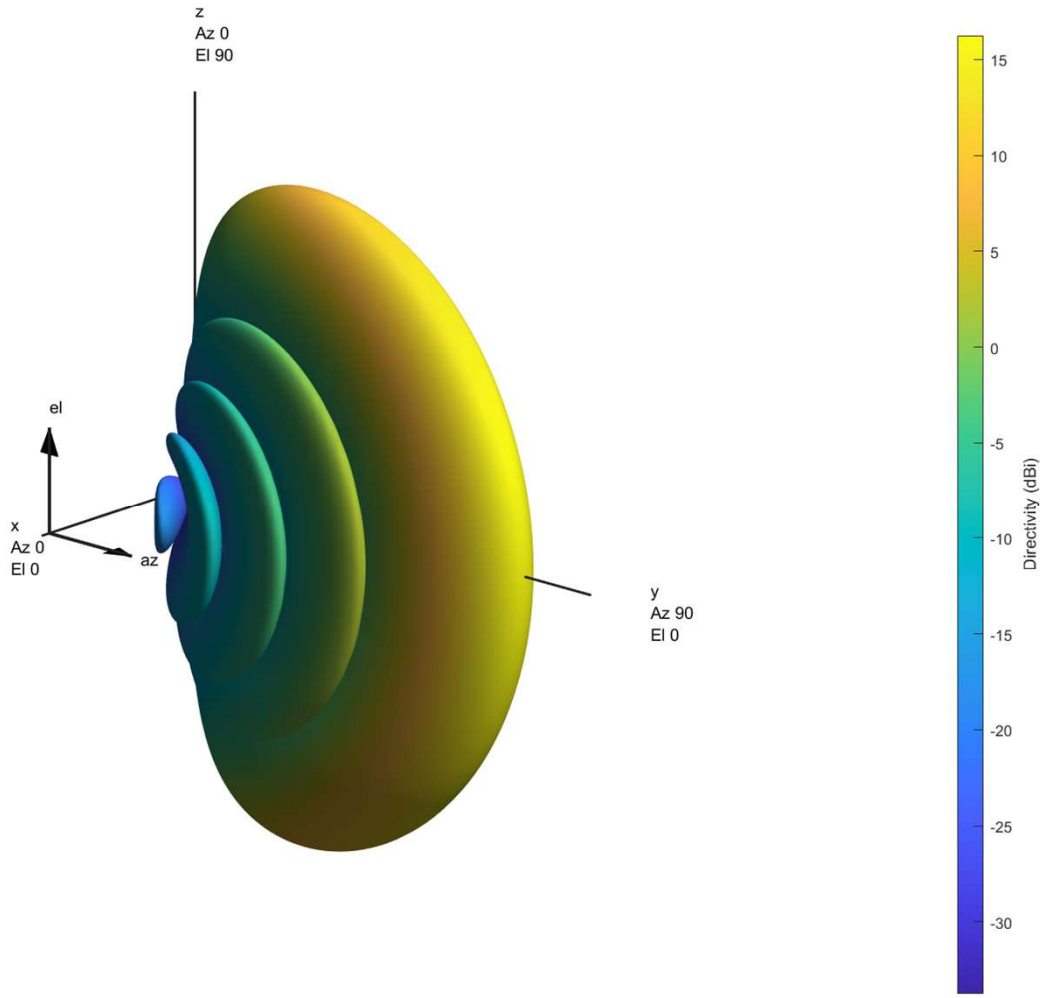


- $N = 10$
- $d = \lambda/2$
- $\beta = 0$



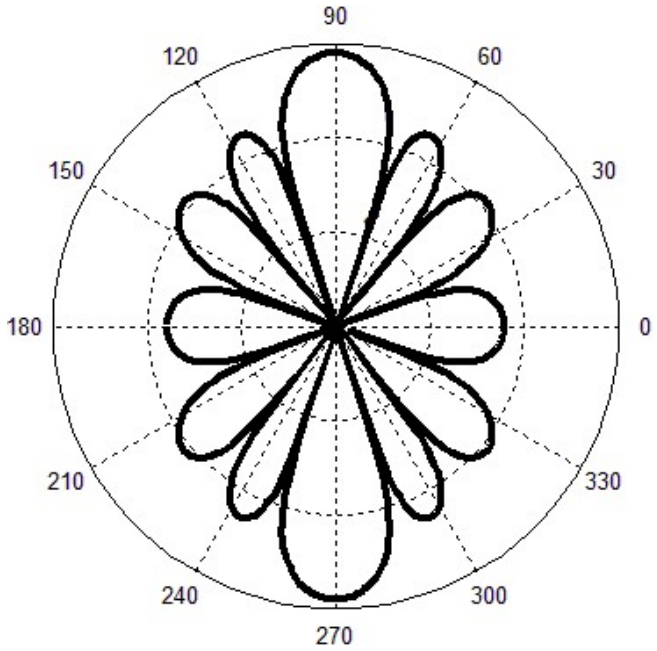
Võreelementide suunadiagrammide mõju

- $N = 10$
- $d = \lambda/2$
- $\beta = 0$

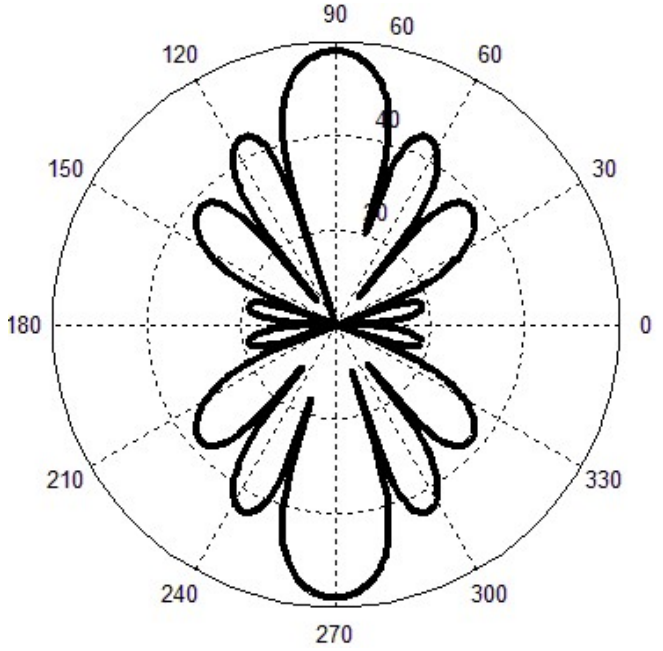


Võretegur ja suunadiagramm

Lineaarse kaheksa elemendiga võre võretegur kui elementide vahekaugus on 0,4·λ

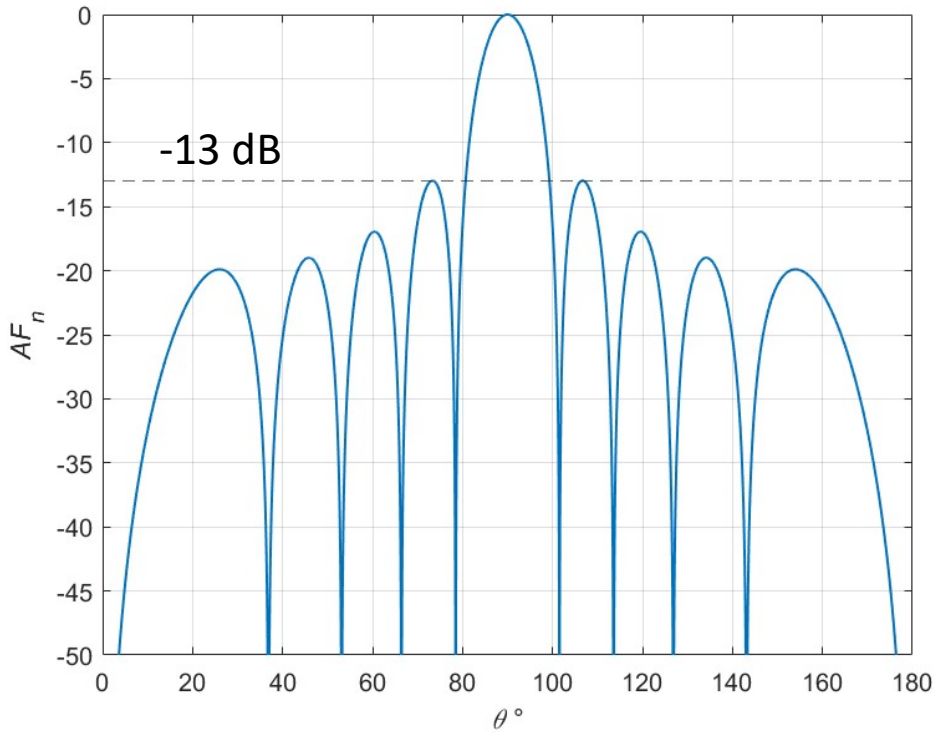


Võre suunadiagramm kui selle elementideks on poollaine dipoolid.

