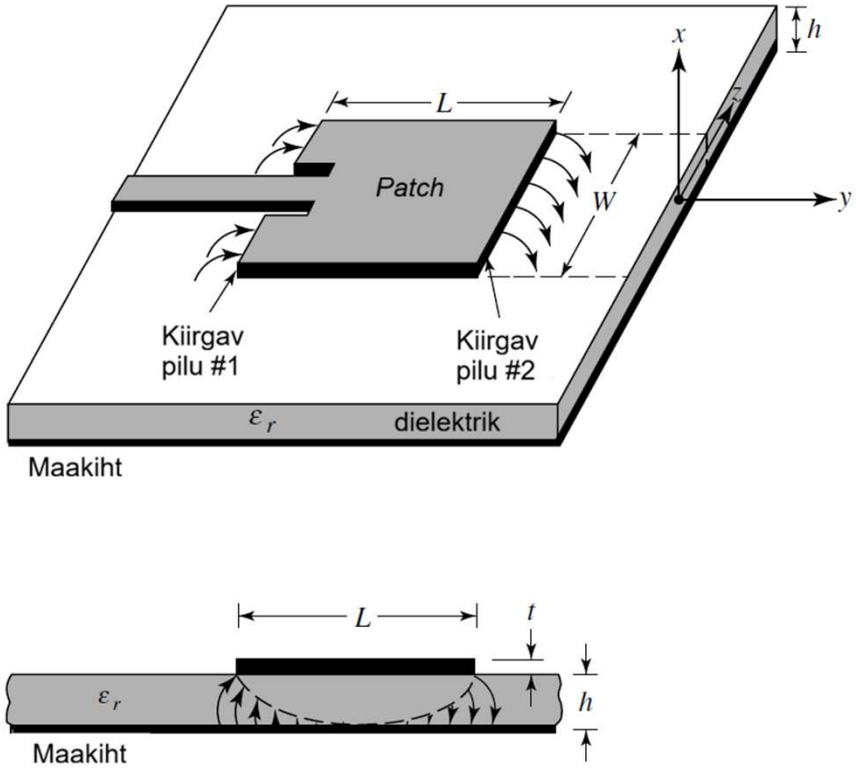
4. Planaarantenn

IEE2580 – Antennid ja raadiolevi

Planaarantenn

- **Planaarantenn** (*patch antenna*) on oma olemuselt väikese impedantsiga mikroribaliini lõik. Viimasel põhjusel tuntakse seda tüüpi antenne ingliskeelses kirjanduses ka mikroribaliin- antenni nime all (*microstrip antenna*).
- Ehituselt on tegemist õhukese metallribaga, mille paksus t on palju väiksem signaali lainepikkusest õhus ($t << \lambda_0$). Viimane on elektrilisest maakihist eraldatud õhukese dielektrikukihiga mille paksus h on samuti palju väiksem lainepikkusest ($h << \lambda_0$). Tavaliselt jääb dielektriku paksus vahemiku 0,003 kuni 0,05 lainepikkust.

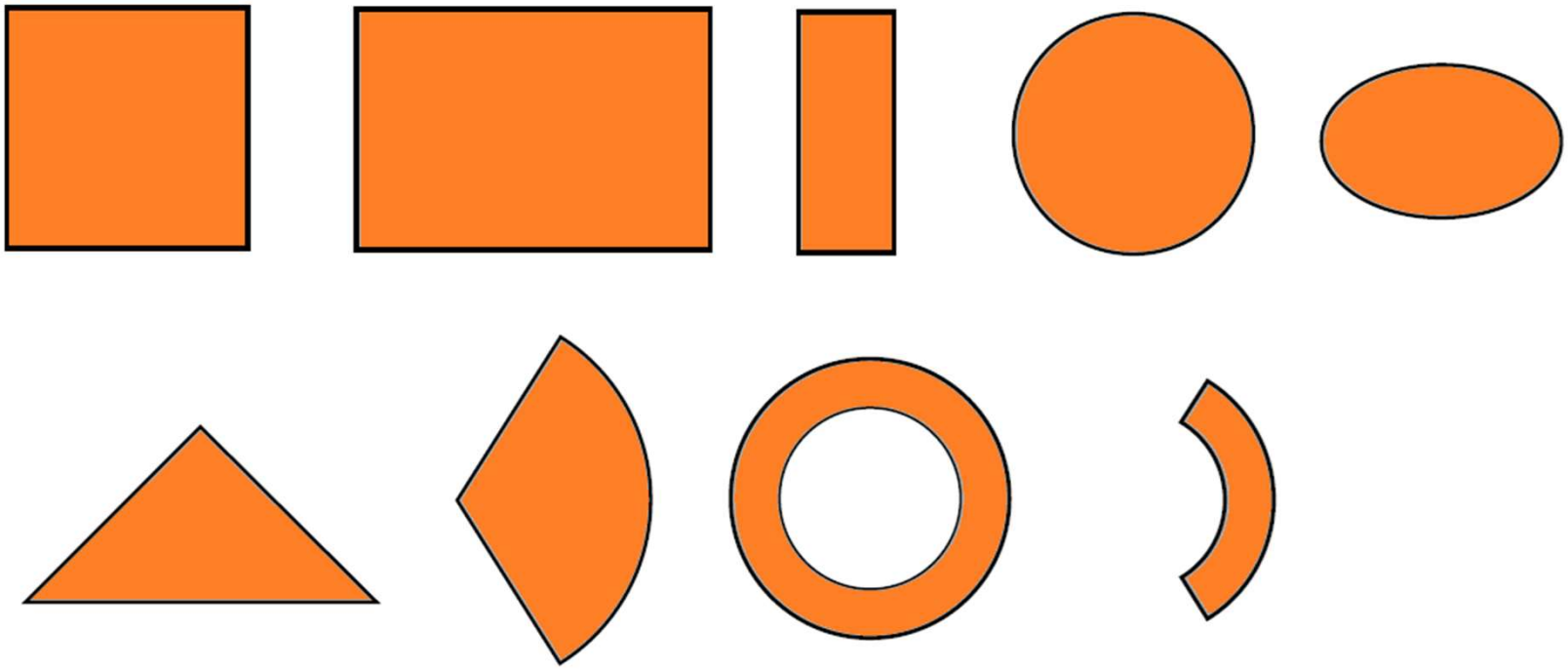
Planaarantenni ehitus



- Levinuima, nelinurkse kuju korral, on metallriba (paiga) pikkus *L* tavaliselt kolmandik kuni pool lainepikkusest õhus.
- Kasutatava isolaatori suhteline dielektriline läbitavus ε_r on praktikas enamasti vahemikus 2,2 kuni 12.

