7. Apertuurantennid

IEE2580 – Antennid ja raadiolevi

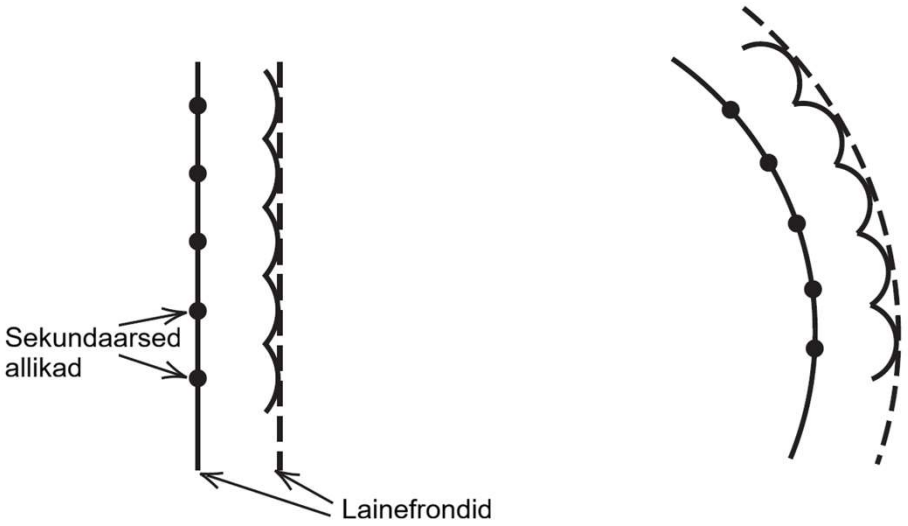
Huygensi printsiip

- Huygensi printsiibi kohaselt on lainefrondi iga punkt uue elementaarlaine allikas.
- Viimastest lähtuvad homogeenses (isotroopses) levimiskeskkonnas sfäärilised sekundaarlained.
- Kõikide elementaarlainete kohtumispaik moodustab uue lainefrondi, mis on kõigi elementaarlainete mähispind.
- Lainefrondi uue asendi määrab kõigi elementaarlainete superpositsioon.



Joonis: https://et.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens

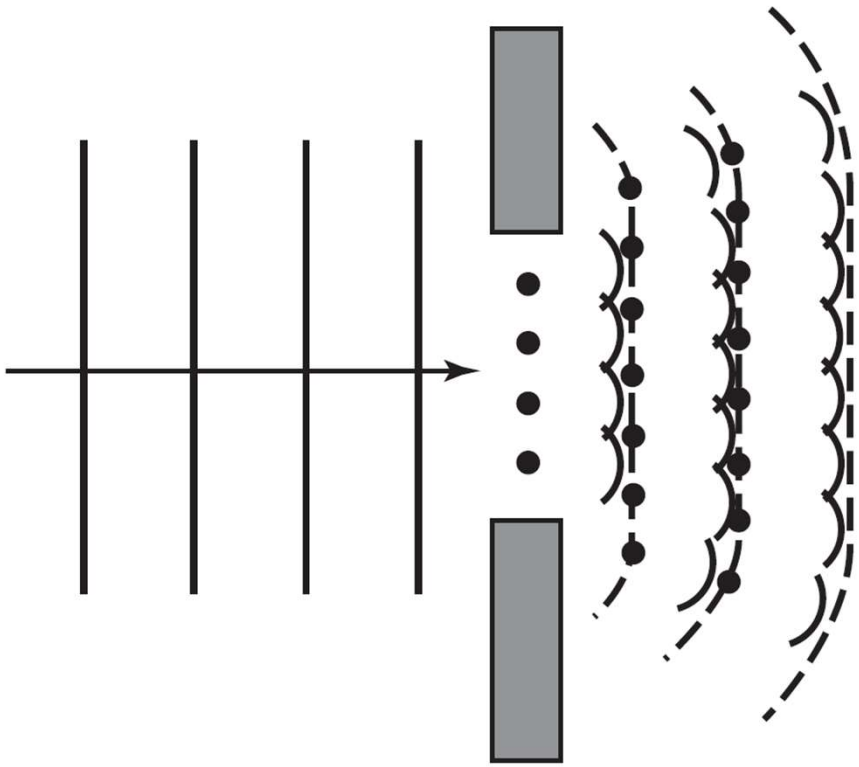
Huygensi printsiip



- Selgitab:
  - Miks elektromagnetlaine (valgus) liigub tühjas ruumis sirgjooneliselt.
  - Valguse peegeldumist.
  - Elektromagnetlaine murdumist kahe levikeskkonna piiril.
  - Elektromagnetlaine hajumist ava läbimisel ja takistuse serva taha.

Joonis: Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. Antenna theory and Design.

Huygensi printsiip



- Puudused:
  - Ei selgita miks laine levib ainult ühes suunas.
  - Kirjeldab küll difraktsiooninähtust üldiselt kuid ei suuda ennustada difraktsioonimustri tekkimist.
  - Ei arvesta laine sagedust ega polarisatsiooni.
  - Ei seleta miks laine levikiirus on erinevates keskkondades erinev.

Joonis: Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. Antenna theory and Design.



Huygensi – Fresneli printsiip

- Fresnel täiendas Huygesi printsiipi lisades:
  - Superpositsiooniprintsiibi ja arvestad ka laine faasiga.
  - Lisas sõltuvuse laine sagedusest.
  - Selgitas, miks ei teki tagurpidi kulgevat lainet (kaldetegur – *obliquity factor*).
- Arenes edasi **väljade ekvivalentsi printsiibiks** (*Field Equivalence Principle*, *Surface Equivalence Theorem*)

Joonis: https://et.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel

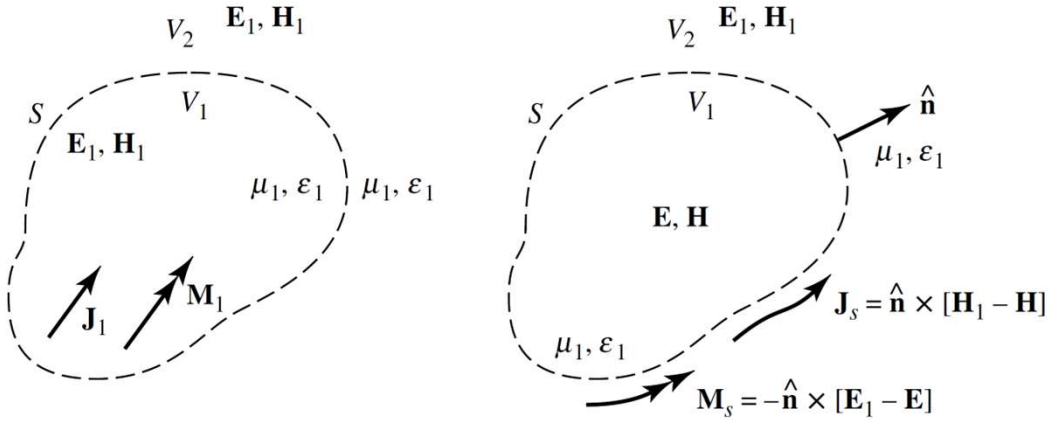
Väljade ekvivalentsi printsiip

- Tegemist on Huygens- Fresneli printsiibi edasiarendusega mille sõnastas 1936 aastal S. A. Schelkunoff.
- Printsiip põhineb **unikaalsuse teoreemil** (*uniqueness theorem*): Väljad kadudega keskkonnas on üheselt määratud allikatega selles regioonis pluss elektri- või magnetvälja tangentsiaal-komponendiga keskkonna piiril või ühega üle osa piirist ja teisega üle ülejäänud osa keskkonna piirist.



Foto: O. N. Maslov and A. V. Ryabushkin Sergey Aleksandrovich Schelkunoff and his Contribution to Applied Electrodynamics and the Antenna Theory.

Väljade ekvivalentsi printsiip



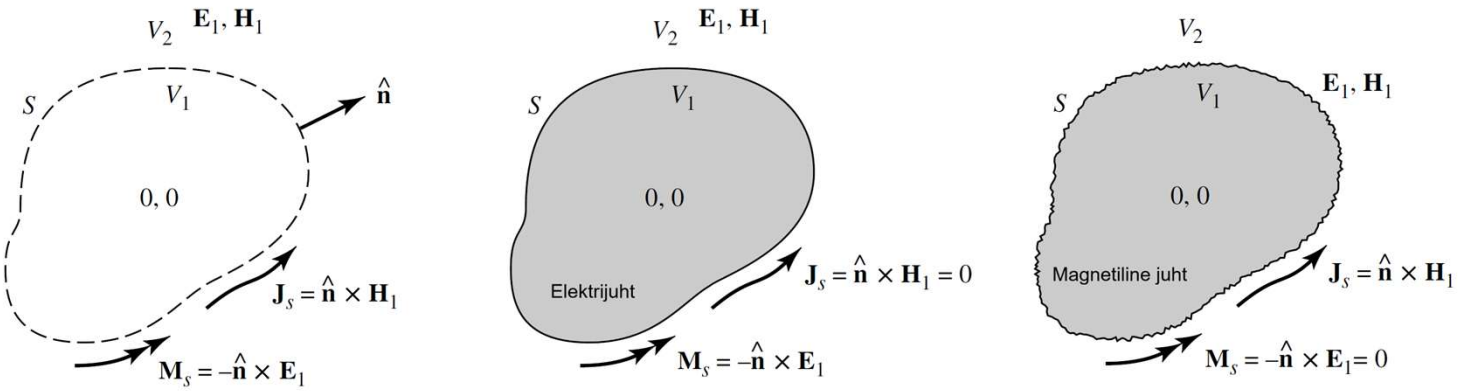
- Meid huvitavad väljad $\mathbf{E}_1$ ja $\mathbf{H}_1$.
- Neid põhjustavad allikad ($\mathbf{J}_1$ ja $\mathbf{M}_1$) pinnaga *S* piiratud ruumalas *V*.
- Täpselt samad välised väljad tekivad kui pinna *S* sisesed allikad asendada elektri- ja magnetvoolude tihedustega ($\mathbf{J}_s$ ja $\mathbf{M}_s$) *S*-i pinnal:

$$\mathbf{J}_s = \hat{\boldsymbol{n}} \times [\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}],$$
$$\mathbf{J}_s = -\hat{\boldsymbol{n}} \times [\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}].$$

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

Väljade ekvivalentsi printsiip

- Kuna pinna *S* sisesed väljad ei ole enam olulised siis võib neile anda meelevaldsed väärtuse, kaasarvatud nullid (**Love'i ekvivalentsi printsiip**).