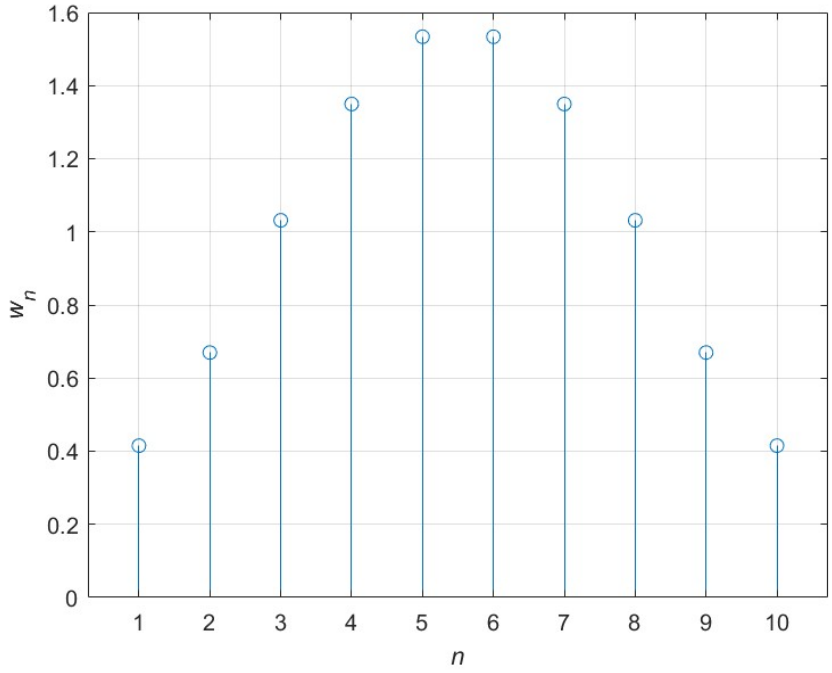


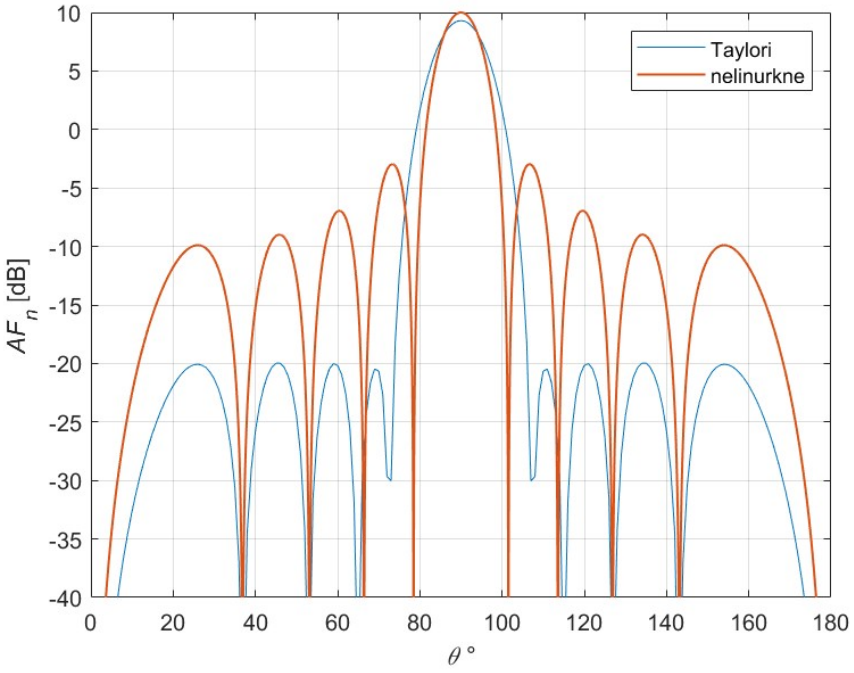
Külglehtede nivoo

- Kui kõikide võre elementide toitesignaalide amplituudid on võrdsed siis on külglehtede (maksimaalne) nivoo pealehest madalam ainult 13 dB võrra.
- Valest suunast tulevat signaal nõrgendatakse ainult 20 korda.
- See ei pruugi alati piisav olla.
- Samas on sellisel juhul pealehe laius vähim võimalikest.



Mitteühtlane valgustamine

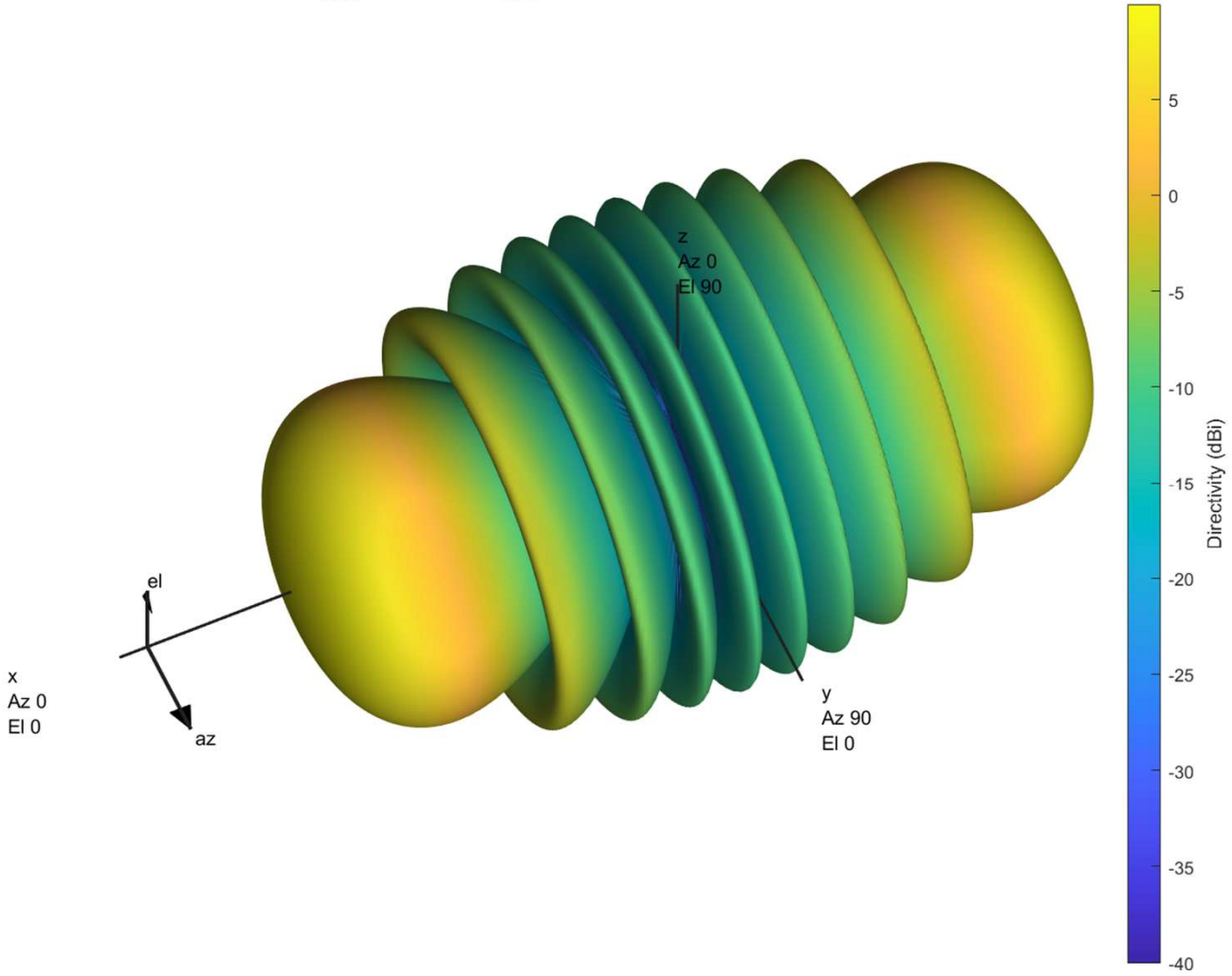




Pikikiirgusega antennivõre

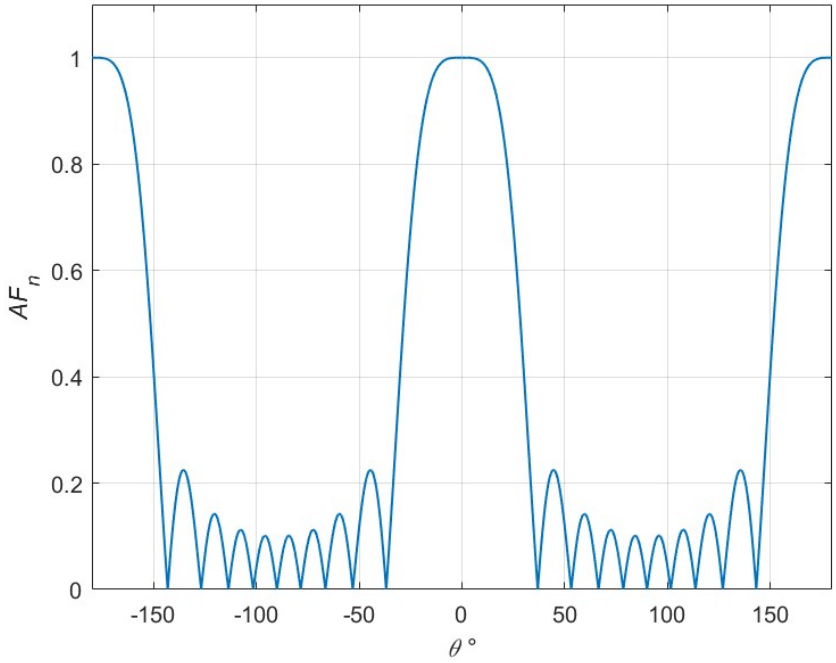
- Sellise võre suunadiagrammi maksimum on võre sihiline.
- Kui võre elementide vahekaugus on väiksem poolest lainepikkusest, siis on võimalik kiirgust suunata ainult ühes suunas.
- Kui soovime pealehte suunas θ_n = 0° peab β = - *kd*.
- Vastupidisel juhul, kui soovime pealehte suunas θ_n = 180° peab β = *kd*.