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

Planaarantennide võimalikud kujud



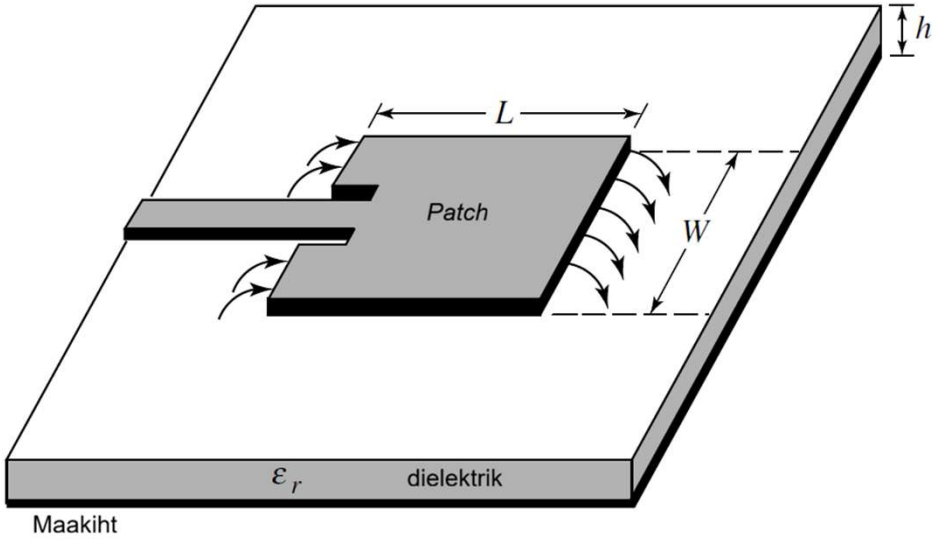
Joonis: Balanis, CA 2016, Antenna Theory : Analysis and Design, John Wiley & Sons.

Planaarantennide üldised omadused

- Eelised 
  - Odav, väikeste mõõtudega, väikese kaaluga ja robustne.
  - lihtne valmistada.
    - Võimalik valmistada otse mikrolaine mikroskeemide MMIC (*Monolithic Microwave Integrated Circuit*) koosseisus.
  - Parameetrid laias ulatuses häälestatavad.
  - Aktiivelemendi lisamisega saab muuta elektriliselt häälestatavaks.
    - Targad peegelduvad pinnad - RIS

- Puudused 
  - Madal kasutegur ja seega ka piiratud saatevõimsus.
  - Suur hüvetegur *Q* mistõttu on tegemist kitsaribaliste antennidega.
  - Raske saavutada puhta polarisatsiooniga kiirgust.
  - Sooritus tüüritavates antennivõredes ei ole kõige parem.
  - Toiteliin mõjutab antenni sooritust.

Toide ülekandeliiniga

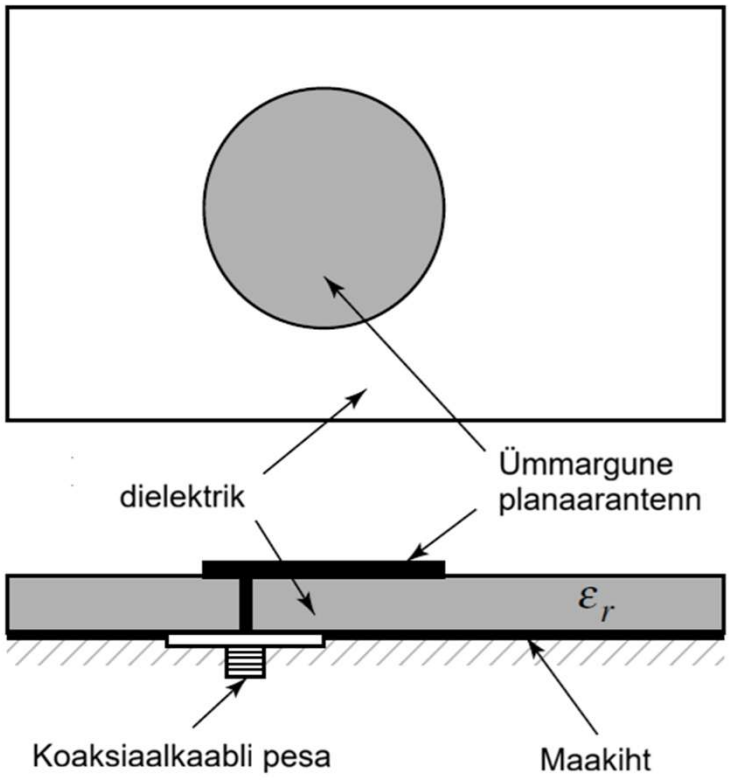


- Lihtne valmistada.
- Impedantsi sobitamine sisselõike sügavuse valiku teel.
- Tekitab dielektrikus pinnalaineid.
- Ülekandeliin võib toimida parasiitse antennina.
- Väike ribalaius (2-5%).

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

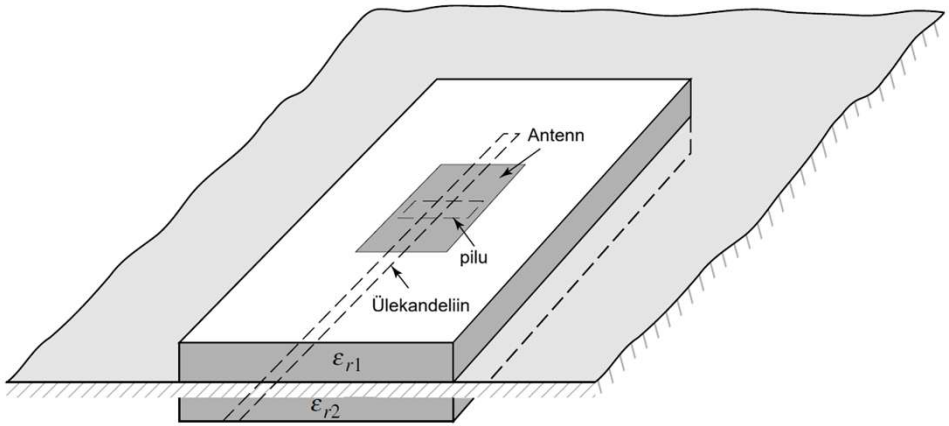
Toide sondiga

- Lihtne valmistada ja sobitada.
- Madal parasiitkiirgus.
- Väike ribalaius.
- Sarnaselt eelmisele ergutab kõrgemat järku moode mistõttu tekitab ristpolariseeritud kiirgust.