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

Maxwell-Heaviside võrrandid

- Diferentsiaalsel kujul:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v;$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t};$$
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t};$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

- Torkab silma teatav ebasümmeetria.
- Tingitud magnetlaengute (magnetiline monopool) puudumisest.
- Millegi mitte eksisteerimine ei tähenda, et see ei võiks siiski kasulik olla.

Magnetvool

- **Magnetvool** (*magnetic current*) *k* on magnetiliste monopolide (teoreetiline) suunatud liikumine.
- Magnetvoolu mõõtühikuks on volt [V].
- Sarnaselt elektrivoolu tihedusele **J** (A/m^2) saab defineerida ka magnetvoolu tiheduse **M** (V/m^2).
- Kuna **M** –iga tähistatakse ka magnetiseeritust (*magnetization*) siis magnetvoolu tiheduse tähistamiseks kasutatakse ka sümbolit $\mathfrak{M}$ või tähistust $\mathbf{J}_m$.

Elektriline vektorpotentsiaal

- Magnetiline vektorpotentsiaal (Wb/m):

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathbf{J} dv}{R} \ .$$

- Magnetvoolu tiheduse kaudu saab nüüd sarnaselt leida ka **elektrilise vektorpotentsiaali** (C/m):

$$\mathbf{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathfrak{M} dv}{R} .$$

Elektri- ja magnetväljade leidmine

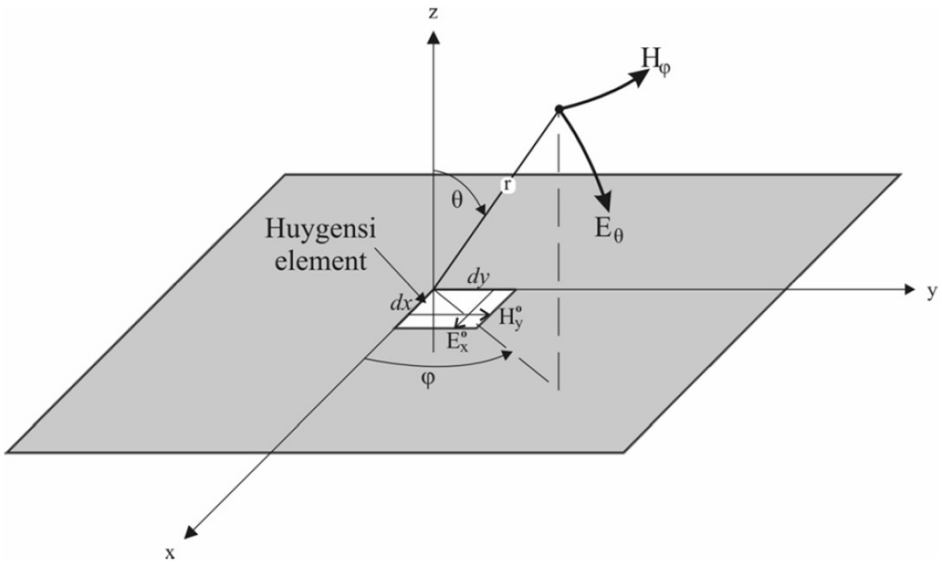
- Teades elektri- ja magnetvoolude tihedusi **J** ja saame $\mathfrak{M}$ leida magnetilise- ja elektrilise vektorpotentsiaali väärtused **A** ja **F**.
- Viimastest saame omakorda nüüd leida elektri- ja magnetvälja tugevused:

$$\mathbf{E} = -\mathrm{j}\omega\mathbf{A} - \frac{\mathrm{j}}{\omega\mu\varepsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) - \frac{1}{\varepsilon}\nabla\times\mathbf{F}.$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu}\nabla\times\mathbf{A} - \mathrm{j}\omega\mathbf{F} - \frac{\mathrm{j}}{\omega\mu\varepsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{F}).$$

Huygensi element

- Traatantennide ehituskiviks on lõputult lühikene vooluga juhe – elementaarne kiirgur.
- Vastavaks analoogiks apertuurantennide juures on elementaarne tasapinnaline antenn ehk **Huygensi element**.



Joonis: Sulev Reisberg

Huygensi element

- Elektrivälja komponendid:

$$E_\theta = \mathrm{j}\frac{E_x^0 \cdot dx \cdot dy \cdot k \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{4\pi r}\cos\varphi\,(\cos\theta + 1),$$

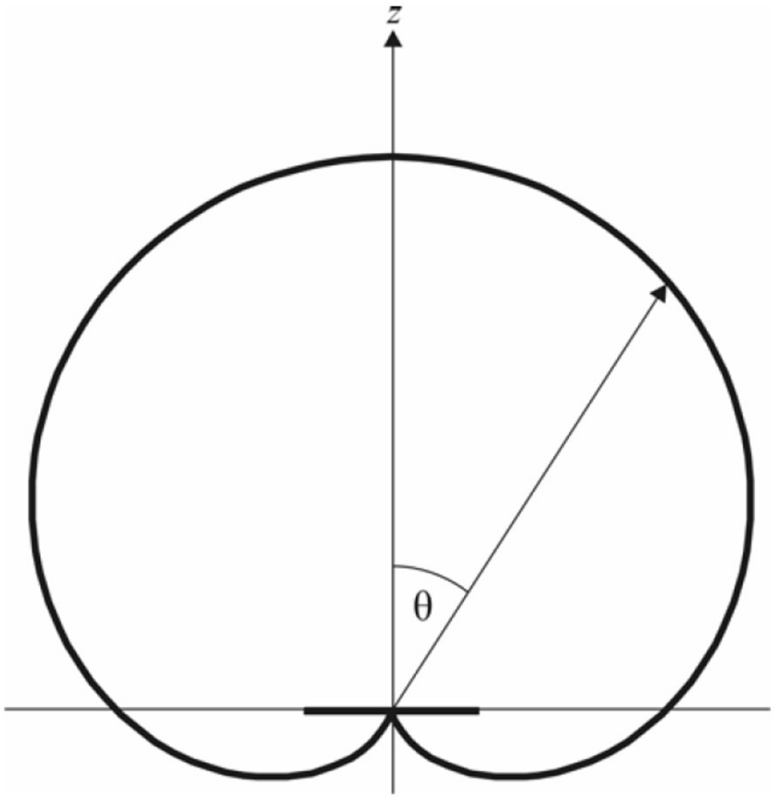
$$E_\varphi = -\mathrm{j}\frac{E_x^0 \cdot dx \cdot dy \cdot k \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{4\pi r}(\sin\theta + \sin\varphi\cos\theta),$$

- Magnetvälja komponendid aga:

$$H_\varphi = \frac{E_\theta}{\eta}, H_\theta = -\frac{E_\varphi}{\eta}.$$

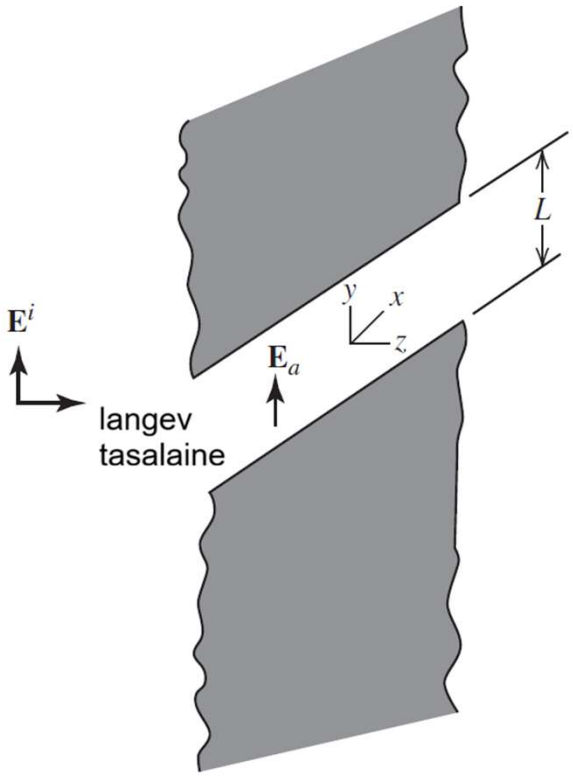
Huygensi element

- Huygensi elemendi elektrivälja kuju on kardioid.
- Sama siis ka magnetvälja kuju kohta.



Joonis: Sulev Reisberg

Pilu juhtivas tasandis



- Elektrivälja tugevus:

$$\mathbf{E}_a = \begin{cases} E_0 \mathbf{a}_y, |y| \leq \frac{L}{2}, z = 0 \\ 0, \quad \text{mujal} \end{cases}$$

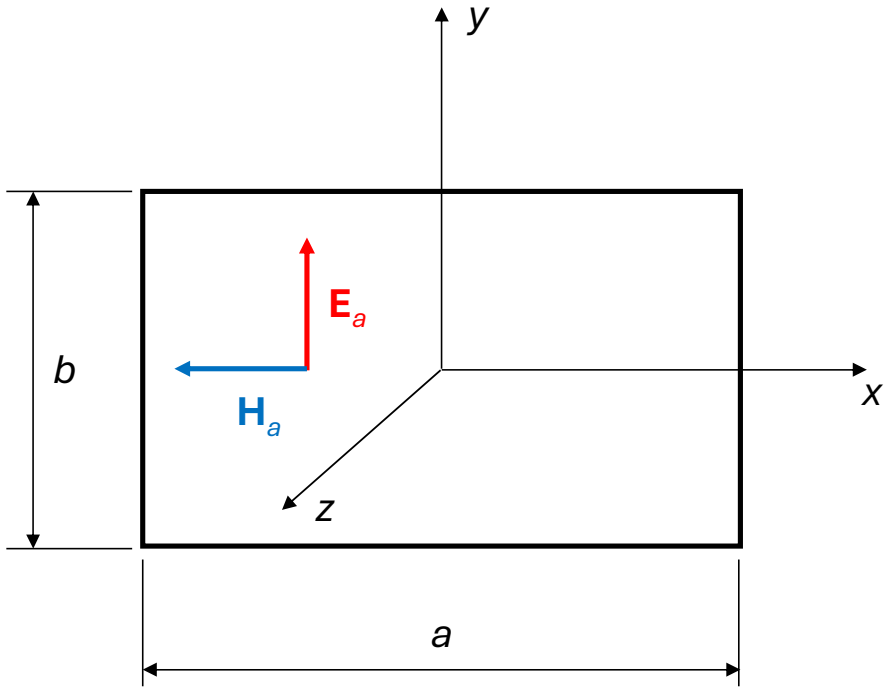
Joonis: Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. Antenna theory and Design.