Pikikiirgusega antennivõre 3D suunategur

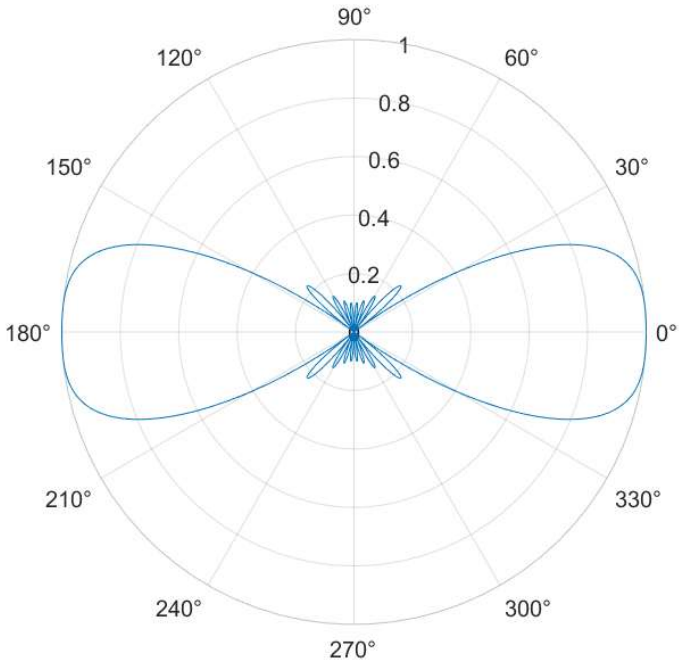


- $N = 10$
- $d = \lambda/2$
- $\beta = 180°$
- NB! Antud joonisel paiknevad võre elemendid pikki x – telge!

Pikikiirgusega antennivõre võretegur

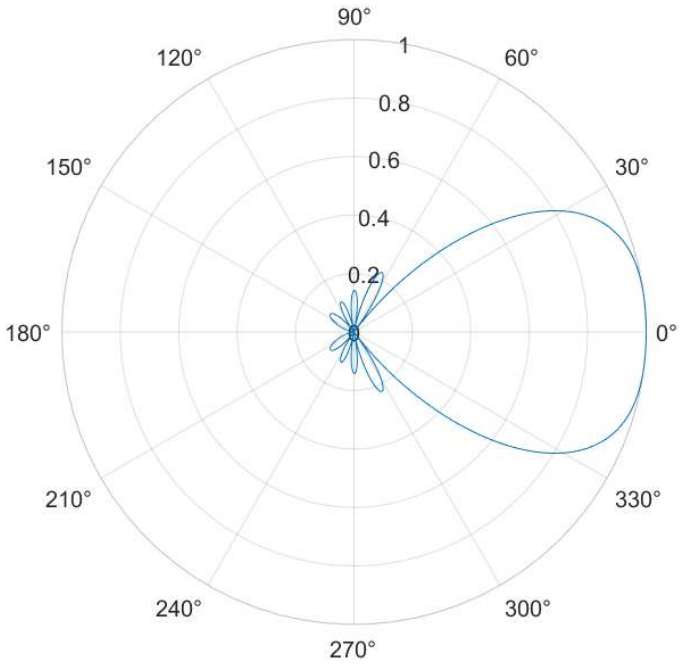


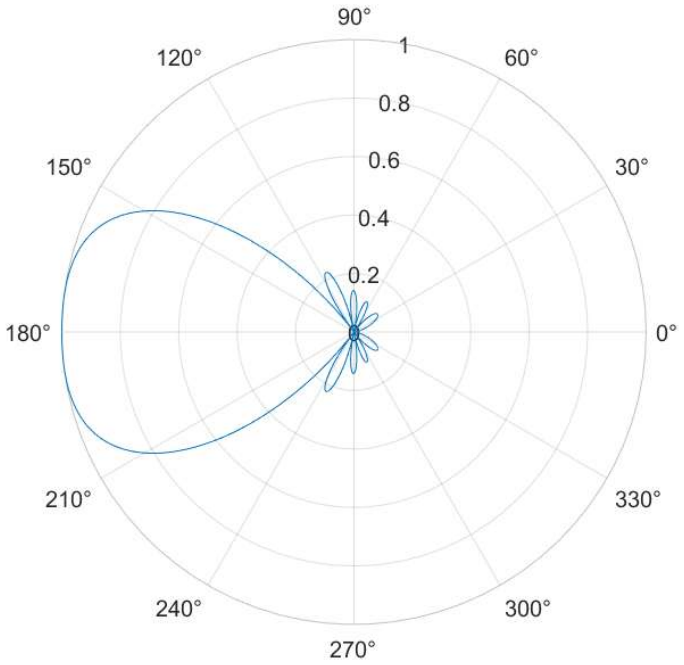
N = 10
$d = \lambda/2$
β = 180°



Ühesuunaline kiirgus

N = 10
$d = \lambda/4$
β = -90°





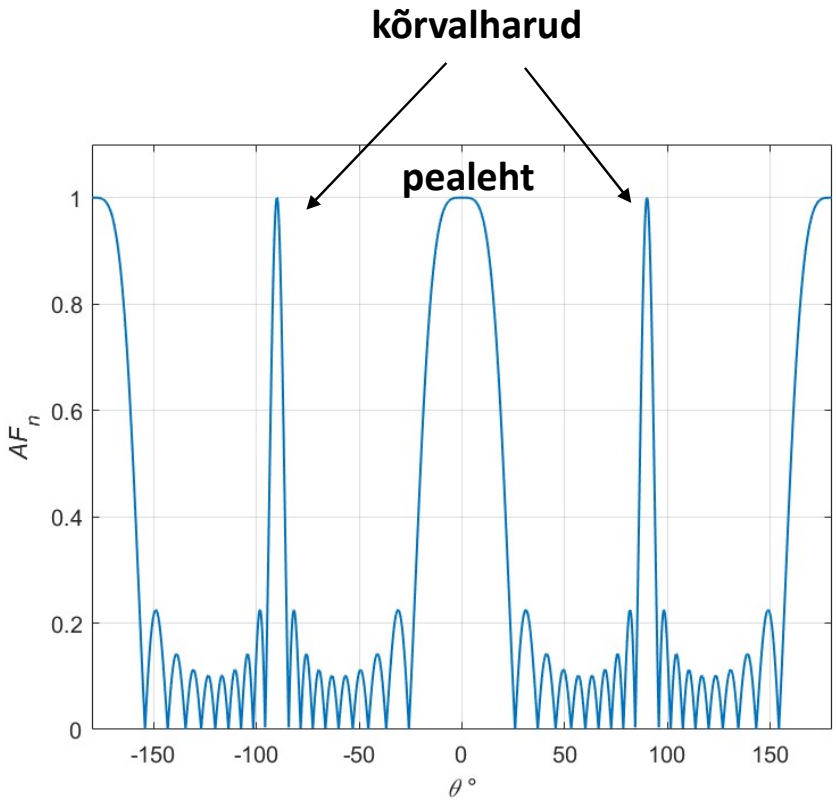
N = 10
$d = \lambda/4$
β = 90°



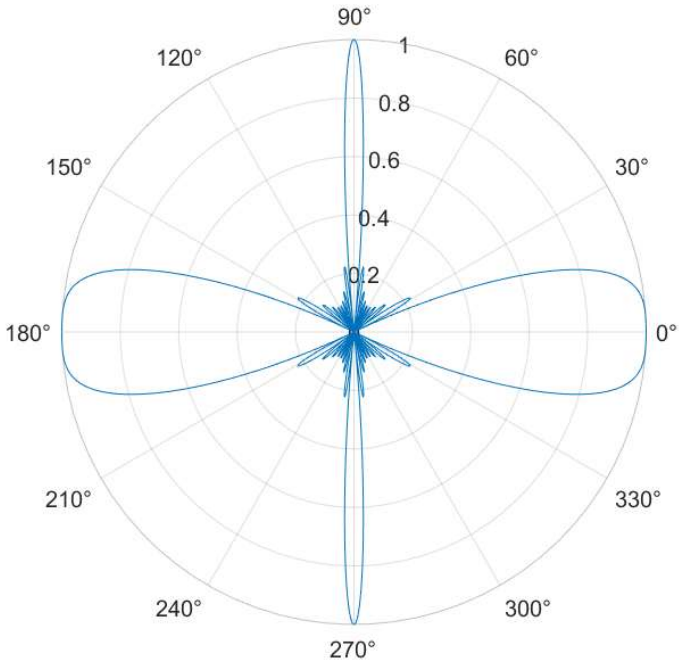
Pikikiirgusega passiivne antennivõre

Foto: https://issuu.com/antennaexpert/docs/advantages_and_disadvantages_of_yagi_antenna