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

Apertuuriga sidestus

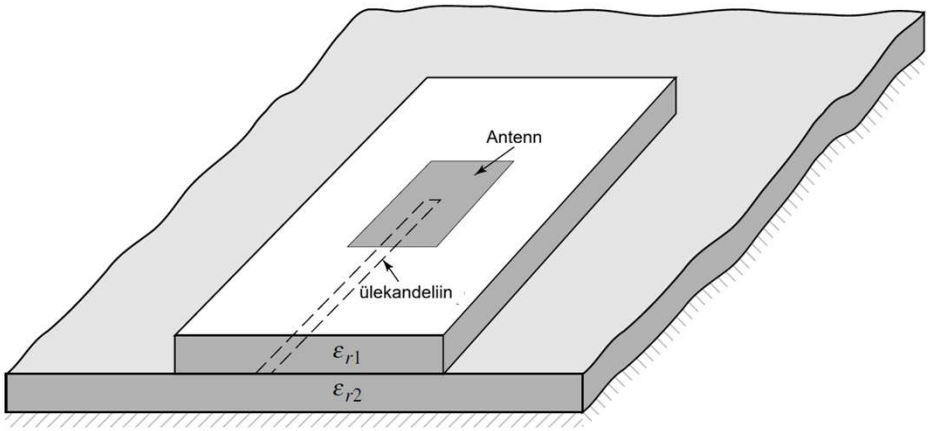


- Keerukam valmistada.
- Samuti väikese ribalaiusega.
- Väike parasiitkiirgus.
- Kiirguse polarisatsioon on puhas, ristpolarisatsioon puudub.

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

Mahtuvuslik sidestus

- Suhteliselt suur ribalaius (13 %)
- Väike parasiitkiirgus.
- Keerukam valmistada.



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

Analüüsi meetodid

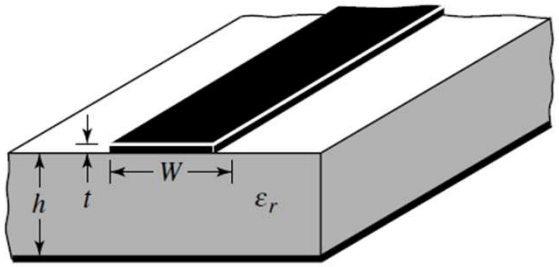
- Planaarantenni modelleerimiseks on kolm peamist meetodit:
  - Antenni mudeldamine ülekandeliinina (*transmission line model*). Mudel on kõige lihtsam ja intuitiivselt mõistetav kuid selle täpsus annab soovida.
  - Antenni mudeldamine dielektrikuga täidetud õõnsusena (*cavity model*). Mudel annab täpsed tulemused ja on intuitiivselt mõistetav kuid on samas keerukam kui ülekandeliini mudel.
  - Täisanalüüs (*full wave analysis*) – Maxwell Heviside võrrandite lahendamine antenni jaoks, tavaliselt momentide meetodit (*Method of Moments*) kasutades. Kõige täpsem meetod, võimaldab analüüsida meelevaldse kujuga antenne ja võresid.

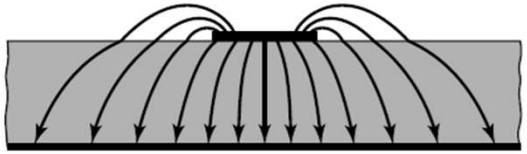
Servaefektid

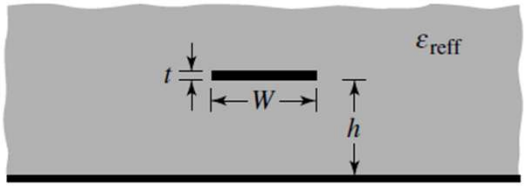


- Planaarantenni mõõtmed on lõplikud, seetõttu ei ole kogu elektriväli koondunud dielektrikkuse vaid, antenni servade (*fringes*) lähedal, tungib mingil määral õhku.
- Kaasnev servaefekt (*fringing*) avaldab mõju antenni resonantssagedusele ja seega tuleb sellega arvestada.
- Efekti suurus sõltub ülekandeliini (antenni) pikkuse ja alusmaterjali (dielektrik) paksuse suhtest L/h ja kasutatava isolaatori dielektrilisest läbitavusest ε_r.
- Efekti mõjul on antenni **elektriline pikkus suurem** selle **füüsilisest** pikkusest.

Servaefektid







- Kui $W/h > 1$, siis efektiivne suhteline dielektriline läbitavus on:

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}}.$$

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

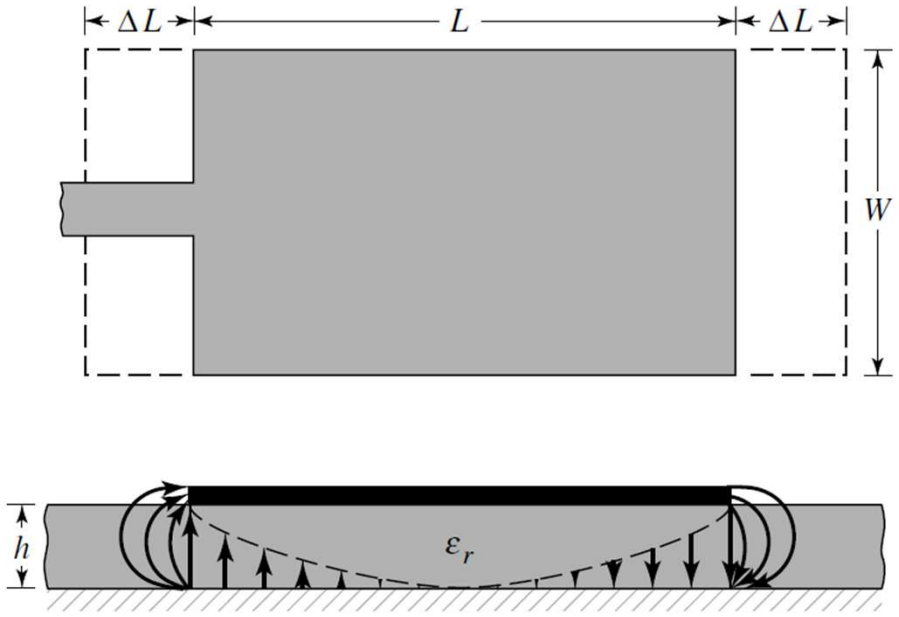
Planaarantenni elektriline pikkus

- Elektriline pikkus L_{eff}, antenni mõlemas otsast lisatuna, on füüsilisest L pikem:

$$\Delta L = 0{,}412h\frac{\left(\varepsilon_{reff}+0{,}3\right)\left(\frac{W}{h}+0{,}264\right)}{\left(\varepsilon_{reff}-0{,}258\right)\left(\frac{W}{h}+0{,}8\right)}.$$

- Elektriline pikkus:

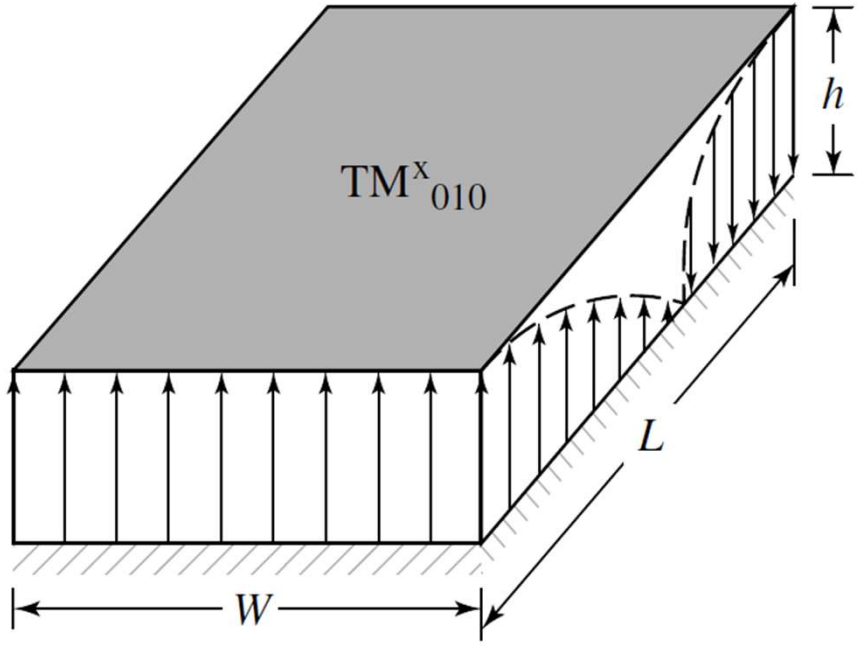
$$L_{eff} = L + 2\Delta L.$$



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

Resonantssagedus

- Nelinurkse planaaranteni füüsiline pikkus on tavaliselt pool lainepikkust $L = \lambda/2$.
- Sellisel juhul on domineerivaks moodiks TEM010 – antenni pikkuse ulatusse mahub pool elektrivälja lainepikkust ja magnetvälja jõujooned on kõikjal laine levimise suunaga risti.



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

Resonantssagedus

- Kui me servaefektiga ei arvesta on resonantssagedus:

$$f_{r010} = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}.$$

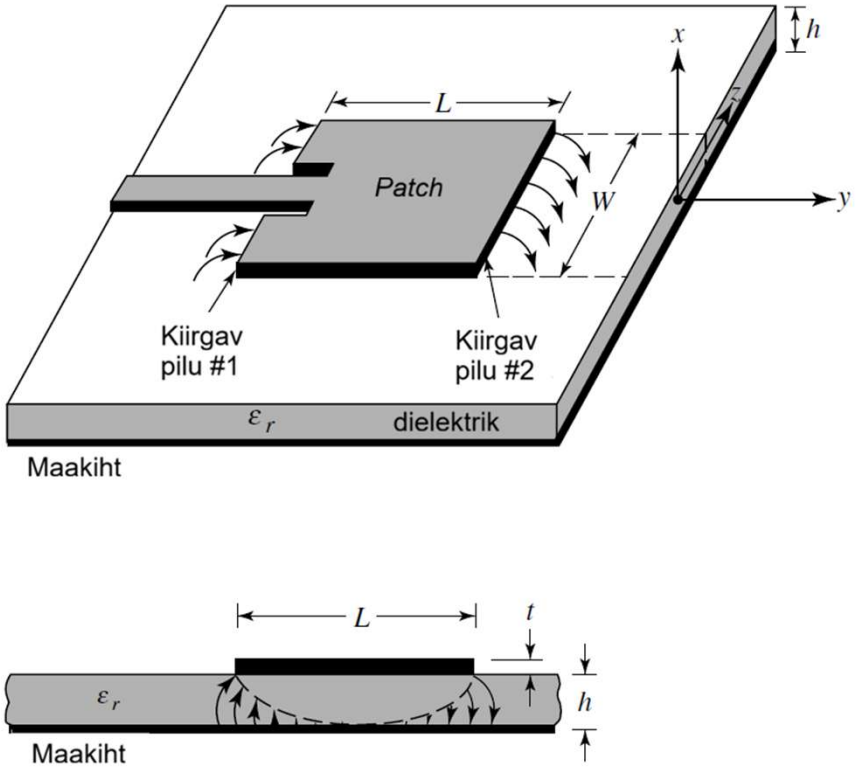
- Servaefektide mõjul resonantssagedus muutub:

$$f_{r01} = \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{2(L+2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_{reff}}}.$$

- Antenni laius, mis tagab hea kasuteguri on leitav avaldisega:

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} = \frac{c}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}}.$$

Nelinurkne planaarantenn



- Saab näidata, et peamiselt kiirgavad planaarantenni (ülekandeliini) kaks otsa: pilu #1 ja pilu #2.
- Antenni aseskeemiks on kaks mahtuvusliku admitantsi $Y_1 = Y_2 = G + jB$ mis on teineteisest eraldatud poole lainepikkuse pikkuse ülekandeliiniga.
- Sisuliselt on tegemist kahest elemendist koosneva antennivõrega.