Ühtlane nelinurkne apertuur

- Lõputus juhtivas tasandis ($z = 0$) on nelinurkne ava (apertuur) laiusega a (x –telje sihis) ja kõrgusega b (y – telje sihis).
- Ava on ühtlaselt valgustatud, elektrivälja tugevus selles on:

$$\mathbf{E}_a = E_0 \mathbf{a}_y, \qquad |y| \le \frac{b}{2}, \qquad |y| \le \frac{b}{2}.$$

- Kuna tegemist on juhtiva tasandiga siis kõikjal on **J** = 0.

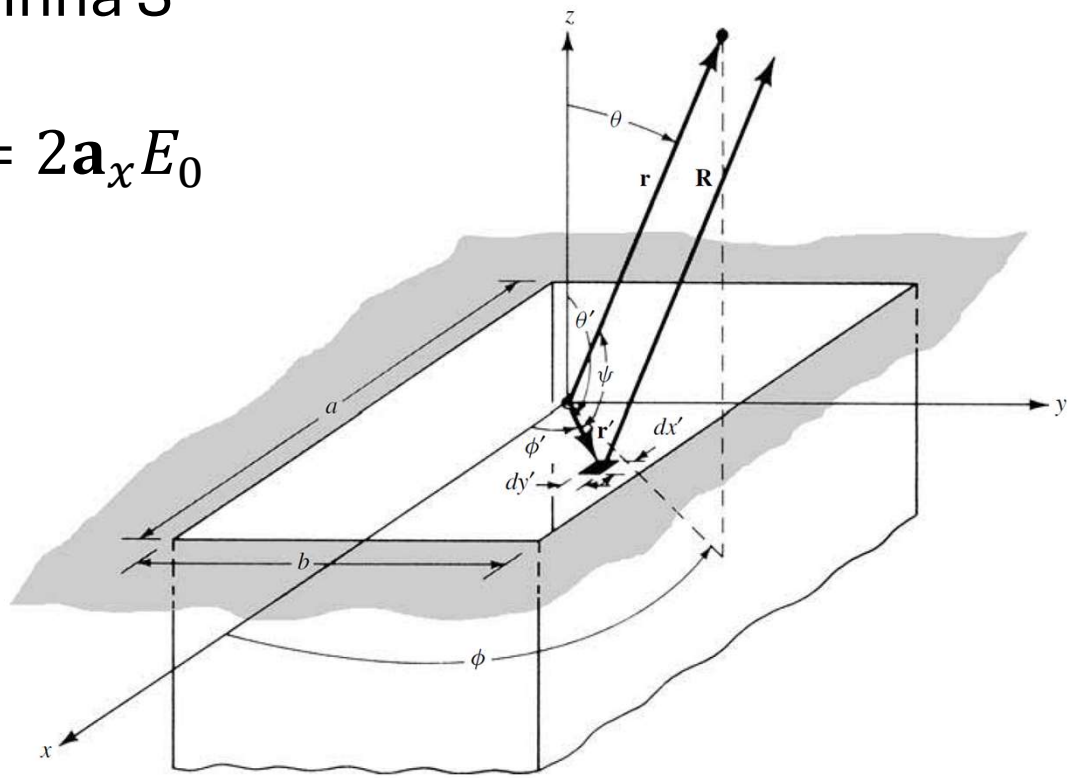


Ühtlane nelinurkne apertuur

- Magnetvoolu tihedus üle kinnise pinna *S* on apertuuri kohal

$$\mathfrak{M}_s = -2\mathbf{a}_n \times \mathbf{E}_a = -2\mathbf{a}_z \times \mathbf{a}_y E_0 = 2\mathbf{a}_x E_0$$

ning null kõikjal mujal.



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

Ühtlase apertuuri elektriväli

- Kaugväljas

$$E_\theta = \mathrm{j}\frac{abkE_0\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{2\pi r}\left[\sin\varphi\left(\frac{\sin X}{X}\right)\left(\frac{\sin Y}{Y}\right)\right],$$

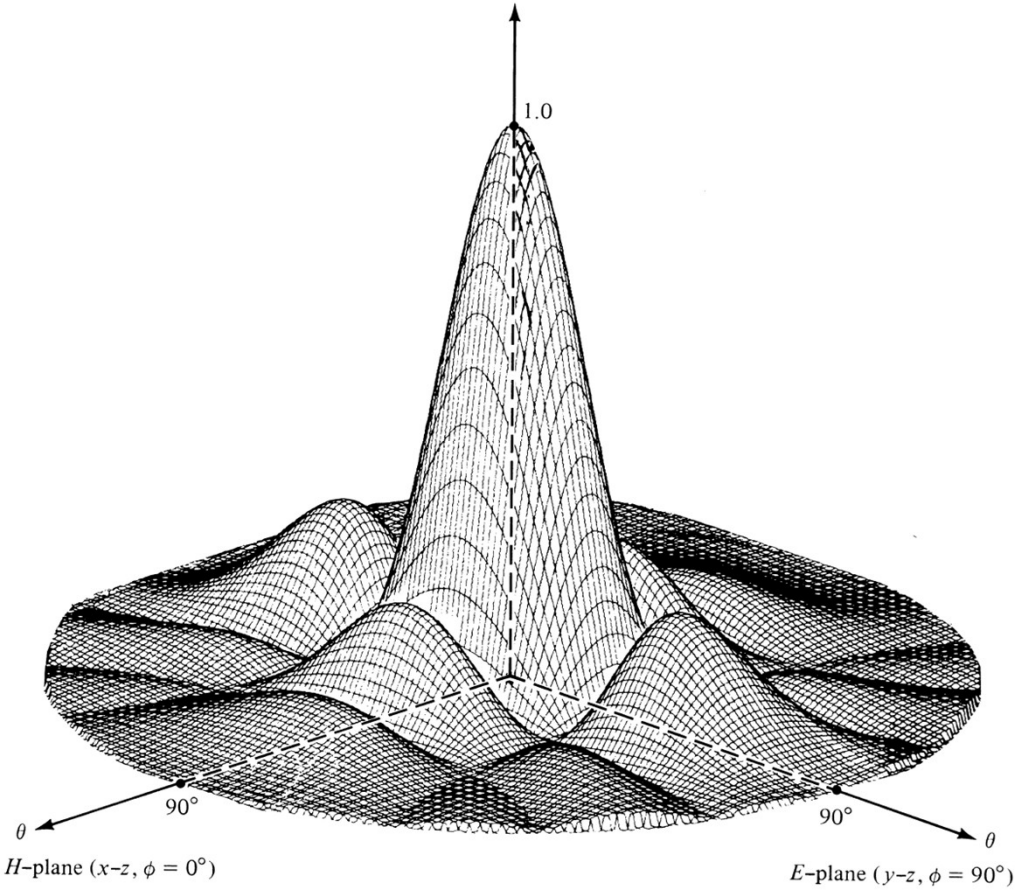
$$E_\varphi = \mathrm{j}\frac{abkE_0\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{2\pi r}\left[\cos\theta\cos\varphi\left(\frac{\sin X}{X}\right)\left(\frac{\sin Y}{Y}\right)\right],$$

kus

$$X = \frac{ka}{2}\sin\theta\cos\varphi\,,$$

$$Y = \frac{kb}{2}\sin\theta\sin\varphi\,.$$

Ühtlase apertuuri elektriväli



- Ülejäänud välja komponendid:

$$E_r = 0,$$
$$H_r = 0,$$
$$H_\theta = -\frac{E_\varphi}{\eta},$$
$$H_\varphi = \frac{E_\theta}{\eta}.$$

- Suunategur:

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} ab = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_f.$$

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

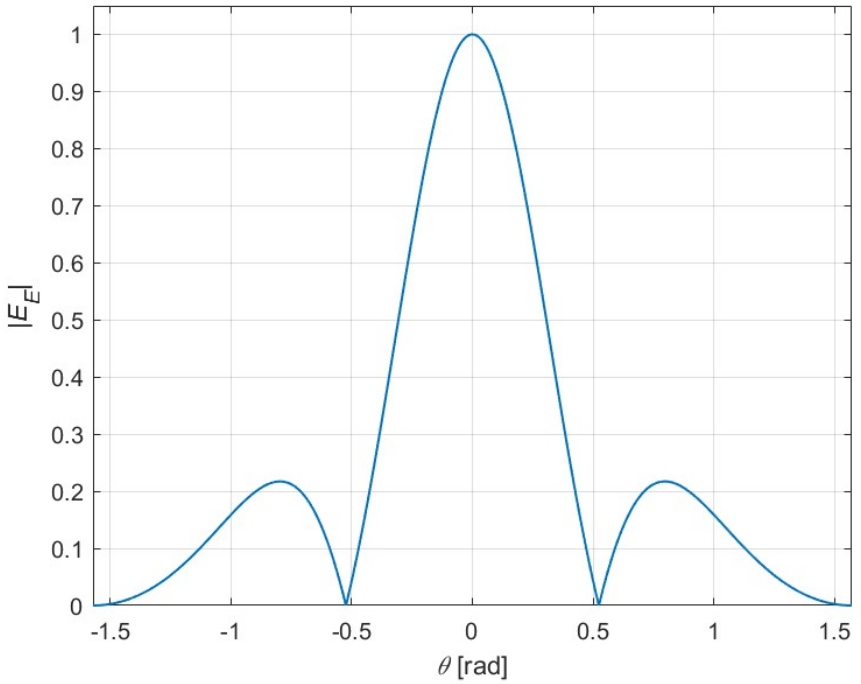
Lõige E-tasandiga

- E-tasandil ($\varphi = \pi/2$):

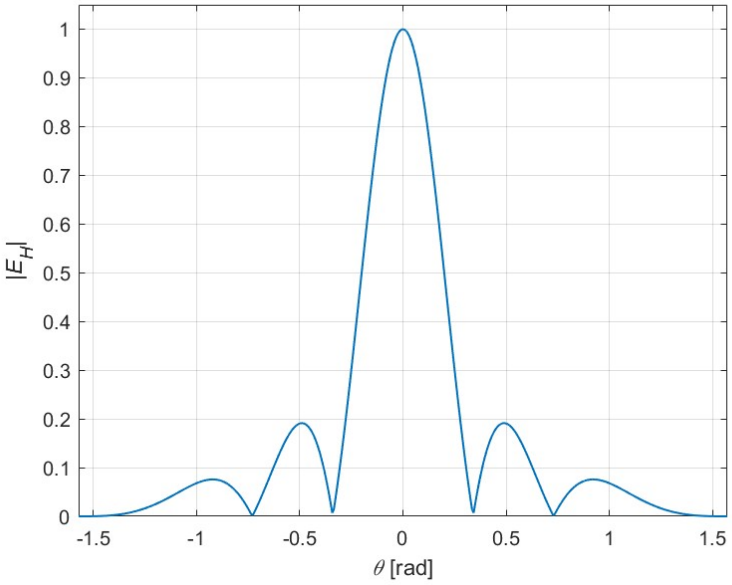
$$E_\theta = \mathrm{j}\frac{abkE_0\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{2\pi r}\cdot\frac{\sin\left(\frac{kb}{2}\sin\theta\right)}{\frac{kb}{2}\sin\theta}.$$