Kõrvalharud pikikiirgusega võre korral



$N = 10$
$d = \lambda$
$\beta = 360°$

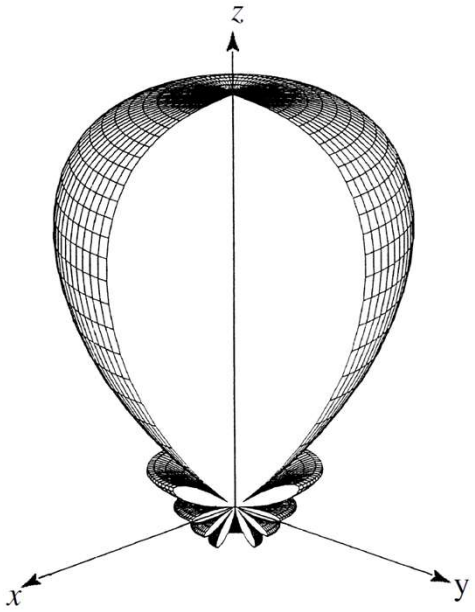


Hansen-Woodyard'i võre

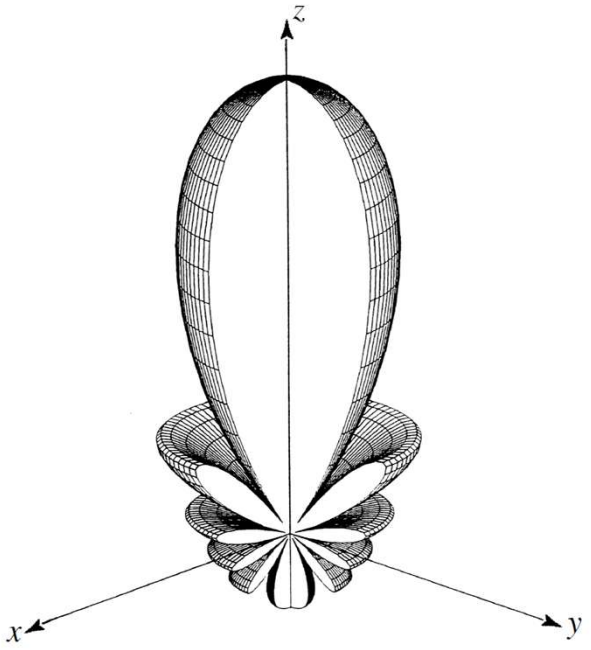
- Kui pika lineaarse võre korral on järjestikuste elementide vaheline faasinihe

$$\beta = \pm\left(kd + \frac{2{,}92}{N}\right),$$

on tegemist **Hansen-Woodyard'i võrega** mille suunategur on parem kui tavalisel pikikiirgusega võrel.