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

Kiirgava pilu admitants

- Lõpliku laiusega pilu admitants ($h < 0{,}1 \cdot \lambda_0$):

$$G = \frac{W}{120\lambda_0}\left[1 - \frac{1}{24}(k_0 h)^2\right],$$

$$B = \frac{W}{120\lambda_0}[1 - 0{,}636\ln(k_0 h)],$$

kus λ_0 on signaali lainepikkus vaakumis ja k_0 on lainearv, samuti vaakumis:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r}, k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}.$$

Planaarantenni impedants

- Mõlema kiirgava pilu admitantsid on võrdsed, sest pilud on oma ehituselt identsed.
- Kuna teine pilu paikneb esimesest poole lainepikkuse kaugusel (praktiliselt 0,48 – 0,49 λ), siis selle impedants, esimese pilu juures on $Y_2' = G - jB$.
- Tulemuseks saame, resonantssagedusel, planaarantenni impedantsiks

$$Z_{sis} = \frac{1}{Y_{sis}} = \frac{1}{2G}.$$

Antud tulemus ei arvesta kiirgavate pilude vahelist sidestust G_{12}.

Vastastikuse sidestuse mõju

- Täpsem avaldis sisendimpedantsi jaoks:

$$Z_{sis} = \frac{1}{2(G \pm G_{12})}.$$

  Plussmärgile vastab paaritu ja miinusmärgile paaris järku mood.

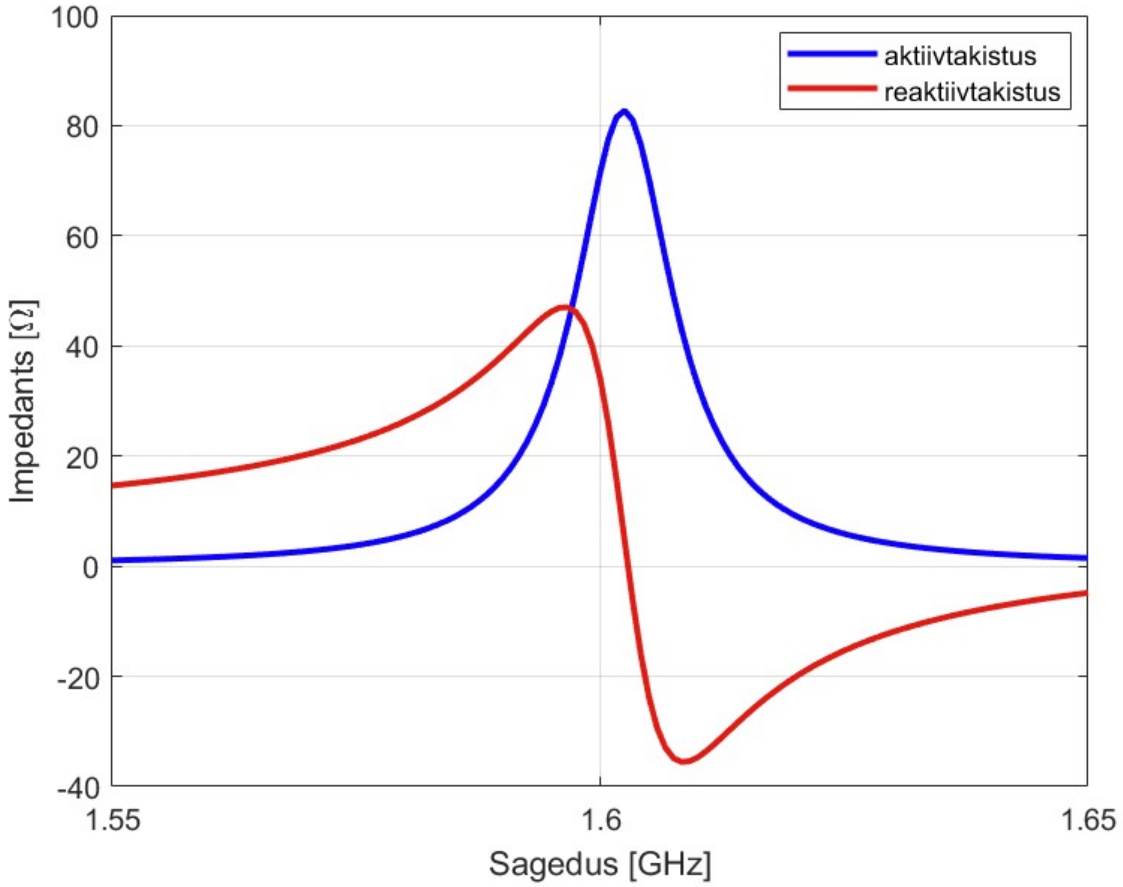
- Vastastikune sidestus (juhtivus):

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \,,$$

  kus $J_0(x)$ on esimest liiki nullindat järku Besseli funktsioon.

- Praktikas on G_{12} palju väiksem kui G.

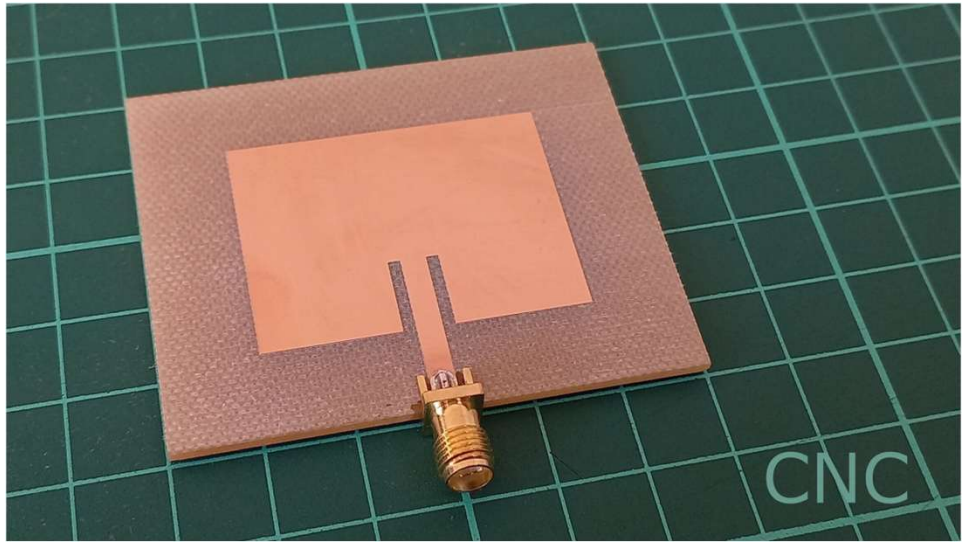
Planaarantenni impedantsi sagedussõltuvus