- Suunadiagrammi pealehe laius -3 dB nivool (HPBW):

$$\theta_{-3\mathrm{dB}} = 0{,}886\frac{\lambda}{b}.$$



Lõige H-tasandiga



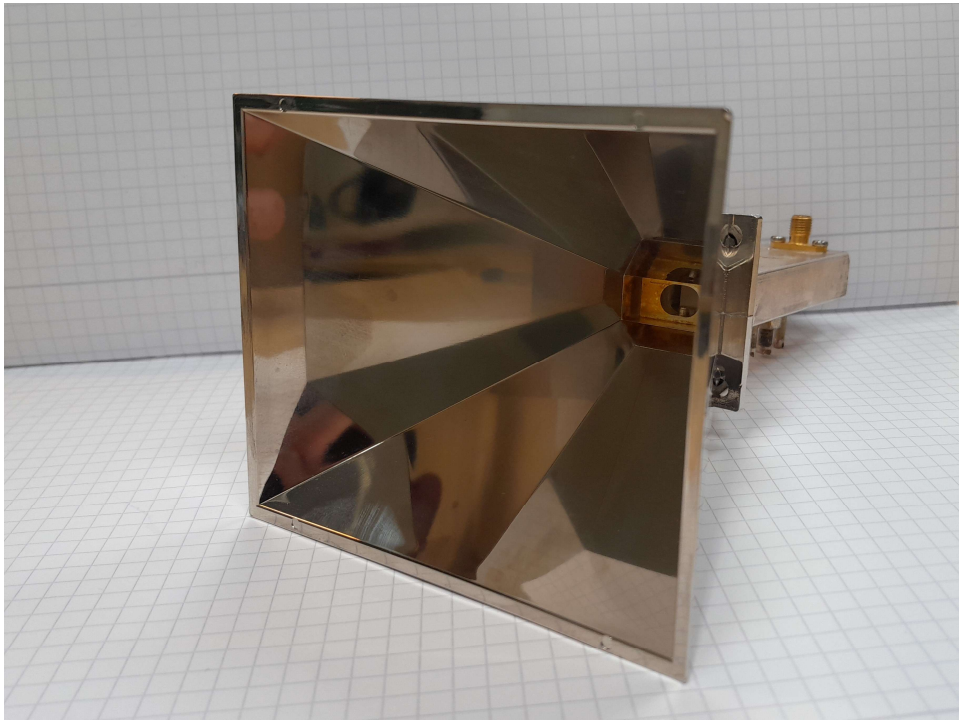
- H-tasandil ($\varphi = 0$):

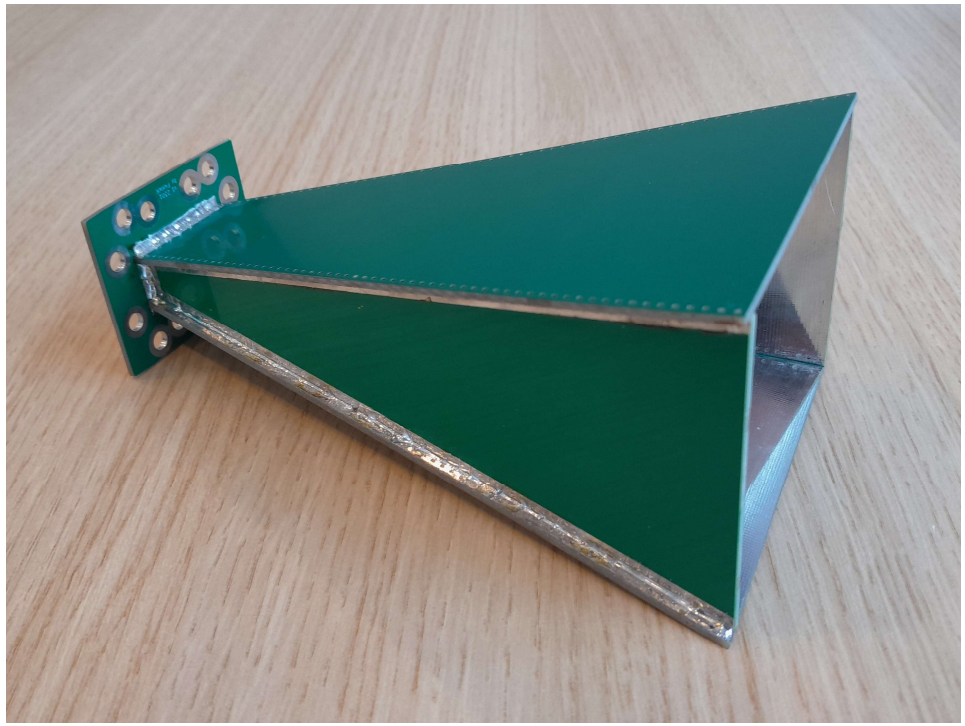
$$E_\varphi = \mathrm{j}\frac{abkE_0\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{2\pi r}\cdot\frac{\sin\left(\frac{ka}{2}\sin\theta\right)}{\frac{ka}{2}\sin\theta}\cos\theta\,.$$

- Suunadiagrammi pealehe laius -3 dB nivool

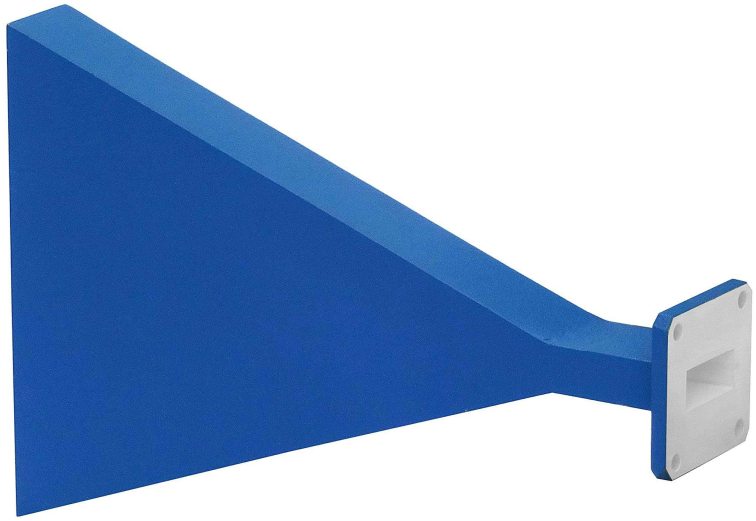
$$\theta_{-3\mathrm{dB}} = 0{,}886\frac{\lambda}{a}.$$

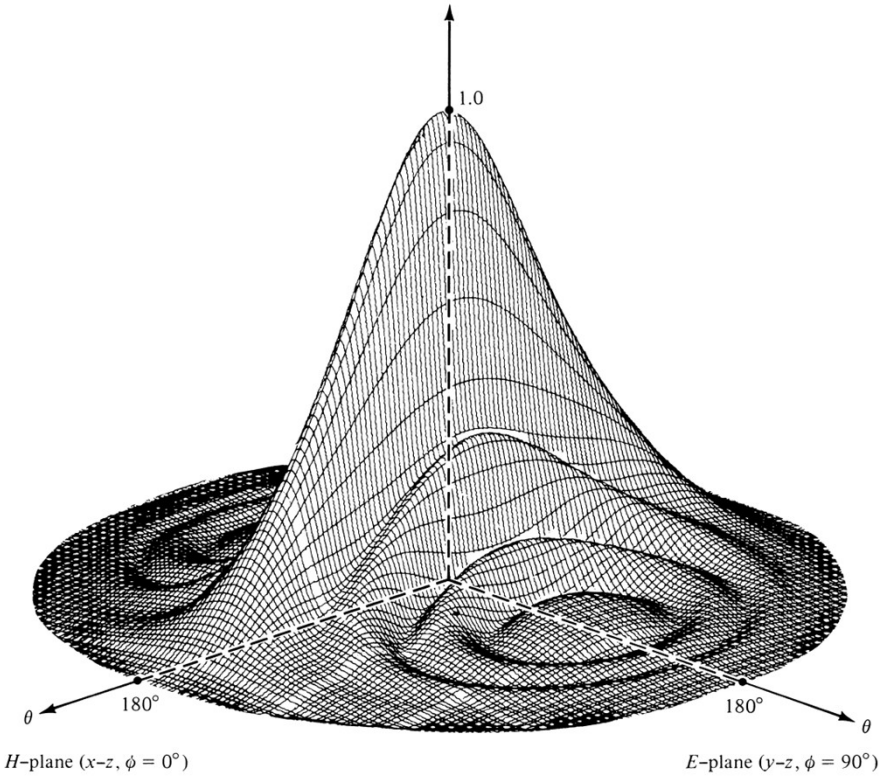
Ruuporantenn (*Horn Antenna*)