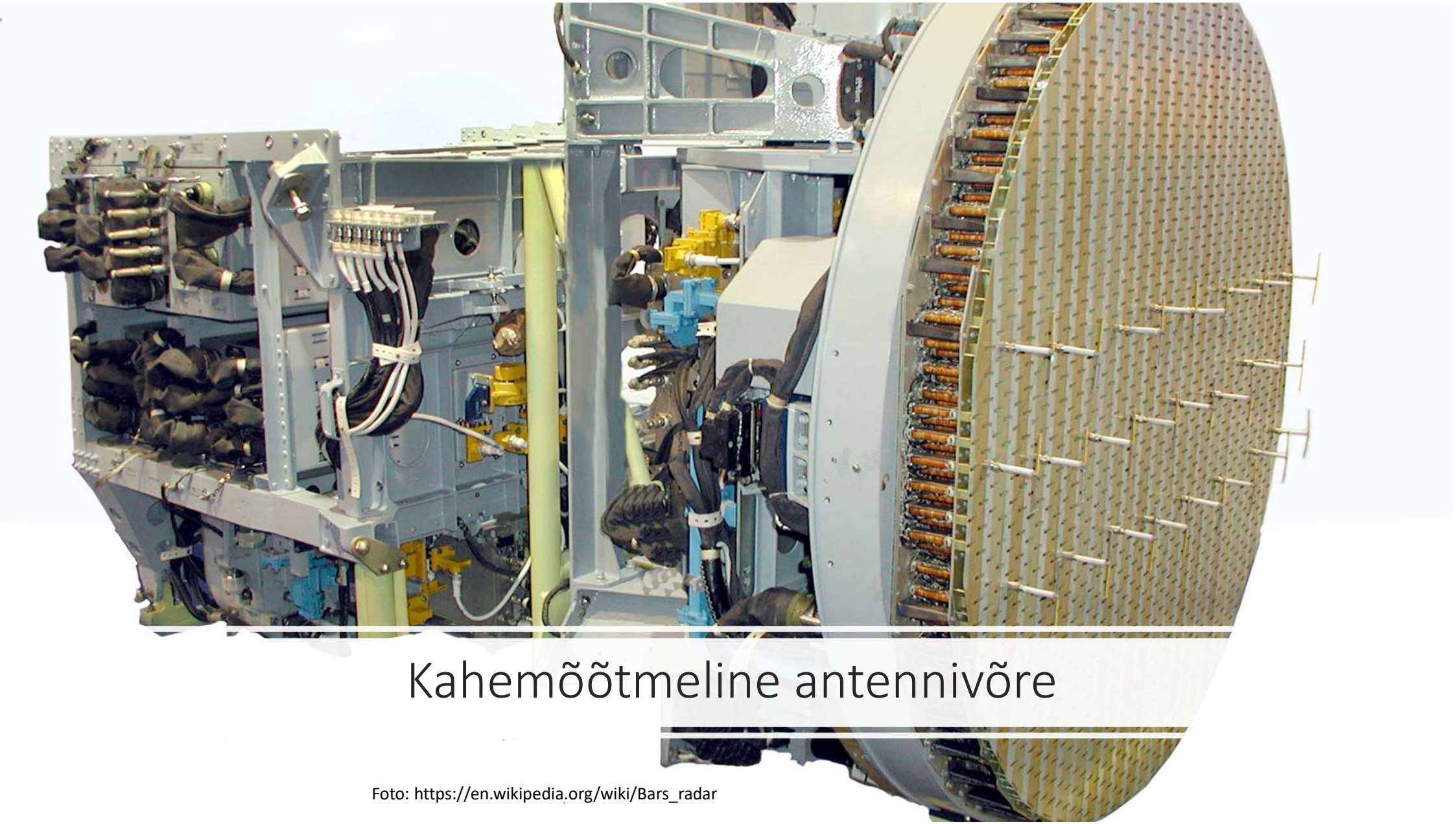


Tavaline



Hansen-Woodyard'i

Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

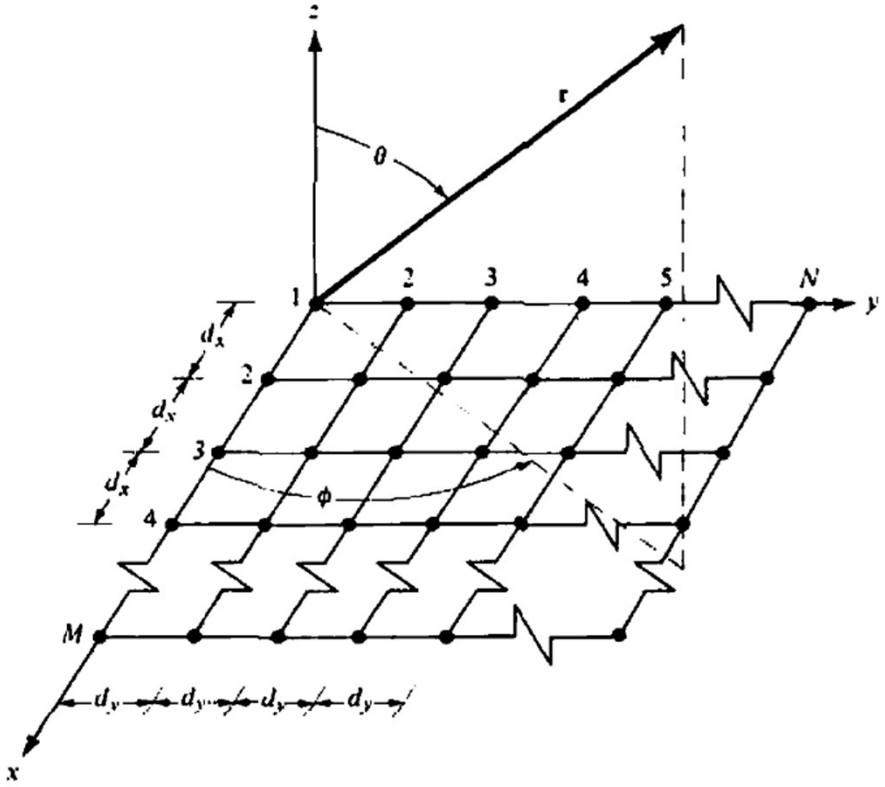


Kahemõõtmeline antennivõre

Foto: https://en.wikipedia.org/wiki/Bars_radar

Planaarne võre

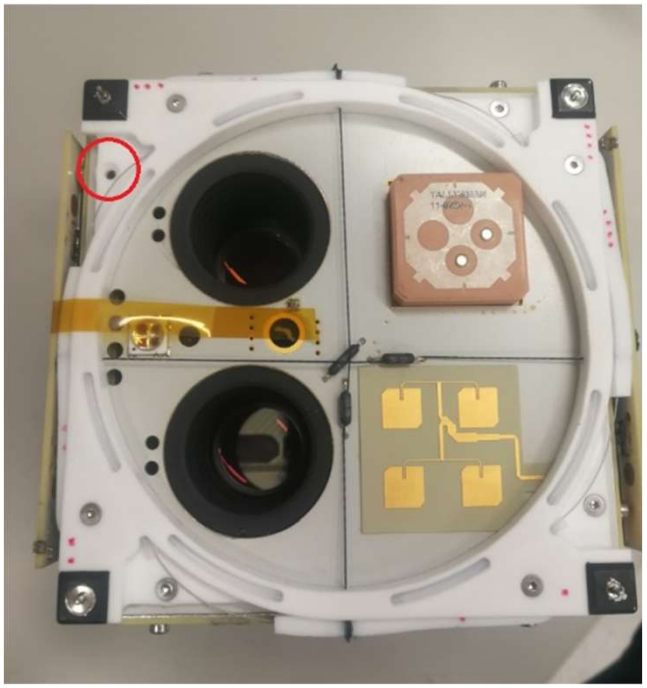
- Kõige lihtsam kahemõõtmeline võre koosneb elementidest mis paiknevad tasandil nelinurksel võrgustikul.
- Koosneb *M* reast millest igas on *N* elementi.
- Sellist võret nimetatakse **ühtlaseks nelinurkseks võreks** (*uniform rectangular array* URA) või lihtsalt **planaarseks võreks** (*planar array*).



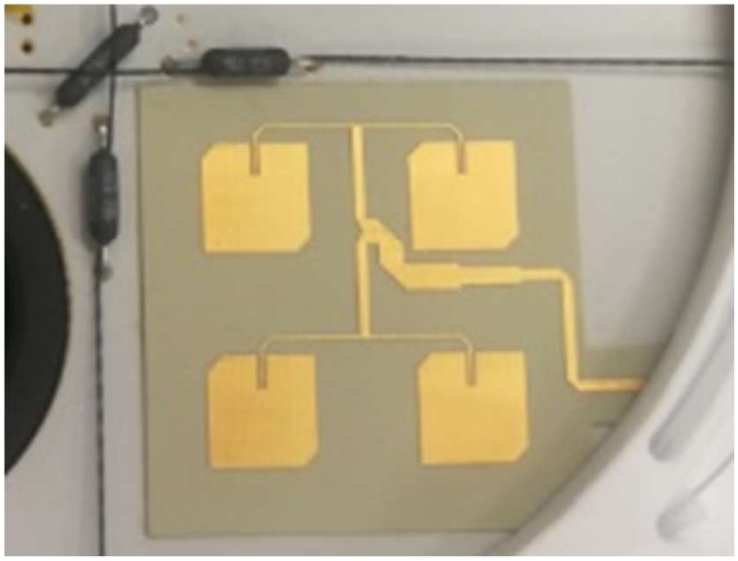
Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