Õhksüdamikuga
f_r = 1,6 GHz
W = 93,7 mm
L = 92,5 mm
h = 0,8 mm
Maakihi mõõdud: 180 x 180 mm
Toide sondiga
Sondi kaugus servast: 28,2 mm.

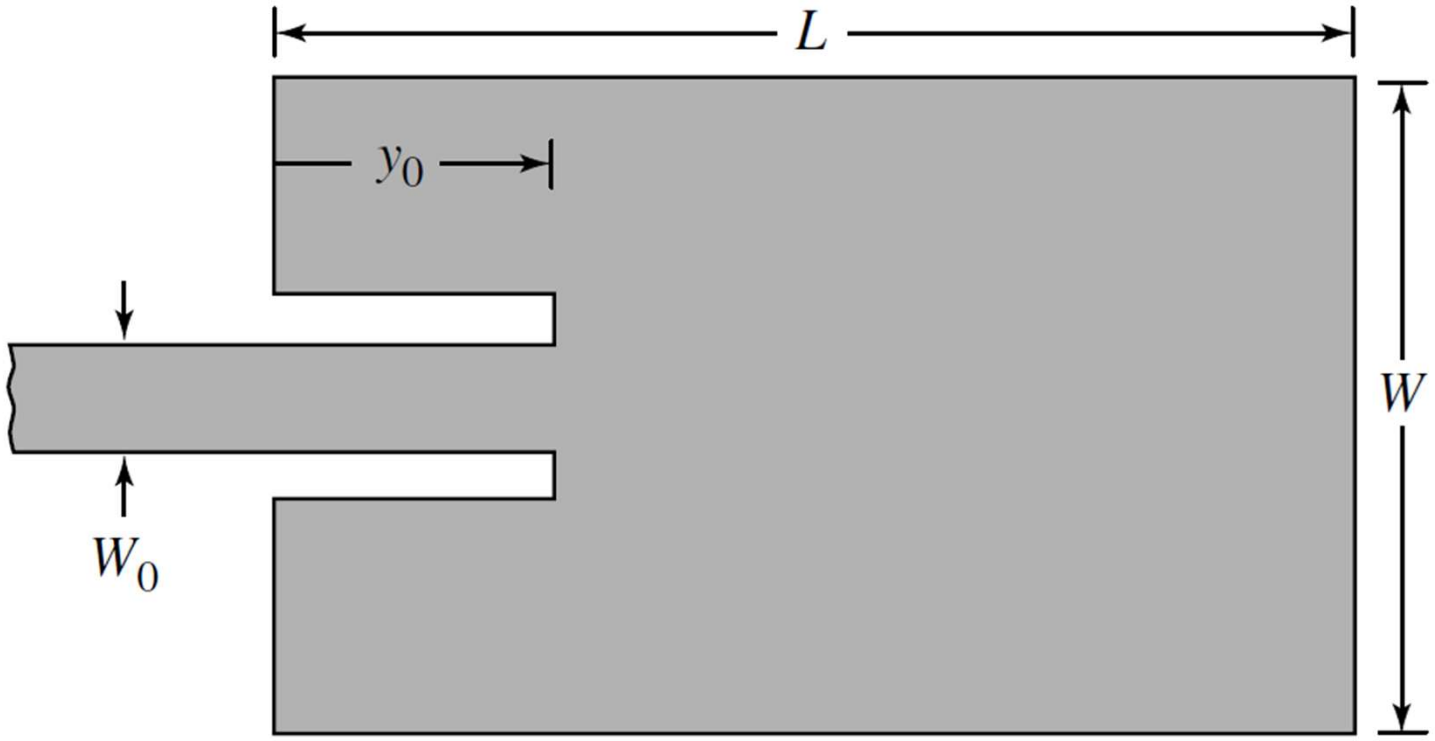
Planaarantenni sobitamine ülekandeliiniga

- Tüüpiline impedants planaarantenni servas on vahemikus 150 – 300 Ω.
- Liikudes lähemale antenni keskpunktile hakkab impedants kahanema.
- Sobitamiseks tuleb toiteliin viia sobiva kauguseni antenni servast (*Recessed microstrip-line feed*).



Joonis: https://www.etsy.com/uk/

Sisselõike geomeetria



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

Toiteliini impedants

- Toiteliiniks on samuti mikroribaliin, laiusega W_0, mille impedants on leitav ligikaudse avaldisega:

$$Z_0 = \begin{cases} \dfrac{60}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \ln\left(\dfrac{8h}{W_0} + \dfrac{W_0}{4h}\right) & \text{kui } \dfrac{W_0}{h} \leq 1 \\ \dfrac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}\left[\dfrac{W_0}{h} + 1{,}393 + 0{,}667 \ln\left(\dfrac{W_0}{h} + 1{,}444\right)\right]} & \text{kui } \dfrac{W_0}{h} > 1 \end{cases}.$$

Impedantsi sõltuvus sisselõike sügavusest.

