

3. Ülekandeliinid

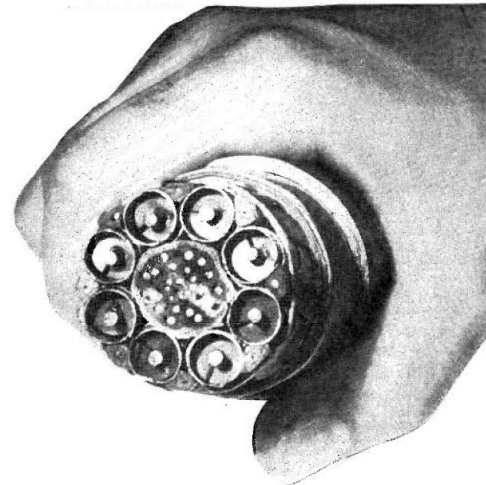
IEE2560 – Raadiosageduslik elektroonika

Ülekandeliinid



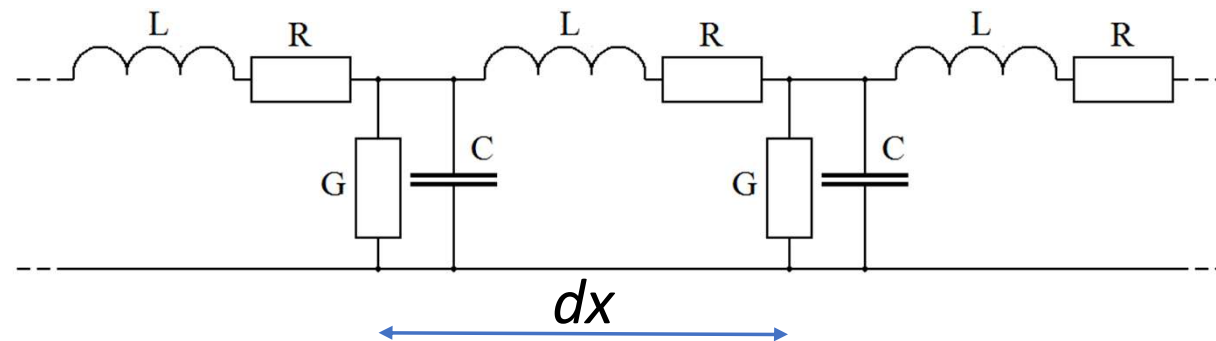
Ülekandeliini mõiste

- **Ülekandeliin** (*transmission line*) on struktuur mis on mõeldud elektromagnetlainete energia suunatud ülekandeks.
- Ülekandeliinina käitub taoline struktuur juhul kui selle mõõtmed (esmajärjekorras pikkus l) on laineomaduste avaldumiseks piisavalt suured ($l > 0,05...0,125 \lambda$).



Ülekandeliini aseskeem

- Ülekandeliini **elektrilised omadused** on määratud **nelja** parameetriga:
 - Induktiivsus pikkusühiku dx kohta L [H/m];
 - Mahtuvus pikkusühiku dx kohta C [F/m];
 - Kaotakistus pikkusühiku dx kohta R [Ω /m] ja
 - Kaojuhtivus pikkusühiku dx kohta G [S/m].
- Parameetrite endi väärtused sõltuvad ülekandeliini ehitusest (kuju) ja kasutatavatest materjalidest.



Kaovaba ülekandeliin

- Kaovabas liinis on $R = G = 0$.
- Laine levib ülekandeliinis **faasikiirusega** (*phase velocity*):

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

- Suurust, mis näitab, kui palju on laine levimise kiirus liinis v väiksem, kui vaakumis c , nimetatakse **kiirusteguriks** (*velocity factor*):

$$VF = \frac{v_p}{c}.$$

- Kaovaba ülekandeliini **karakteristlik impedants** on: $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}.$
- Faasinihet ülekandeliinis kirjeldab **lainearv**

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v_p}.$$

Reaalne ülekanaliin

- Harmoonilise signaali levi reaalses ülekanaliinis kirjeldab kompleksne **levikonstant**

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta.$$

- Levikonstandi reaalosa α ehk **sumbetegur** määrab sumbumuse liinis pikkusühiku kohta [Np/m]. Levikonstandi imaginaarosa β näitab faasinihke suurust pikkusühiku kohta (**faasikonstant**) [rad/m].
- Karakteristlik impedants (lainetakistus) kadudega ülekanaliinis:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}.$$