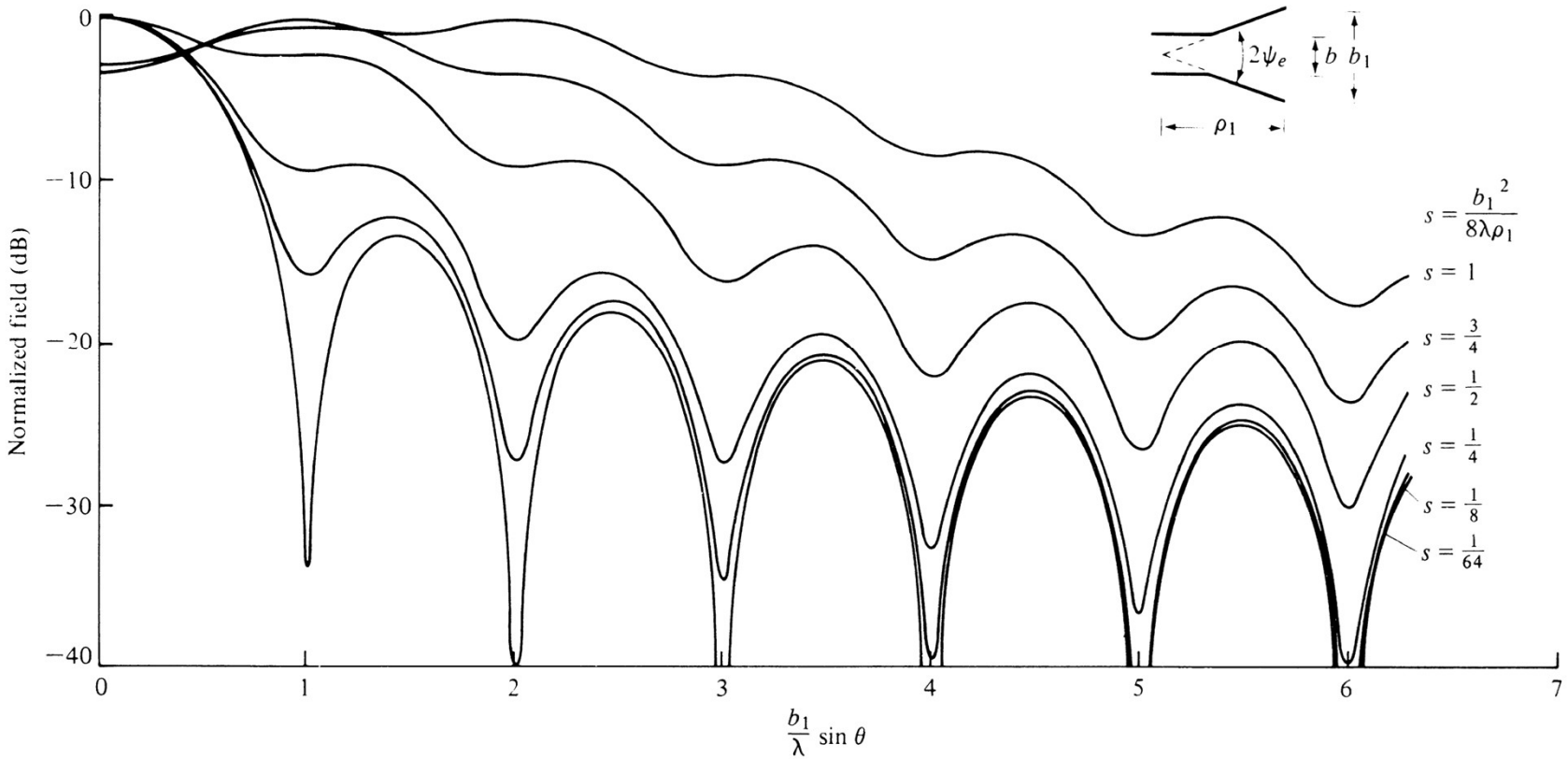
E-tasandi ruupor





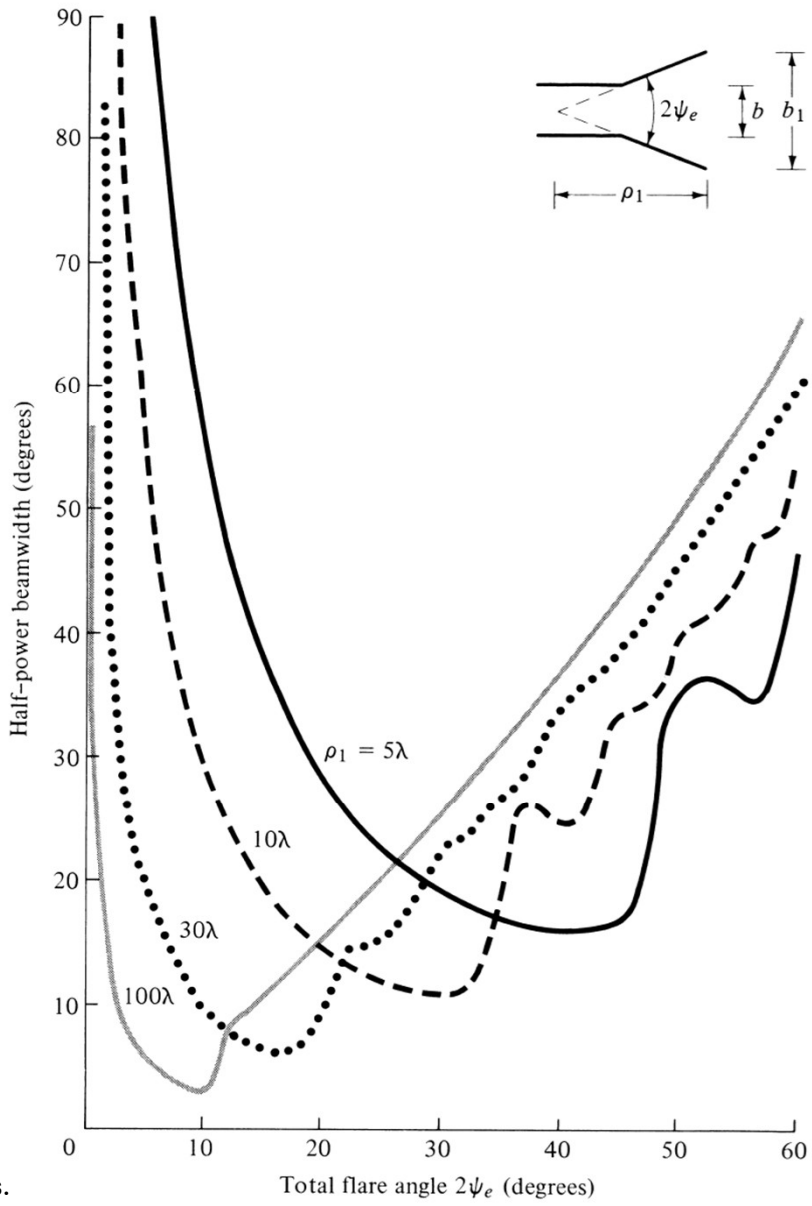
Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

E-tasandi ruupori suunadiagramm



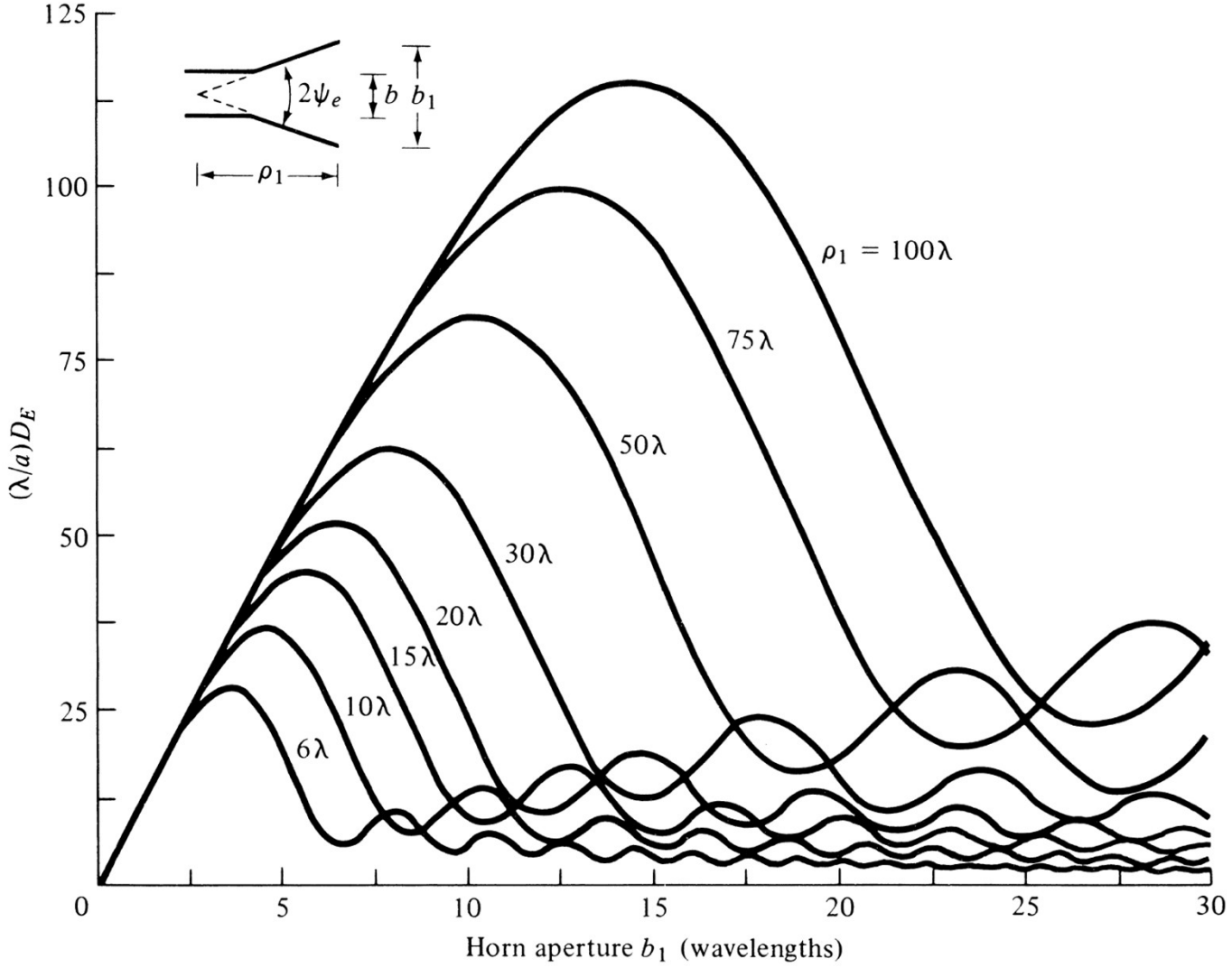
Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

E-tasandi ruupori suunadiagrammi pealehe laius



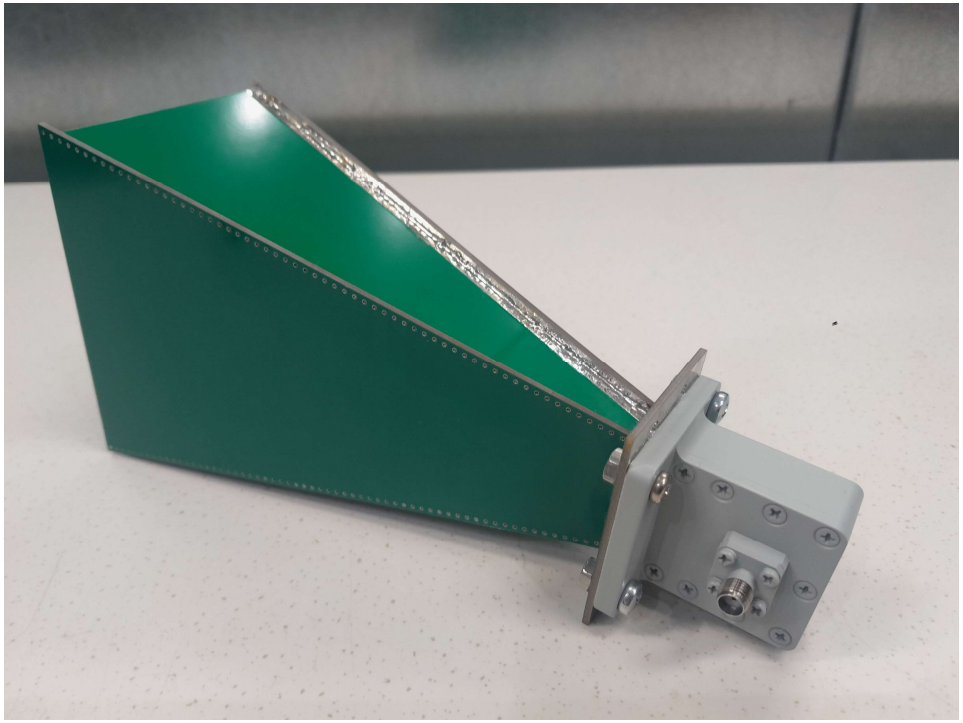
Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