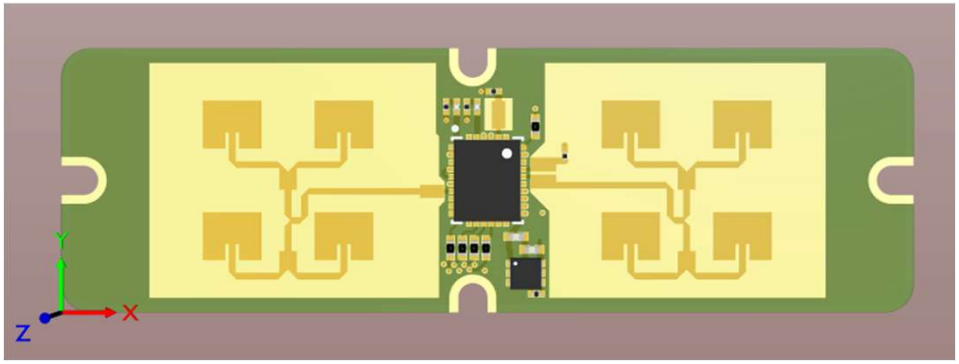
Ühtlane nelinurkne võre

TTÜ kuupsatelliidid

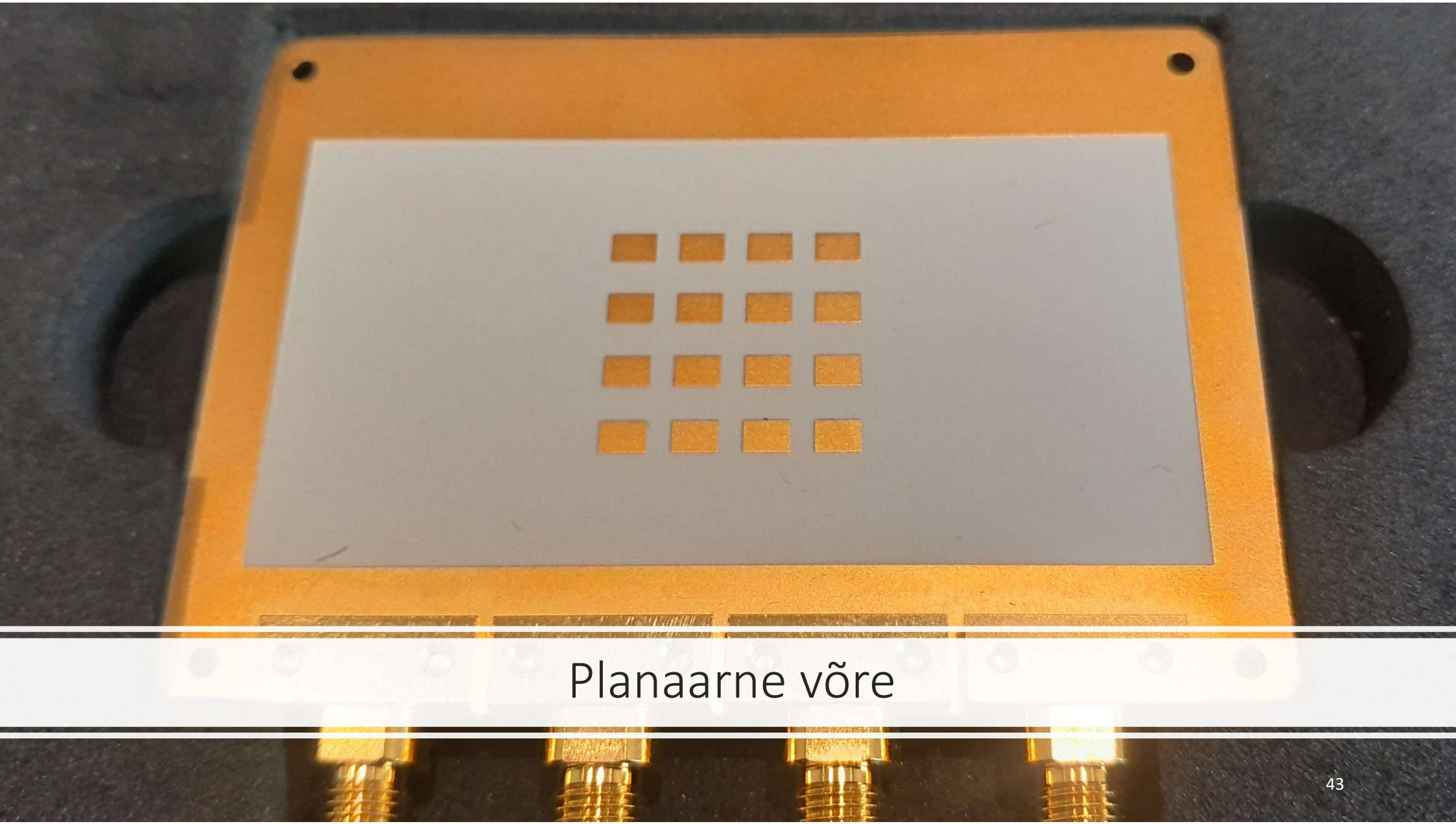


Planaarantennide võre





Võrede disainid: Eiko Priidel, Aleksandr Stennikov

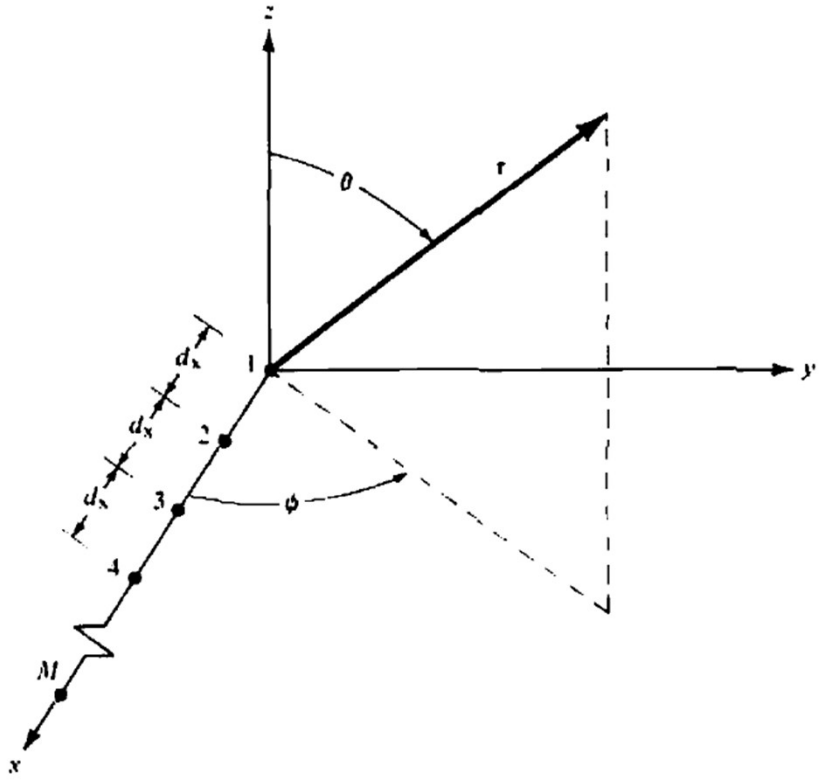


Planaarne võre

Planaarse võre võretegur

- Paiknegu lineaarse ühtlase võre elemendid teljel vahekaugustega d_x, omavaheliste faasinihetega β_x ja ergutustega I_{m1}. Võreteg on sellisel juhul:

$$AF = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)}.$$



Planaarse võre võretegur

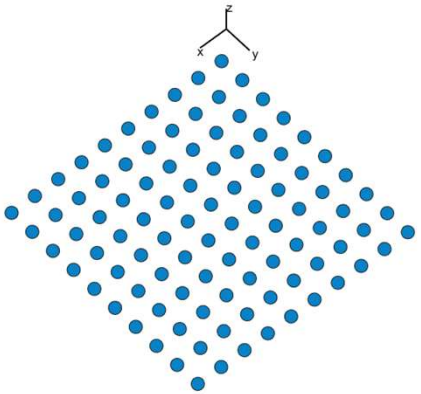
- Asetame nüüd *N* sellist võret kõrvuti, vahekaugustega d_y. Olgu iga sellise alamvõre ergutuse amplituud I_{1n} ja naabervõrede ergutus-signaalide vaheline faasierinevus β_y . Saame kogu võre kohta:

$$AF = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} \left[\sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \ x)} \right] e^{j(n-1)\left(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y\right)}$$

- Lühidalt $AF = S_{xm} \cdot S_{yn}$ kus

$$S_{xm} = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} ,$$

$$S_{yn} = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} e^{j(n-1)\left(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y\right)} .$$



Planaarse võre võretegur

- Elementide ergutuste kohta kehtib $I_{mn} = I_{m1} \cdot I_{1n}$. Kõige lihtsamal juhul on kõikide elementide ergutus sama $I_{mn} = I_0$.
- Planaarse võre normeeritud võretegur on

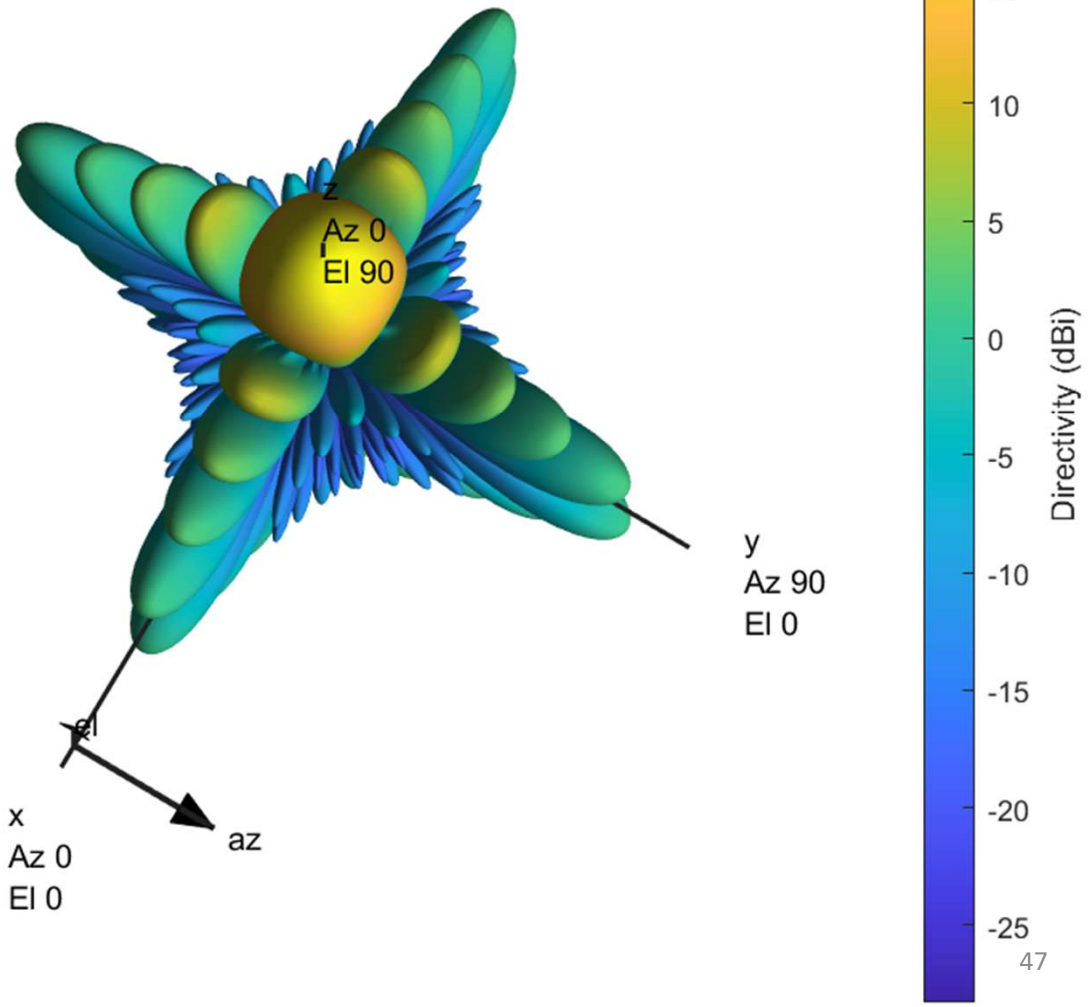
$$AF_n(\theta, \phi) = \frac{1}{MN} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi_x\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi_y\right)},$$

kus

$$\psi_x = (kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x),$$
$$\psi_y = \left(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y\right).$$