Neepri ja detsibelli vahekord

- Kui signaal, näiteks pinge U , sumbub 1 Np võrra siis

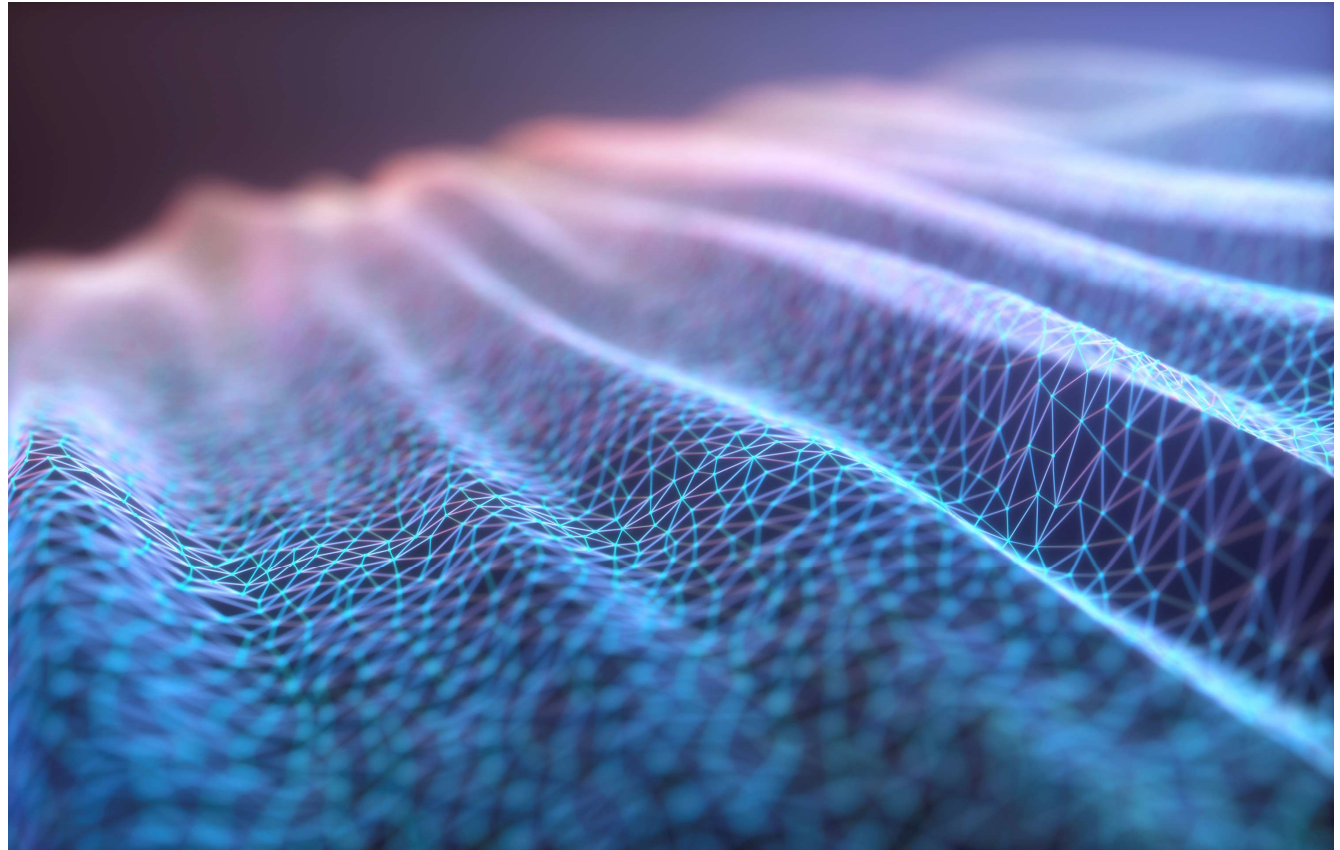
$$\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right) = 1.$$

Viimasest on lihtne näha, et pingete suhe on võrdne naturaalogaritmi alusega $e \approx 2,71828...$

- Sellise pingete suhte korral on sumbumus detsibellides
 $20\log(e) \approx 8,686.$
- Seega 1 Np $\approx 8,686$ dB ja 1 dB $\approx 0,115$ Np.



Lainelevi
ülekanaliinis



Laine ülekandeliinis

- Pikki ülekandeliini (x – telje suunas) kulgevad harmoonilist võnkumist ehk **langevat lainet** (*incident wave*) kirjeldab avaldis

$$u^+(x, t) = U_m^+ \cos(2\pi f t + \varphi^+ - kx).$$

- Ülekandeliinis saab laine levida ka vastupidises suunas. Sellist, **peegeldunud lainet** (*reflected wave*) kirjeldab, peaaegu identne, avaldis

$$u^-(x, t) = U_m^- \cos(2\pi f t + \varphi^- + kx).$$

- Ülekandeliin on praktikas lineaarne keskkond. Kogu signaal mistahes punktis ja ajahetkel on kõikide liinis levivate signaalide summa ehk **superpositsioon**.

Interferents ülekandeliinis

- Peegeldunud laine amplituud U_m^- ja selle faasinihe langeva signaali suhtes sõltuvad ülekandeliini lainetakistusest Z_0 ja koormuse impedantsist Z_K . Vastavat sõltuvust kirjeldab kompleksne peegeldustegur

$$\Gamma = \frac{Z_K - Z_0}{Z_K + Z_0}.$$

- Peegeldunud laine amplituud on leitav kui $U_m^- = |\Gamma|U_m^+$.
- Langeva- ja peegeldunud laine liitumisel tekivad ülekandeliinis pinge maksimumid väärtusega $u_{max} = U_m^+ + U_m^- = (1 + |\Gamma|)U_m^+$.
- Destruktiivse interferentsi tõttu tekkivad liinis ka miinimumid väärtustega $u_{min} = U_m^+ - U_m^- = (1 - |\Gamma|)U_m^+$.

Seisulainetegur

- Ülekandeliinis toimuvate võnkumiste maksimaalse- ja minimaalse väärtuse suhet nimetatakse **seisulaineteguriks** VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*)

$$VSWR = \frac{u_{max}}{u_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}.$$

- Näeme, et energia ülekannet allikas koormuse suunas saab väljendada erinevatel viisidel:
 - Allika ja koormuse impedantside kaudu;
 - Peegeldusteguri abil;
 - Seisulaineteguri kaudu.