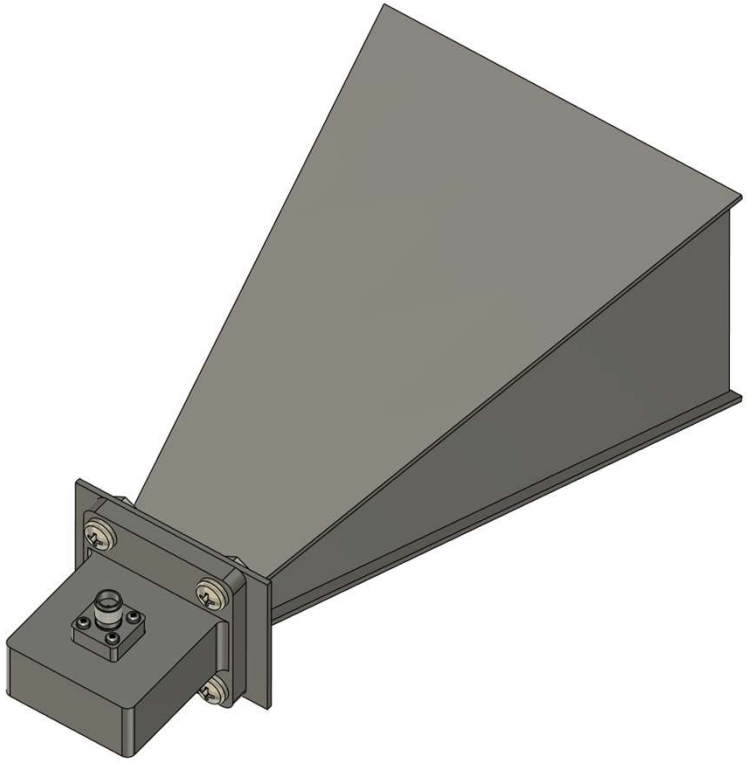
E-tasandi ruupori suunategur



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

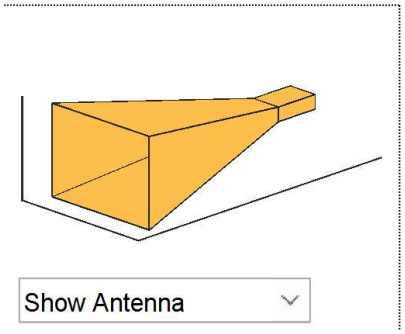
Püramiidikujuline ruuporantenn

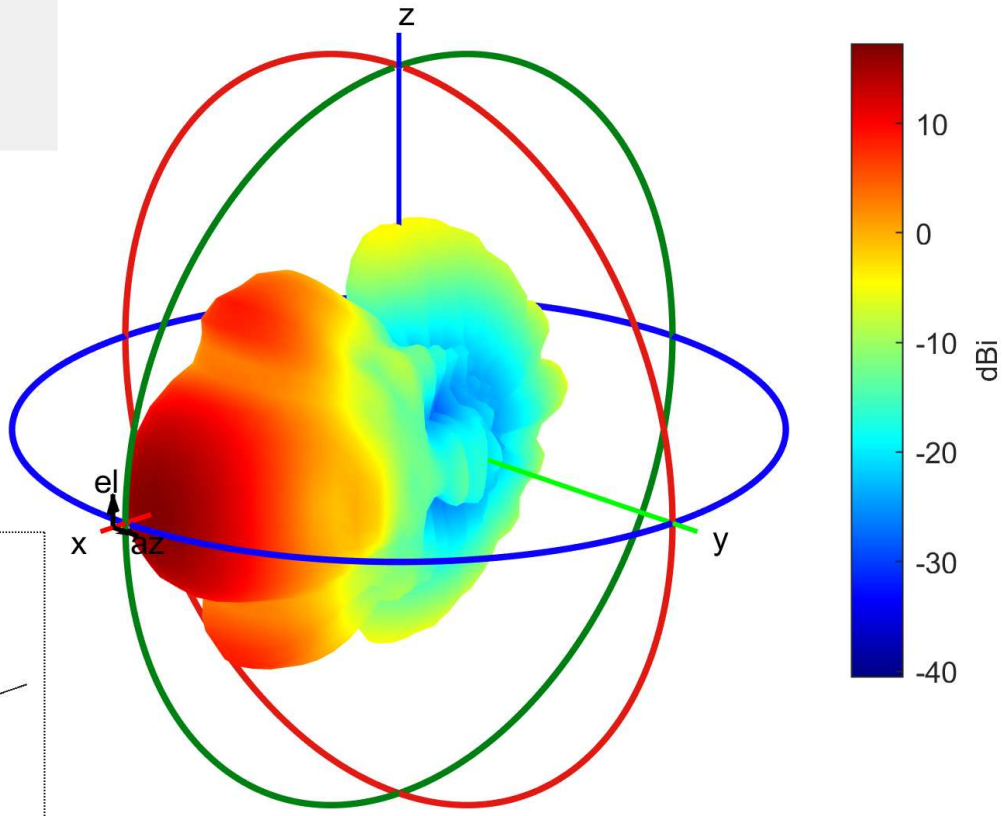




Ruuporantenni suunadiagramm

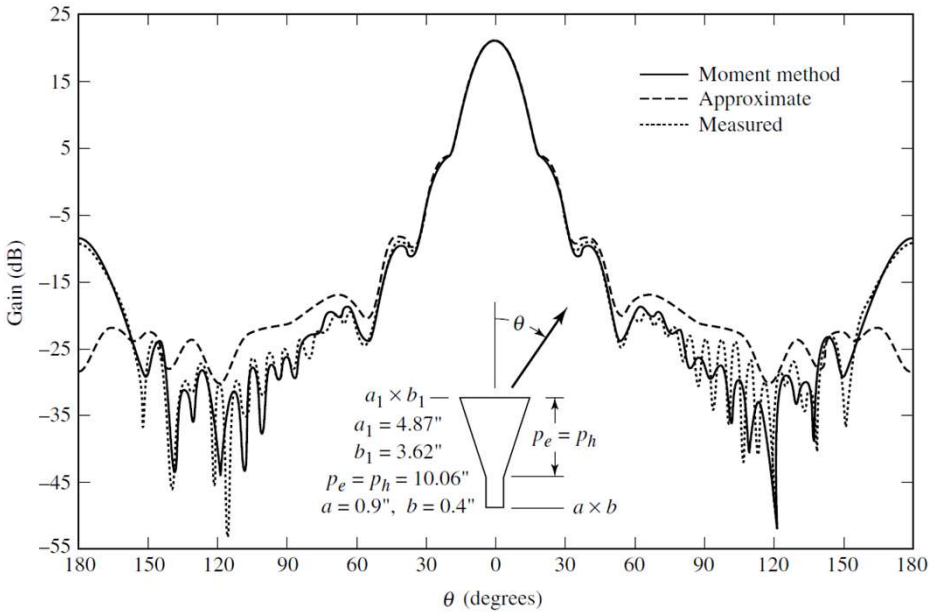
Output	: Directivity
Frequency	: 10.25 GHz
Max value	: 17.3 dBi
Min value	: -40.6 dBi
Azimuth	: [-180° , 180°]
Elevation	: [-90° , 90°]