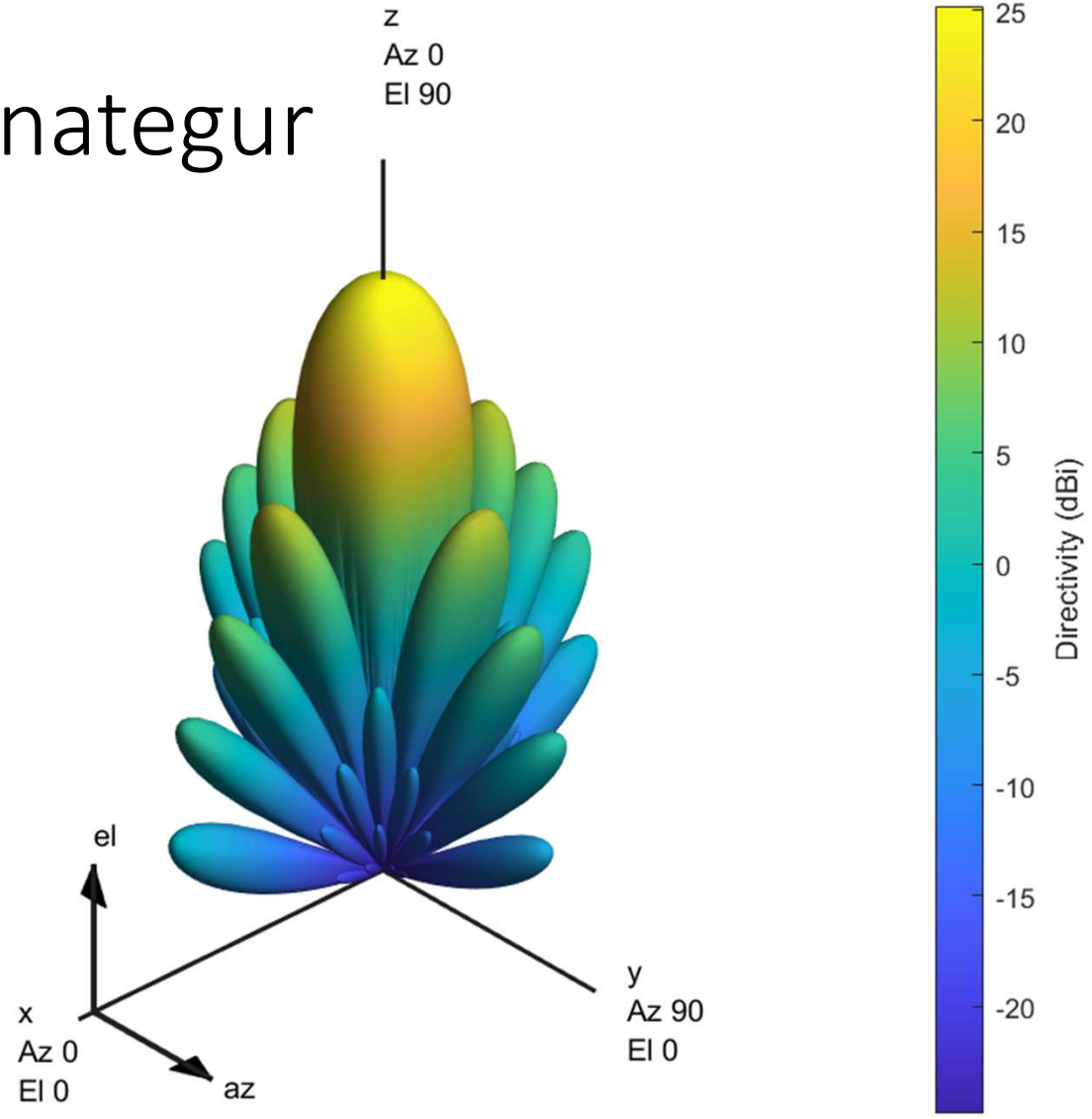
Nelinurkse võre suunategur

$N = M = 10$
$d_x = d_y = \lambda/2$
$\beta_x = \beta_y = 0°$
Isotroopsed kiirgurid



Nelinurkse võre suunategur

$N = M = 10$
$d_x = d_y = \lambda/2$
$\beta_x = \beta_y = 0°$
koosinusantennid





2D mitteühtlane võre - interferomeeter

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



LOFAR – mitteühtlane 2D võre

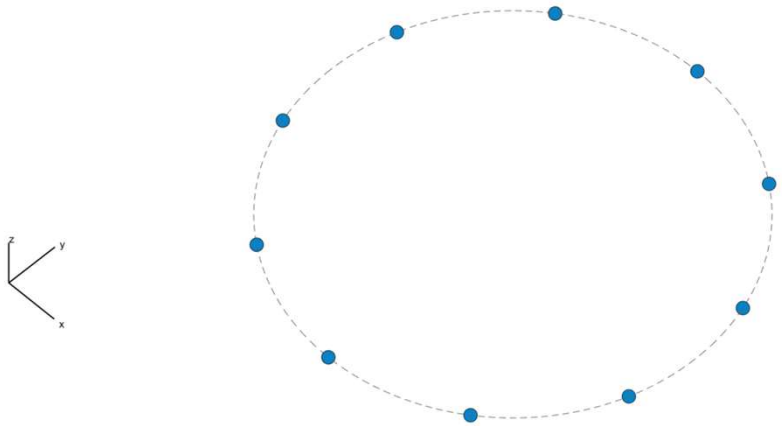
Foto: http://www.astron.nl/

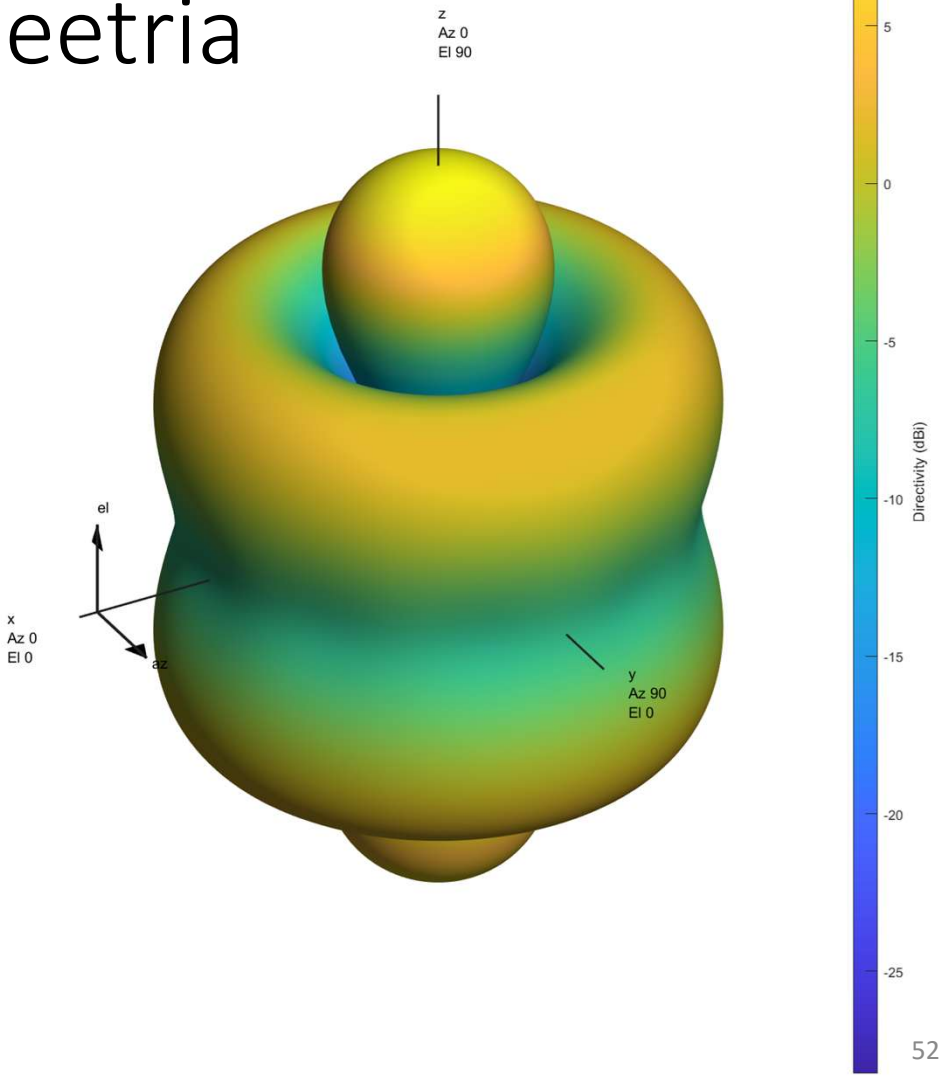


Ümmargune antennivõre

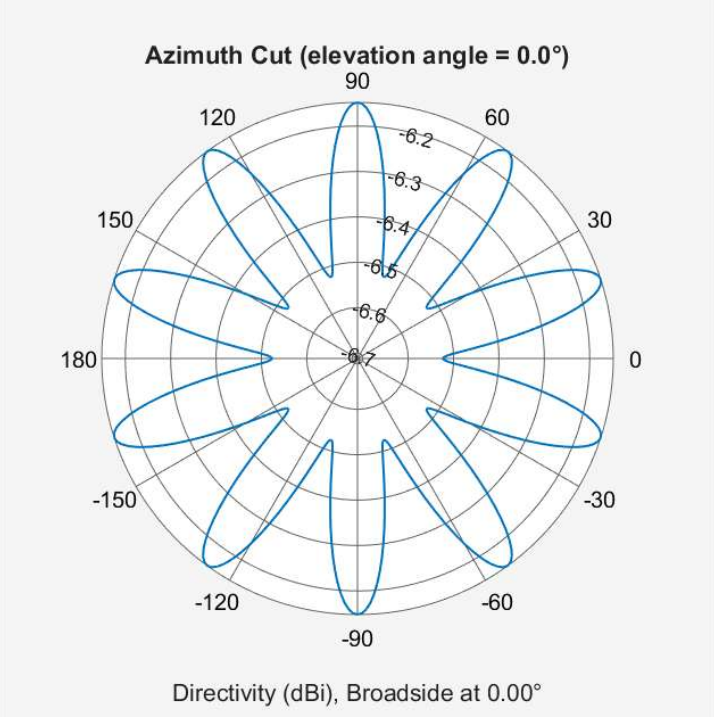
Foto: https://www.jber.jb.mil/News/News-Articles/Article/798948/silencing-the-arctic-mammoth/