Koormatud
ülekanделиin



Joonis: <https://wherpeteris.com/they-lay-heavy-burdens-on-the-shoulders-of-others/>

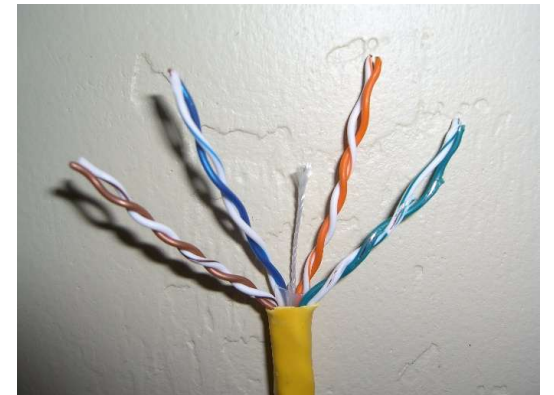
Koormatud ülekandeliini impedants

- Ülekandeliini Impedants koormusest Z_K kaugusel x :

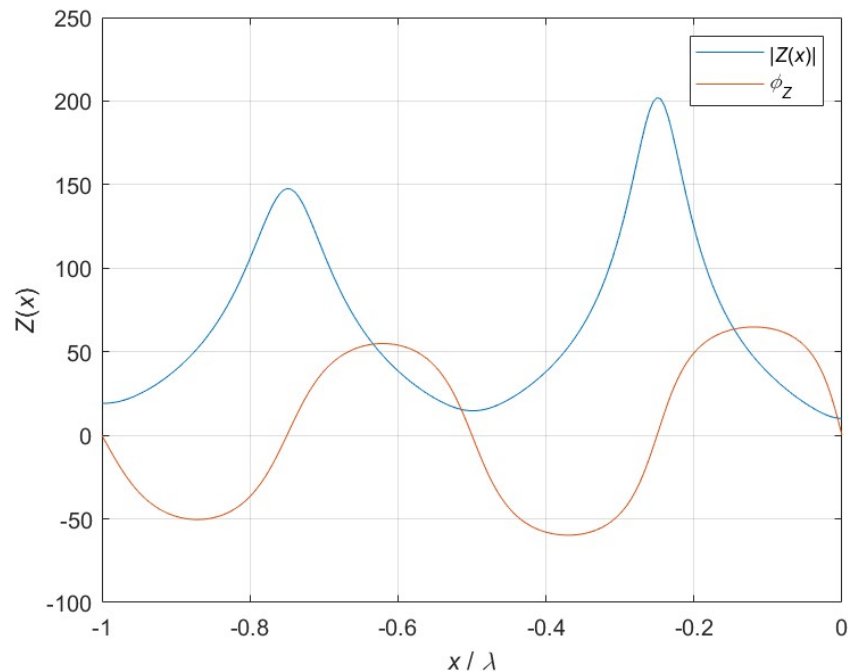
$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_K - Z_0 \tanh(\gamma x)}{Z_0 - Z_K \tanh(\gamma x)}.$$

- Kus **hüperboolne tangens** on defineeritud kui:

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}.$$



Näide: koormatud kadudega ülekandeliin



- Kadudega liini lainetakistus on $Z_0 = 50 \, \Omega$ koormuse takistus on $Z_K = 10 \, \Omega$. Liini levitegur on $\gamma = 0,2 + 2\pi j$.
- Näeme, et graafik on kvaasiperioodiline – kuju kordub, kuid mitte täpselt.

Kaovaba koormatud ülekandeliini impedants

- Kaovaba liini korral jääb levitegurist γ alles ainult lainearv k .
- Koormatud liini impedants on sellisel juhul perioodiline (perioodiga $\lambda/2$)