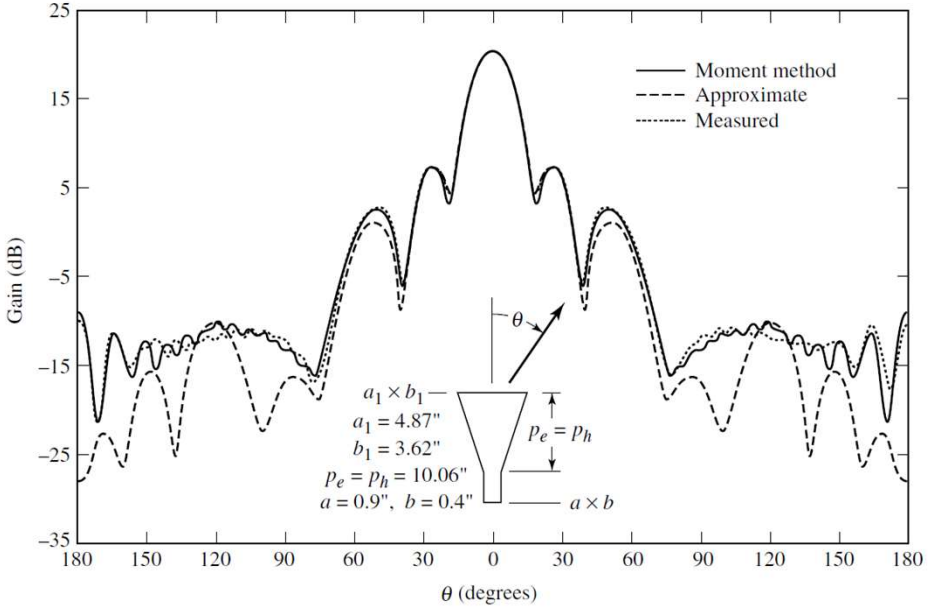


Ruuporantenni suunadiagramm

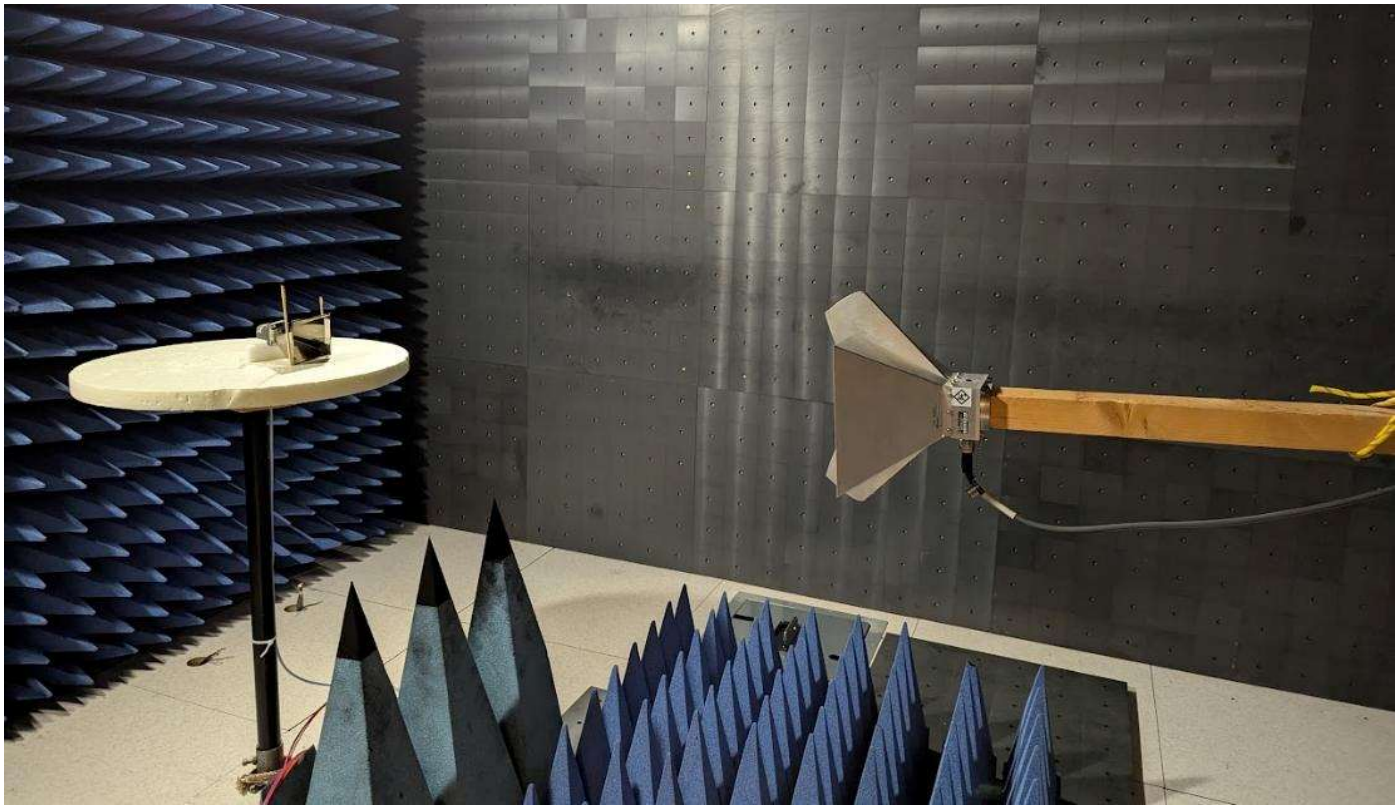
H-tasand (10 GHz)



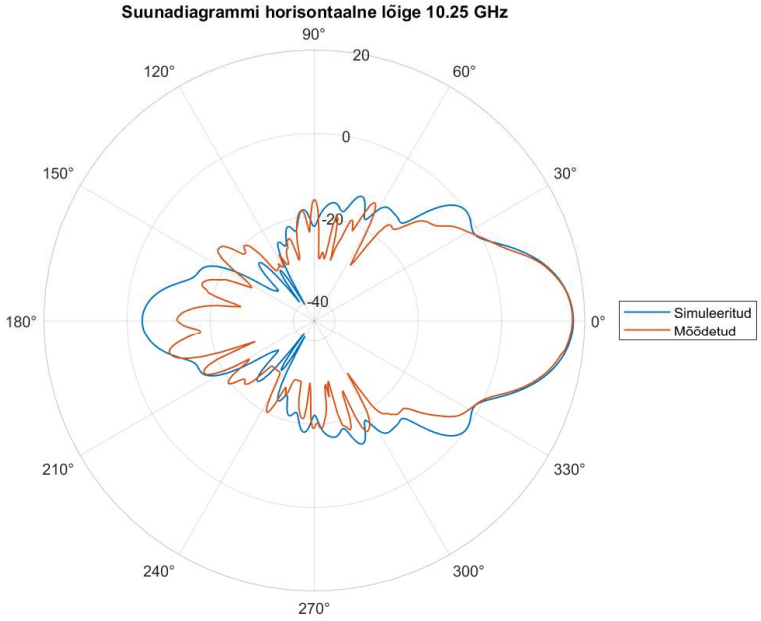
E-tasand (10 GHz)

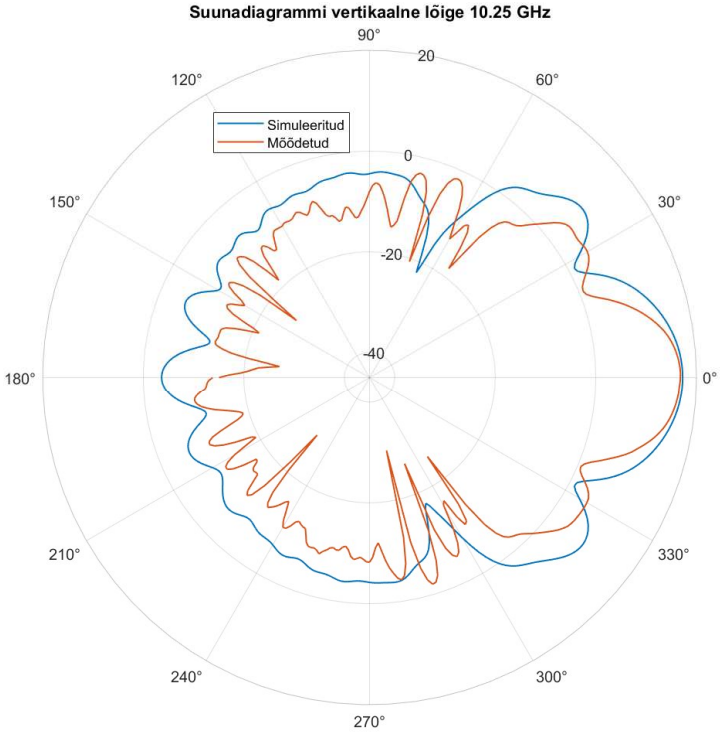


Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.



Ruuporantenni suunadiagramm

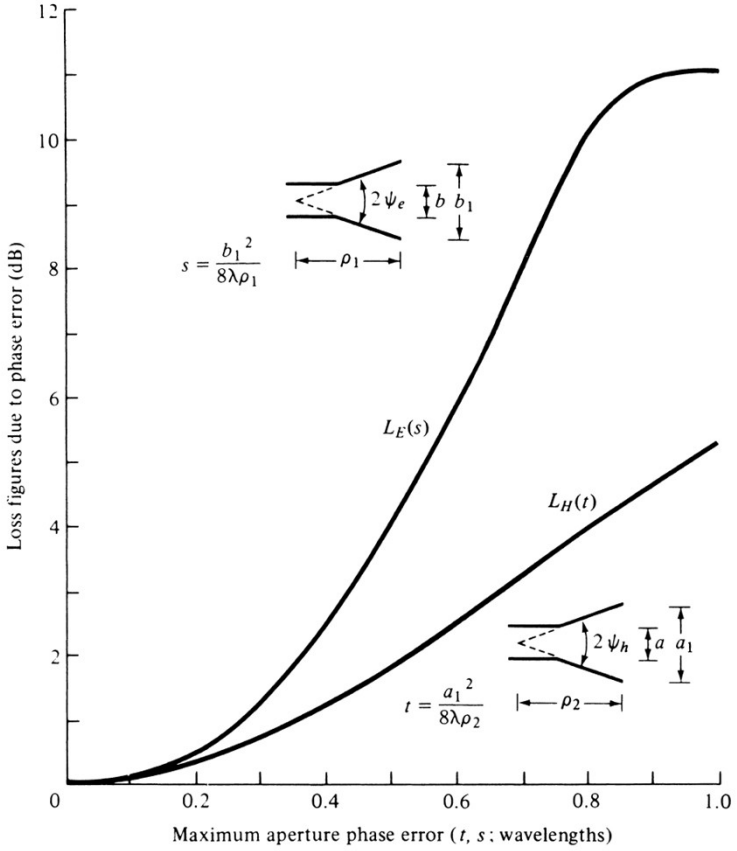




Püramiidikujulise ruuporantenni suunategur

- Püramiidikujulise ruuporantenni ligikaudne suunategur:

$$D = 10\left[1{,}008 + \log\left(\frac{a_1 b_1}{\lambda^2}\right)\right] - L_e - L_h$$



Joonis: W. C. Jakes, in H. Jasik (ed.), Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, 1961

Kooniline ruuporantenn



- Sagedusriba: 30 – 40 GHz.
- Võimendus: 22 dBi
- Pealehe laius:
  - E-tasandil 10 - 18°
  - H-tasandil 9,8 - 14°
- Hind: 3800 $

Foto: https://urf-us.com/collections/antennas/products/30-40ghz-dual-polarized-quad-ridged-conical-horn-antenna?variant=63560988066161

Laineline ruuporantenn



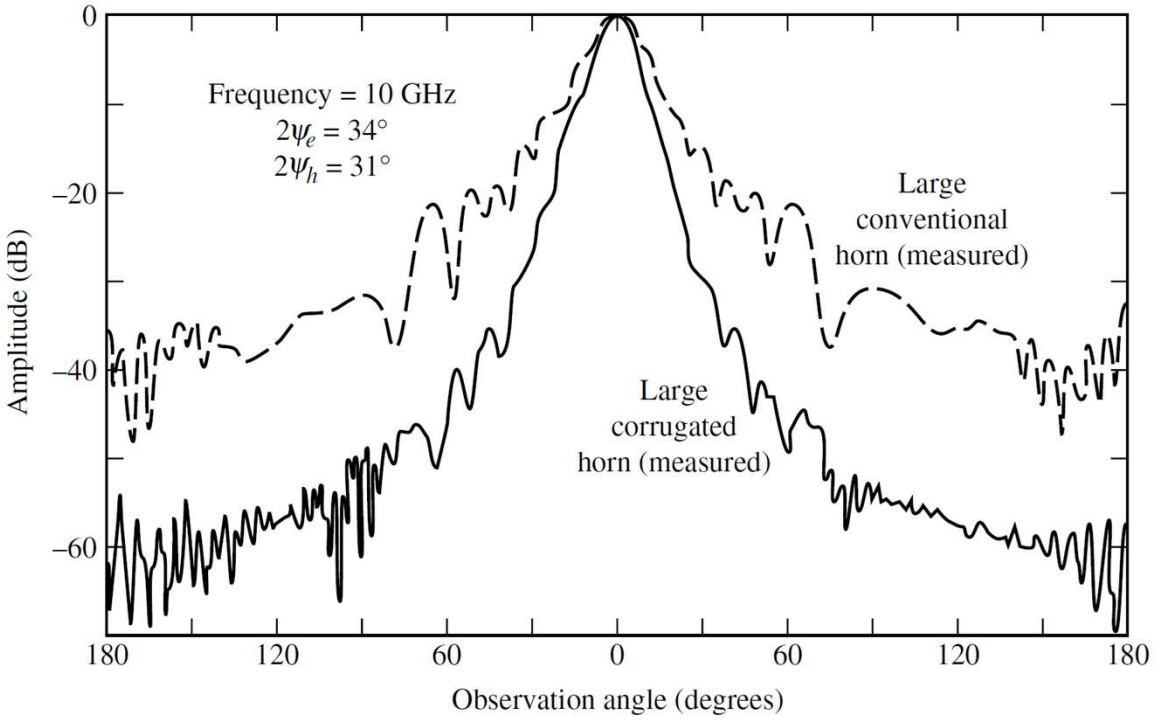


Foto: https://microwaveeng.com/product/corrugated-conical-horn-antennas/ Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