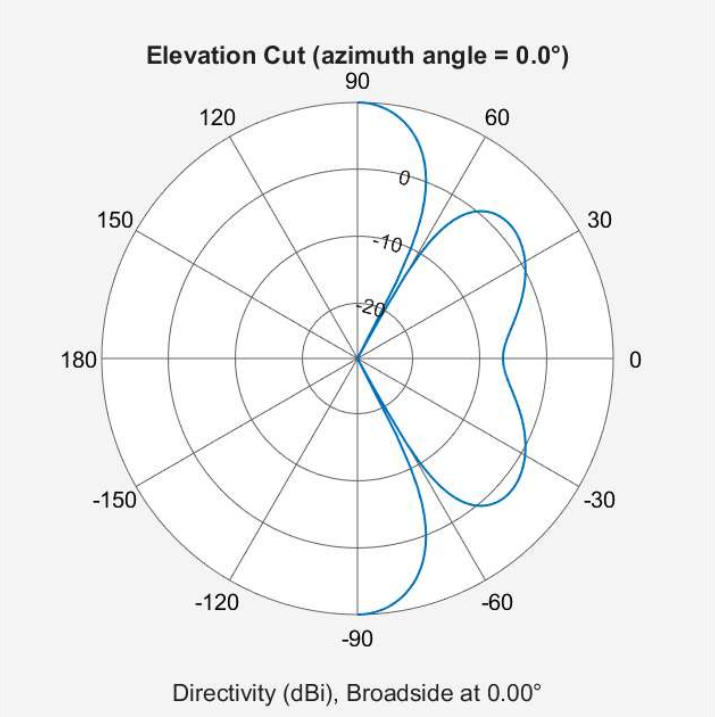
Ümmarguse võre geomeetria





Ümmarguse võre suunadiagramm

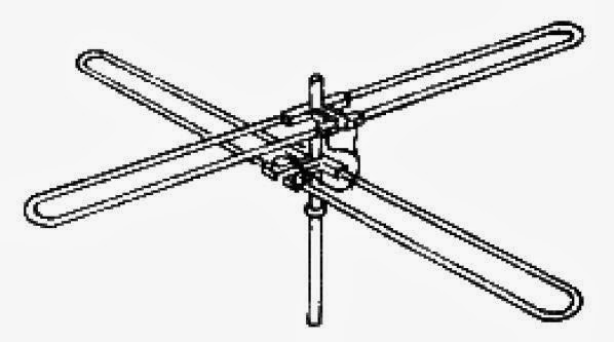


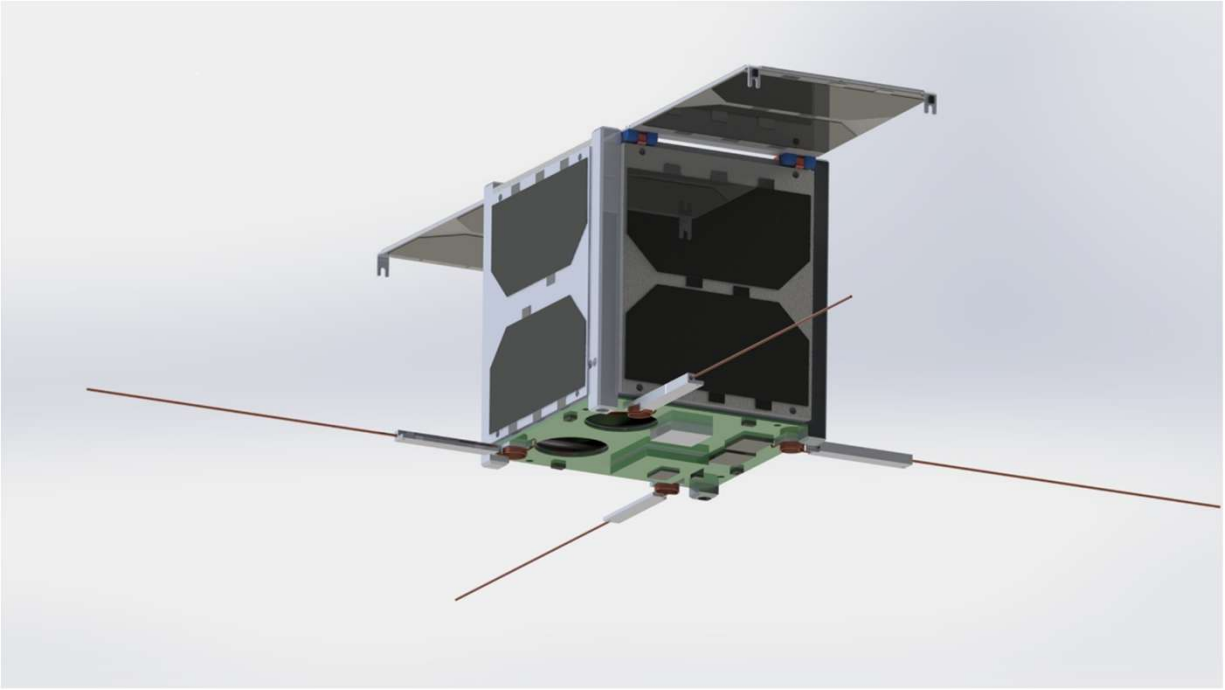




Kolmemõõtmeline võre

Turnstile antenn



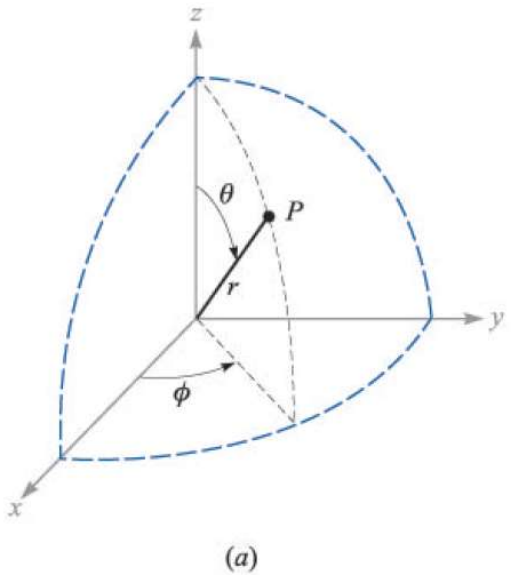


Materjalid

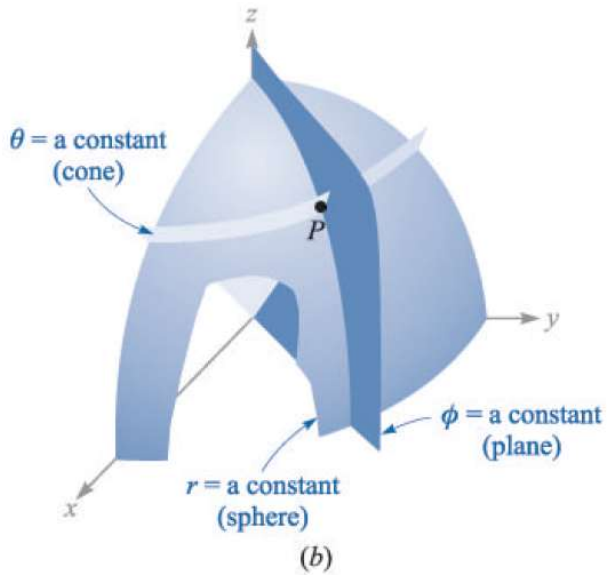
- Balanis, CA 2016, **Antenna Theory : Analysis and Design**, John Wiley & Sons
  - 6. peatükk „*Arrays: Linear, Planar, and Circular*”
- Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. **Antenna theory and Design.**
  - 8. peatükk „*Array Antennas*“
- R. Dean Straw. **The ARRL Antenna Book, 21st Edition**
  - 8. peatükk „*Multielement Arrays*“



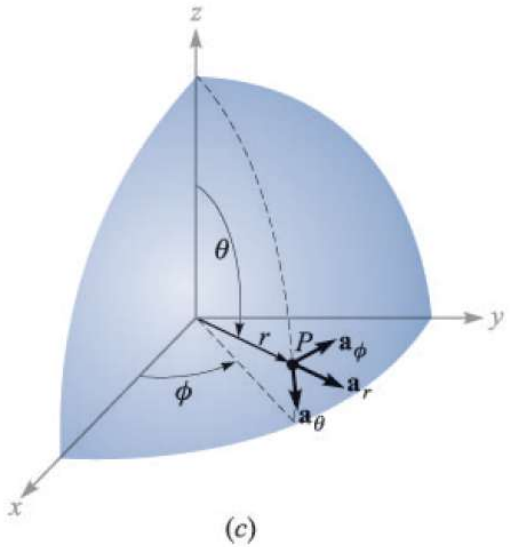
Lisa A: Sfäärilised koordinaadid



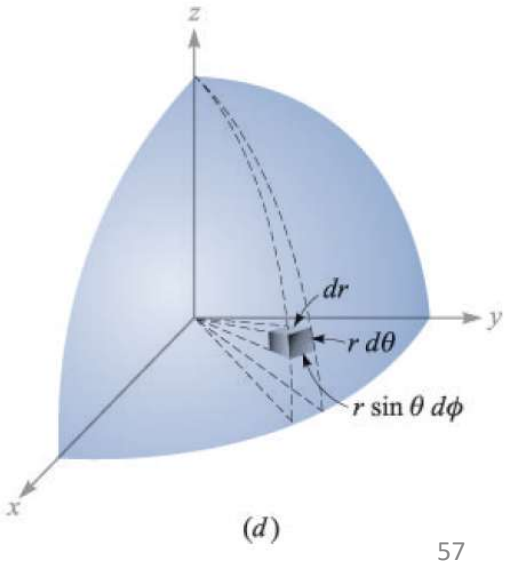
(a)



(b)



(c)



(d)

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