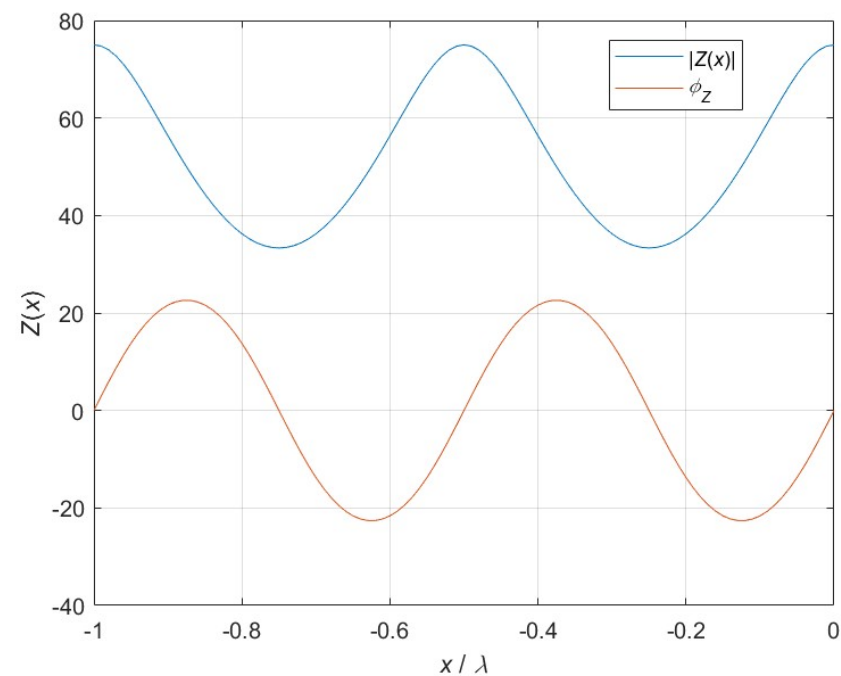
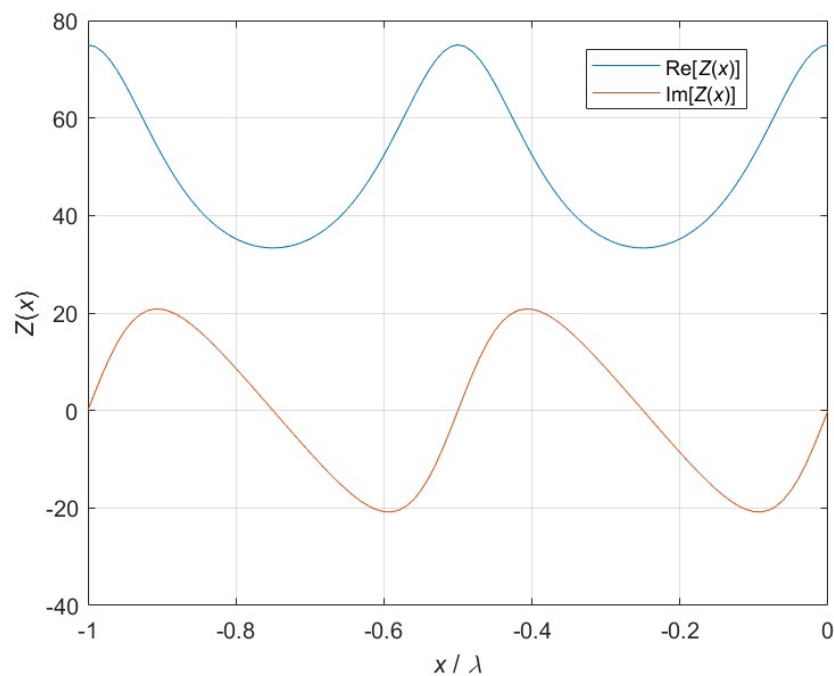
$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_K - jZ_0 \tan(kx)}{Z_0 - jZ_K \tan(kx)}$$

- NB! Koormuse asukohale vastab vaikimisi väärtus $x = 0$. Kaugus x , allika suunas (vasakule) on seega **negatiivne!**

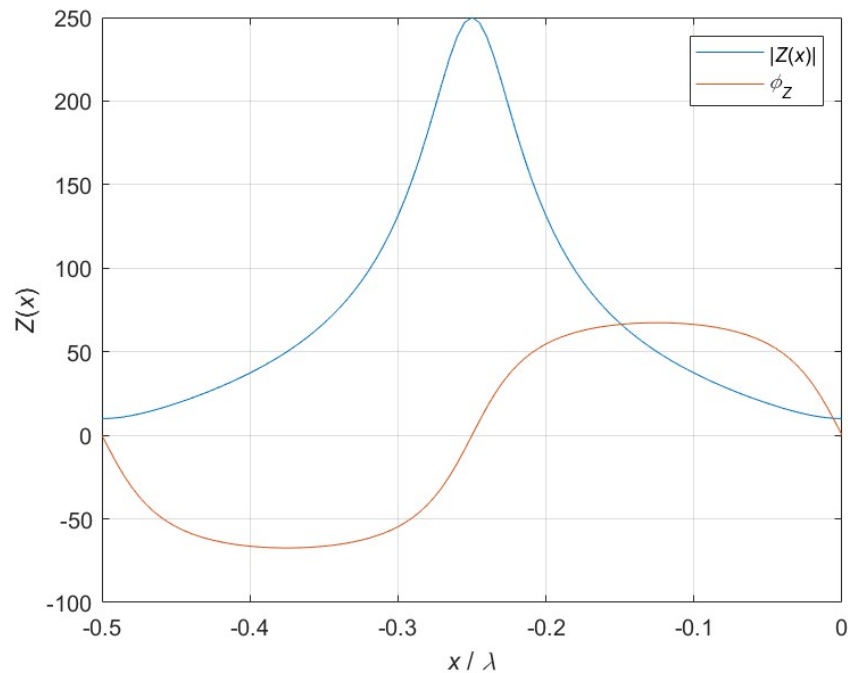


Näide: koormatud kaovaba ülekandeliin

Kaovaba ülekandeliin lainetakistusega $Z_0 = 50 \, \Omega$ on koormatud $Z_K = 75 \, \Omega$ takistiga. Faasinurk ϕ_Z parempoolsel joonisel on kujutatud kraadides $^\circ$.



Näide: koormatud kaovaba ülekandeliin



- Kaovaba ülekandeliini lainetakistus on $Z_0 = 50 \, \Omega$ koormuseks on $Z_K = 10 \, \Omega$ takisti.
- Sõltuvus on perioodiline.

$$\frac{Z_L}{Z_0} = \frac{1.5 - j0.8}{1}$$

$$\frac{V_F}{l} = 0.98 \text{ m}$$

$$\frac{l}{\pi} = \frac{0.39}{0.98} \approx 0.4$$

DWG. NO.