Näide – R&S HF907

- Sagedusriba: 0,8 – 18 GHz.
- Võimendus: 5 - 14 dBi
- Pealehe laius:
  - E-tasandil 35 - 90°
  - H-tasandil 25 - 95°
- Hind: 4750 EUR



Andmeleht: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/specifications/3609_9640_22/HF907_dat-sw_en_3609-9640-22_v0100_print.pdf



Reflektorantennid



Tehnikaülikooli Maajaama 5 m parabool

Foto: https://geenius.delfi.ee/artikkel/120465104/taltech-tahab-hakata-satelliitide-operaatoritele-sidet-pakkuma

Tehnikaülikooli maajaama paraboolantenn

- ZR-16HD;
- Diameeter D = 4,9 m;
- Töösageduste vahemik: 0,5 - 12,2 GHz;
- Fookuskaugus F = 1,960 m;
- Diameetri ja fookuskauguse suhe: F/D = 0,4;
- Võimendus:
  - 44,3 dBi sagedusel 4,2 GHz;
  - 53,0 dBi sagedusel 12,2 GHz.
- Parabooli mass: 300 kg.



Paraboolantenni võimendus

- Ühtlaselt valgustatud ümmarguse apertuuri (raadiusega *r*) suunategur on

$$D_0 = \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2 .$$

- TE_{11} moodi korral aga

$$D_0 = 0{,}836\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2 .$$

- Paraboolantenni võimendus on

$$D_0 = \epsilon_a\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2 ,$$

kus ϵ_a on apertuuri efektiivsus (*aperture efficiency*) mille väärtus jääb tavaliselt suurusjärku 0,5 – 0,7.



RT-32 raadioteleskoop Irbenes

https://www.visitventspils.com/



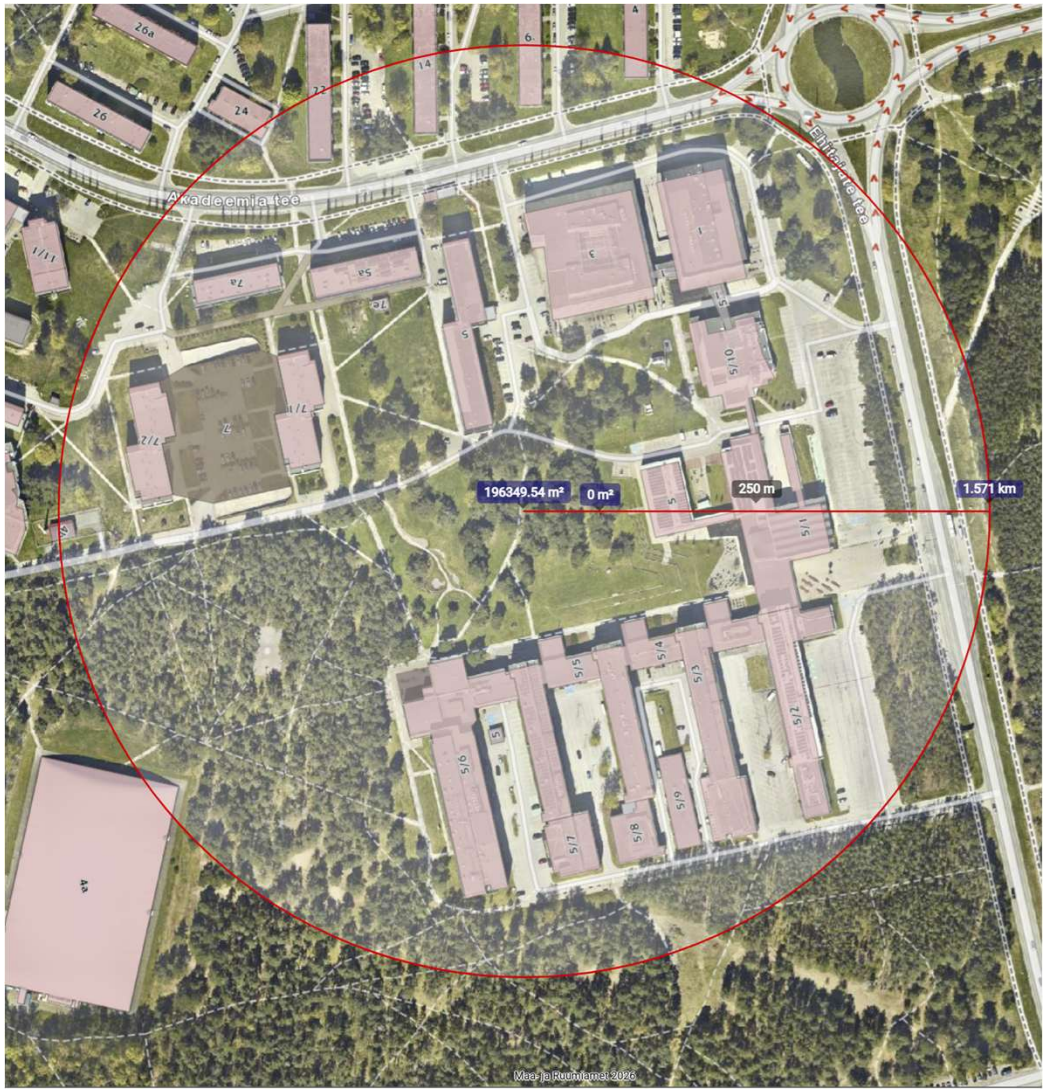
Arecibo observatooriumi raadioteleskoop

https://www.ucf.edu/pegasus/expanded-views-ucf-managed-arecibo-observatory/



FAST teleskoop Hiinas, Guizhous

500 m läbimõõduga ring



Babineti printsiip

- Kui avaga ekraani taha tekkinud väljale lisada väli mis tekib avakujulise takistuse taha saame tulemuseks välja mis eksisteeriks nii ava kui takistuse puudumisel.
- Seob omavahel traat- ja apertuurantennid.
- Polarisatsiooni mõju lisas H. G. Booker 1946 aastal (*Booker's Extension*)



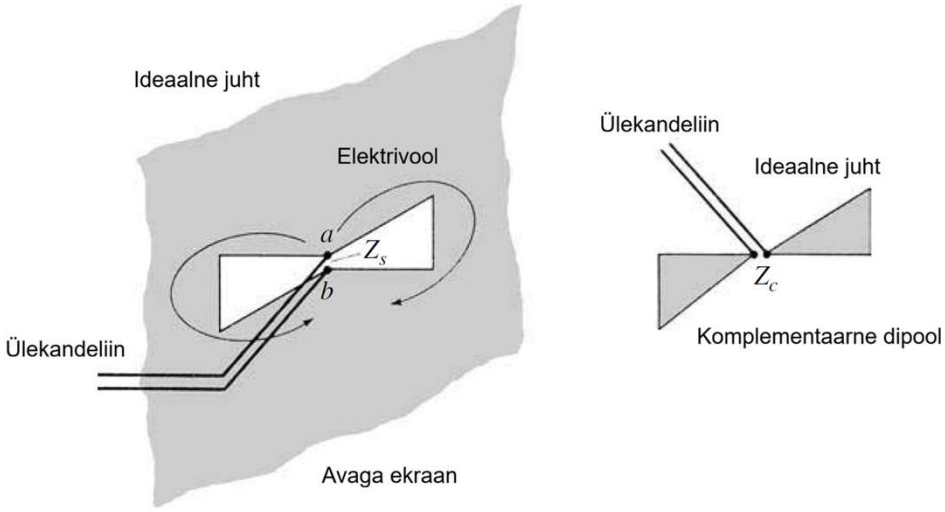
Joonis: https://www.meisterdrucke.uk/fine-art-prints/French-School/919351/Portrait-of-Jacques-Babinet-%281794---1872%29,-French-Physicist-and-Astronomer---in-%27Album-de-la-Science;-Illustrious-Scientists;-Great-Discoveries%27,-1896.html

Babineti printsiip

- Bookeri laienduse alusel saab näidata, et apertuurantenni ja sama kujuga komplementaarse antenni impedantsid on omavahel seotud kui

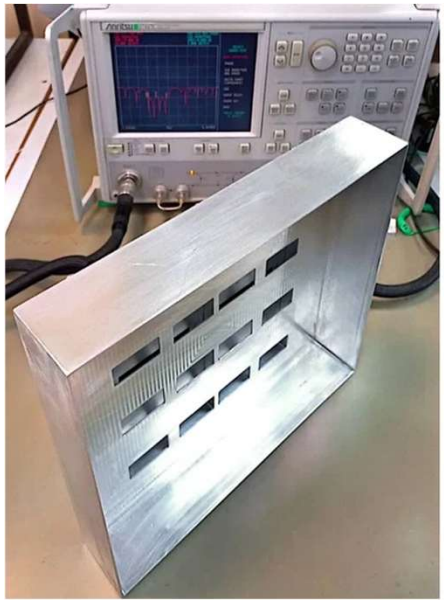
$$Z_s Z_c = \frac{\eta^2}{4}$$

- kus η on ümbritseva keskkonna karakteristlik impedants.



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

Piluantenn (*Slot antenna*)







Fotod: https://www.nature.com/articles/s41598-025-90696-8/figures/14
https://www.pe1rki.com/23cm-13cm-9cm-6cm-3cm-10ghz-24ghz-slotantennas.html

Materjalid

- Balanis, CA 2016, **Antenna Theory : Analysis and Design**, John Wiley & Sons
  - 12. peatükk „Aperture Antennas“
  - 13. peatükk “Horn Antennas”
- Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. **Antenna theory and Design.**
  - 9. peatükk „Aperture Antennas“