- Impedantsi sõltuvus sisselõike sügavusest on kujul:

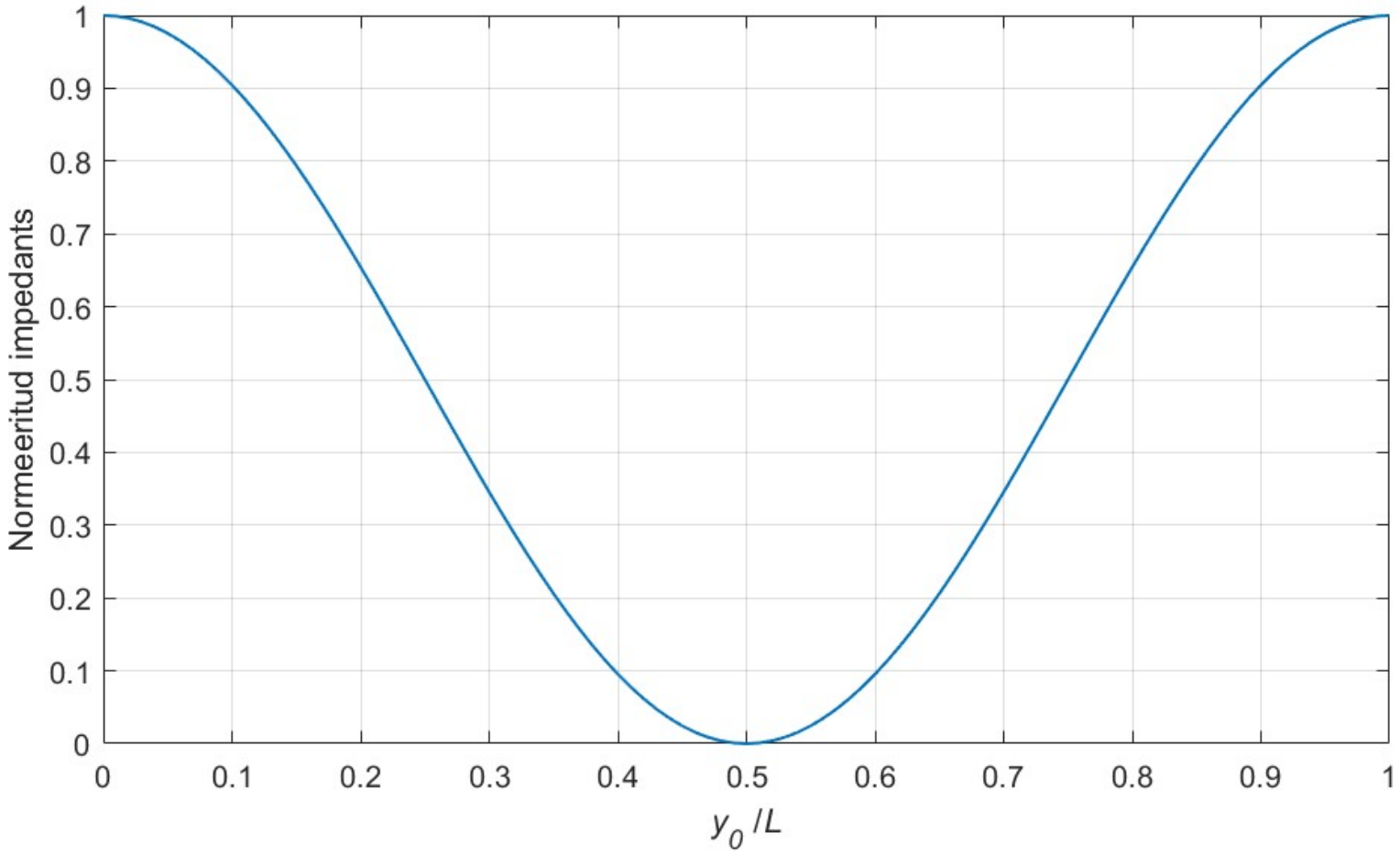
$$R_{sis}(y = y_0) = \frac{1}{2(G \pm G_{12})}\left[\cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{G^2 + B^2}{Y_0^2}\sin^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right) - \frac{B}{Y_0}\sin\left(\frac{2\pi y_0}{L}\right)\right],$$

  kus $Y_0 = 1/Z_0$ on toiteliini karakteristlik admitants.

- Praktikas on $G/Y_0 << 1$ ja $B/Y_0 << 1$ siis ülaltoodud avaldis lihtsustub:

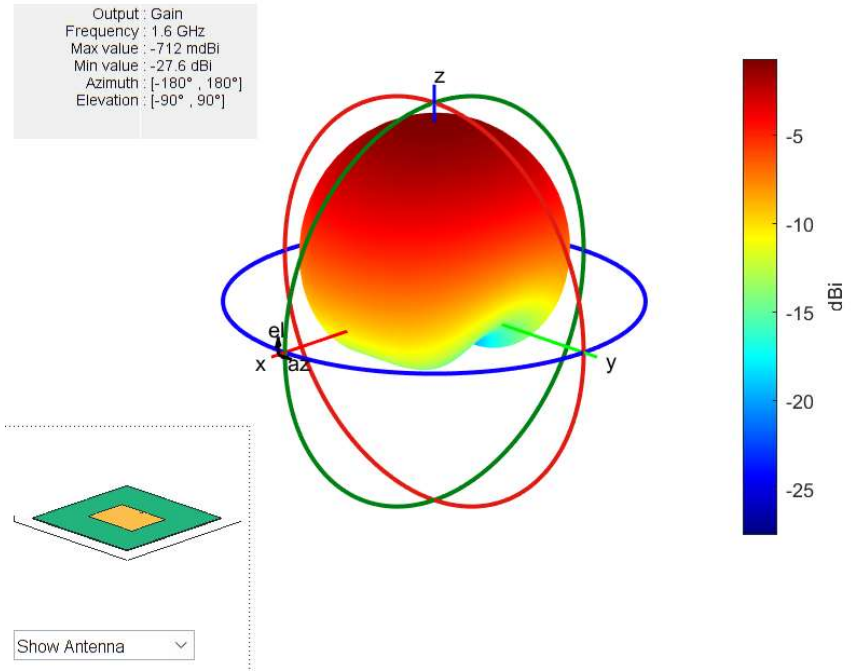
$$R_{sis}(y = y_0) = \frac{1}{2(G \pm G_{12})}\cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right).$$

Impedantsi sõltuvus sisselõike sügavusest.