HOME ASSIGNMENT

DATE _____

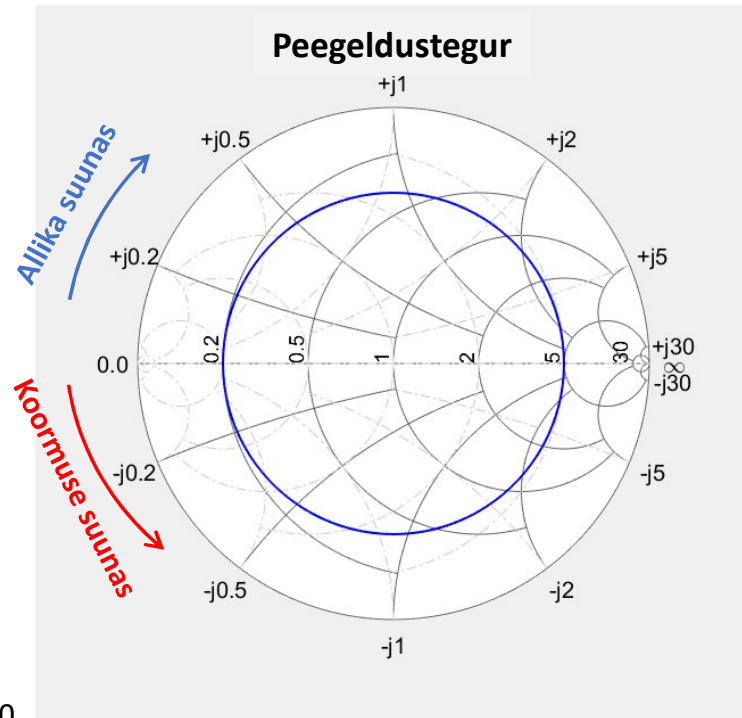
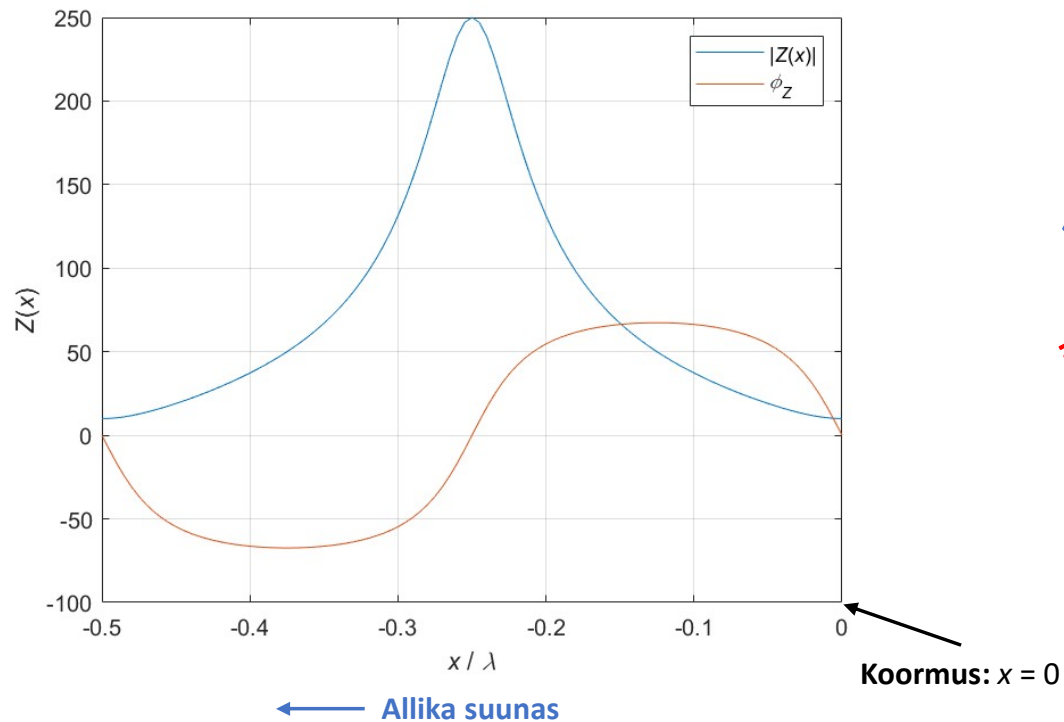
BY J. COLVIN, UNIVERSITY OF FLORIDA, 1997

II IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES



Näide – koormatud kaovaba ülekandeliin

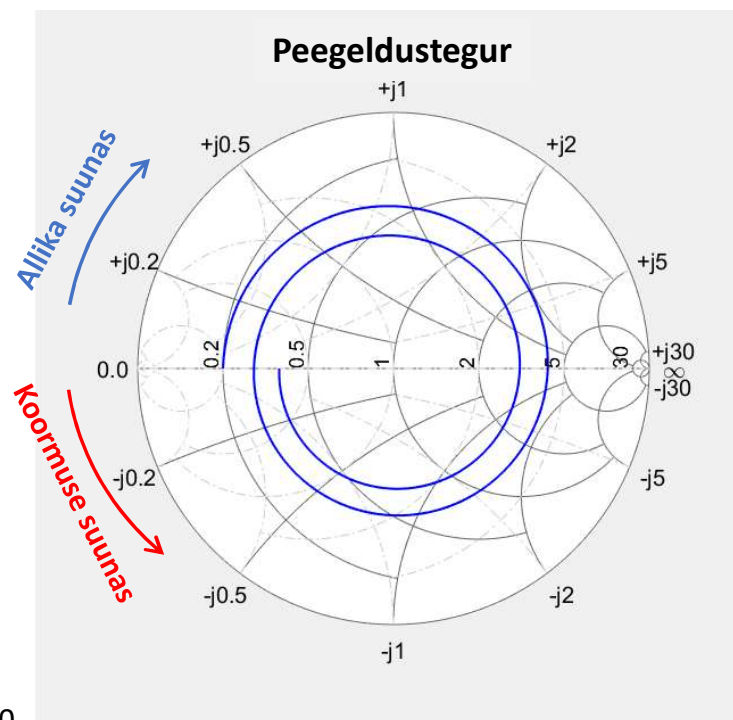
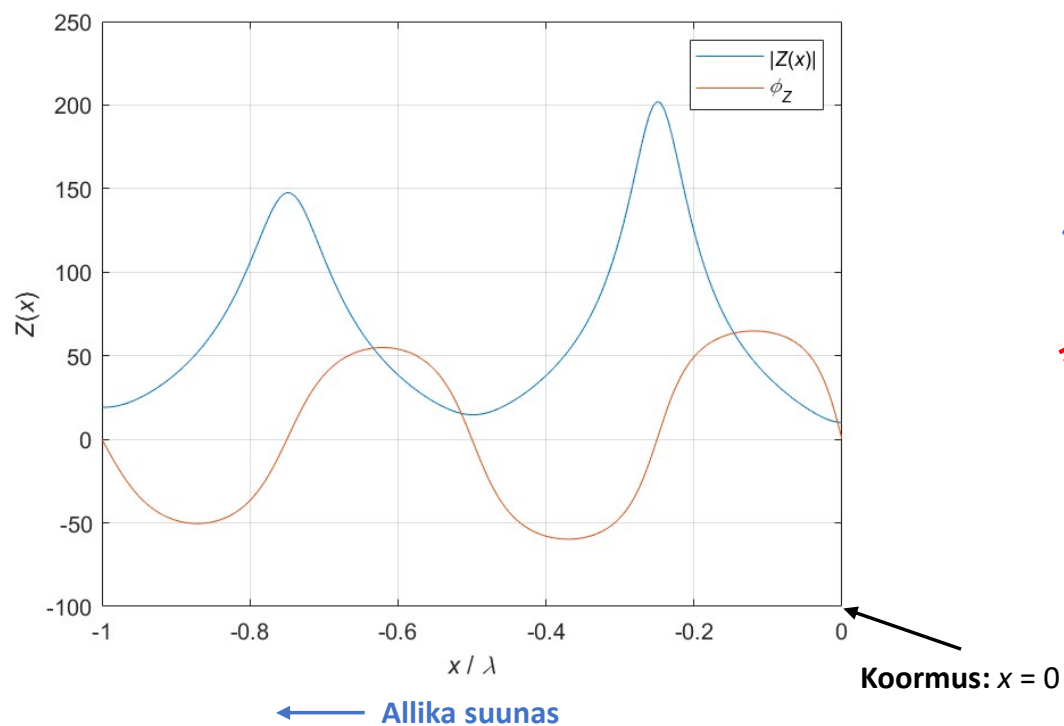
Kaovaba ülekandeliin karakteristikliku impedantsiga $Z_0 = 50 \, \Omega$ on koormatud $Z_K = 10 \, \Omega$ takistiga. Peegeldusteguri Γ väärtus on kujutatud Smithi diagrammil.



Näide – koormatud kadudega liin

Ülekandeliin karakteristliku impedantsiga $Z_0 = 50 \, \Omega$ on koormatud $Z_K = 10 \, \Omega$ takistiga.

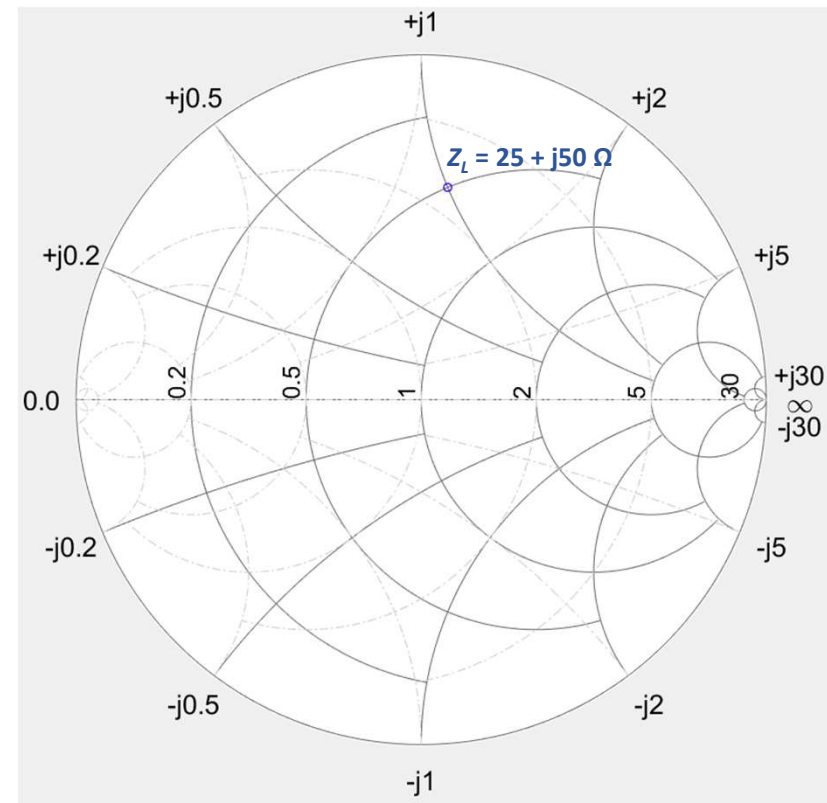
Levitegur: $\gamma = 0,2 + 2\pi j$.



Koormatud kaovaba ülekandeliini impedants

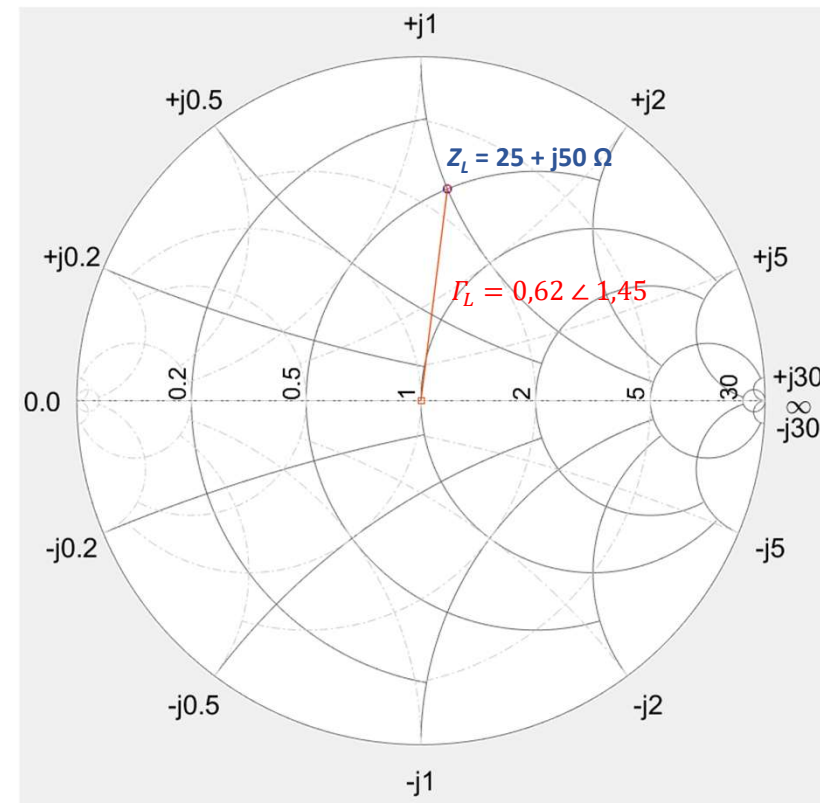
- Esmalt leiame normeeritud koormuse väärtuse z_K ja märgime selle Smithi diagrammile.
- Näiteks olgu $Z_K = 25 + j50 \Omega$ ja $Z_0 = 50 \Omega$.
- Sellisel juhul

$$z_K = \frac{Z_K}{Z_0} = 0,5 + j1.$$



Koormatud kaovaba ülekandeliini impedants

- Koormuse peegeldusteguri Γ_K saame leida Smithi diagrammilt
 $\Gamma_K = 0,62 \angle 1,45$.
- Kui koormusega ühendada **kaovaba** ülekandeliin, siis peegeldusteguri moodul $|\Gamma_L|$, liini otsas, **jääb alati samaks**.
- Faas muutub võrdeliselt kaugusega ülekandeliini lõpust.



Koormatud kaovaba ülekandeliini impedants

- Peegeldusteguri faas väheneb (kellaosuti suunas) võrdeliselt kaugusega koormusest

$$\Theta = 2kl,$$

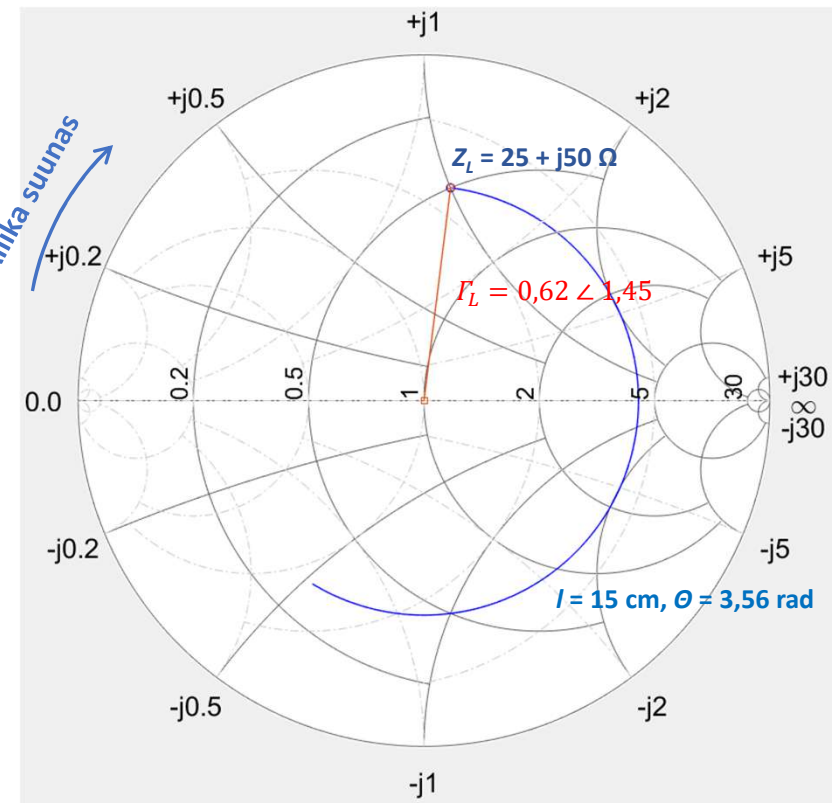
kus k on lainearv ja l on ülekandeliini füüsiline pikkus.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c \cdot VF}{f}.$$

- Täisringile ümber Smithi diagrammi keskpunkti vastab ülekandeliini pikkus mis on võrdne poolega lainepikkusest: $l = \lambda/2$.