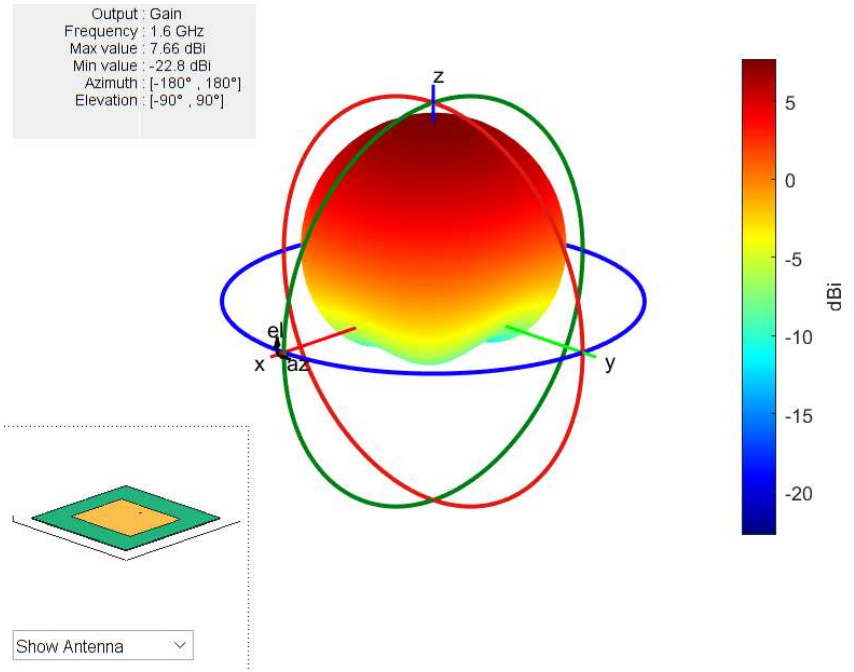


Planaarantenni suunadiagramm 1,6 GHz

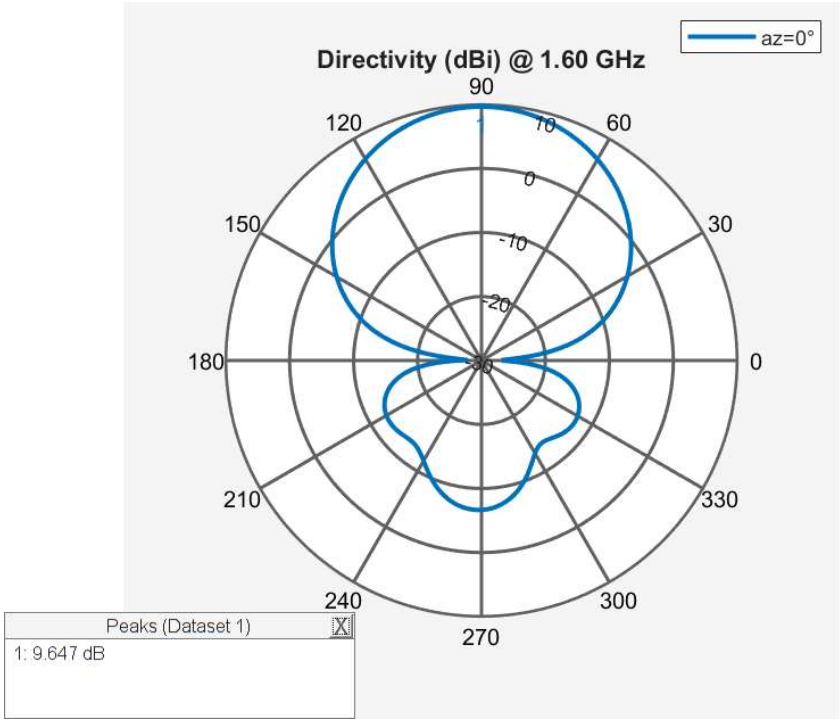
FR 4: tan δ = 0,026

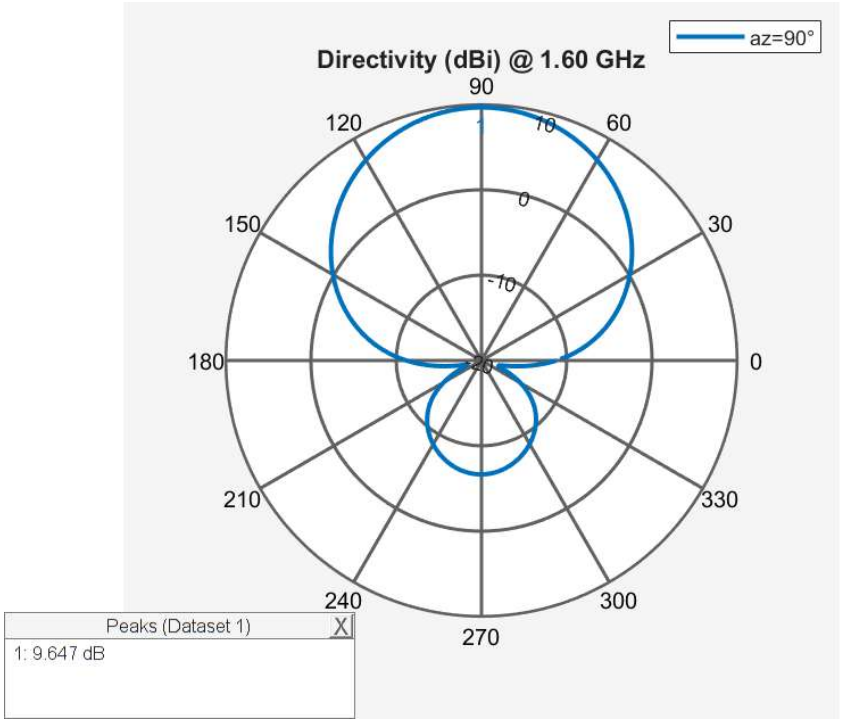


Teflon: tan δ = 0,0004



Suunadiagrammi lõiked





Materjalid

- Balanis, CA 2016, **Antenna Theory : Analysis and Design**, John Wiley & Sons.
  - Peatükk 14 „*Microstrip Antennas*“
- Matlab, **Patch Microstrip Antenna.** https://se.mathworks.com/help/antenna/ref/patchmicrostrip.html, 22.09.2026
- Pasternack, **Microstrip Patch Antenna Calculator.** https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx?srsltid=AU7gw4UnSxPl8YgZnncN2i1u3LxwnxvxrYAZXOSHWHEmZR5uv6T1m2La, 22.09.2026