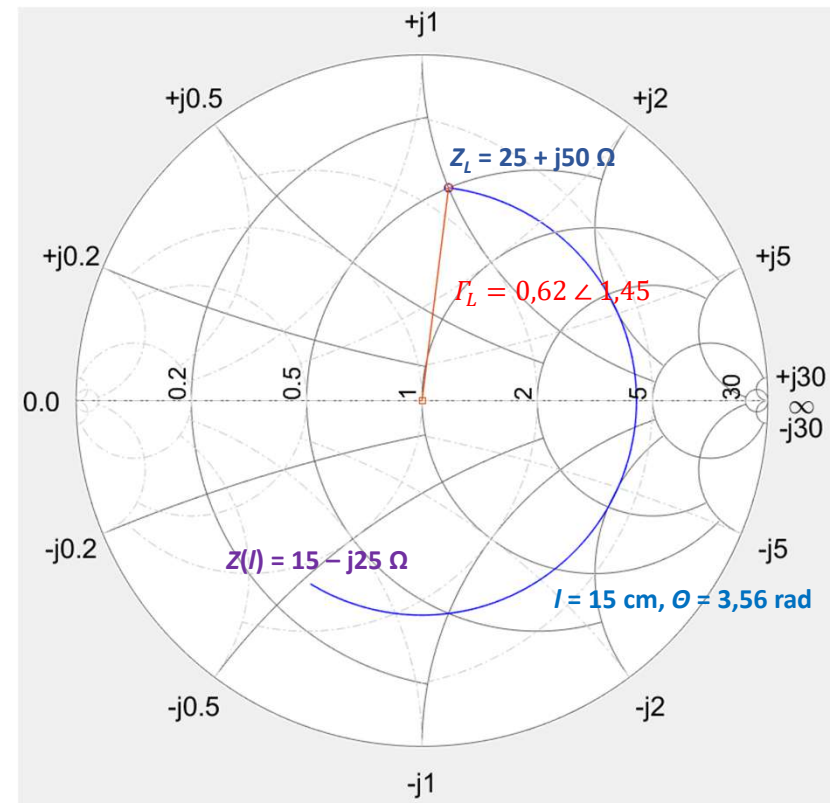
Koormatud kaovaba ülekandeliini impedants

- Olgu meie näites töösageduseks $f = 312$ MHz, ülekandeliini kiirusteguriks $VF = 0,55$ ja liini füüsiliseks pikkuseks $l = 15$ cm.
- Vastav faasinihe on $\Theta = 3,56$ rad (204°).
- Smithi diagrammil kujutatud **kaare** lõpp-punkt vastab (normeeritud) impedantsile $z(l)$ ülekandeliini lõpus.
- Praktikas on Smithi' diagramm varustatud radiaalsete skaaladega mis kujutavad nii lainepikkust kui ka faasinihet. Seega tegelikult ei pea Θ väärtust arvutama.



Koormatud kaovaba ülekandeliini impedants

- Peegeldustegur liini lõpus on
 $\Gamma(l) = 0,62 \angle -2,12 = -0,32 - j0,53$.
- Vastav normeeritud impedants on
 $z(l) = 0,30 - j0,52$.
- Impedants (re-normeeritud) on seega
 $Z(l) = 15 - j25 \Omega$.



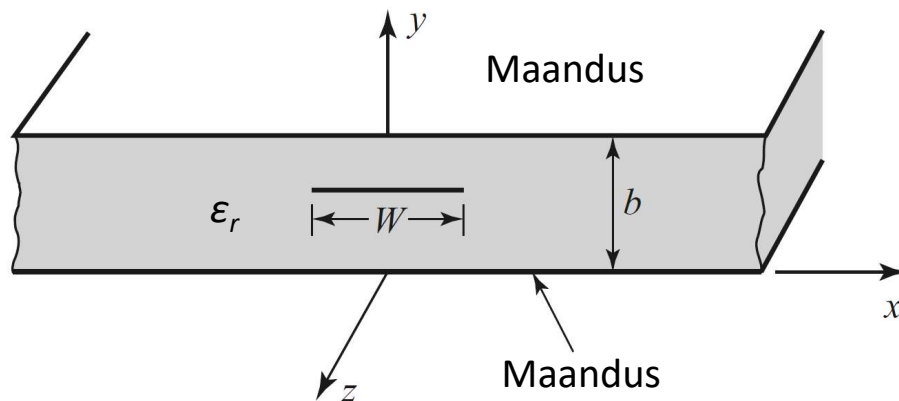


Ülekandeliinide realiseerimine trükkplaadil

Foto: <https://www.pcbbuy.com/news/High-frequency-PCB-design-guidelines.html>

Ribaliin

- **Ribaliini** (*stripline*) on tasapinnaline ülekandeliin mis mis koosneb dielektrikus kulgevast, laiussega W õhukesest voolujuhtivast ribast. Viimane paikneb kahe juhtiva, maandatud pinna vahel, kummastki kaugusel $b/2$.
- Kuna koosneb rohkem kui kahest juhtivast pinnast siis võimaldab TEM lainete levi (*TEM mode*).



Joonised: D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.



Ribaliin

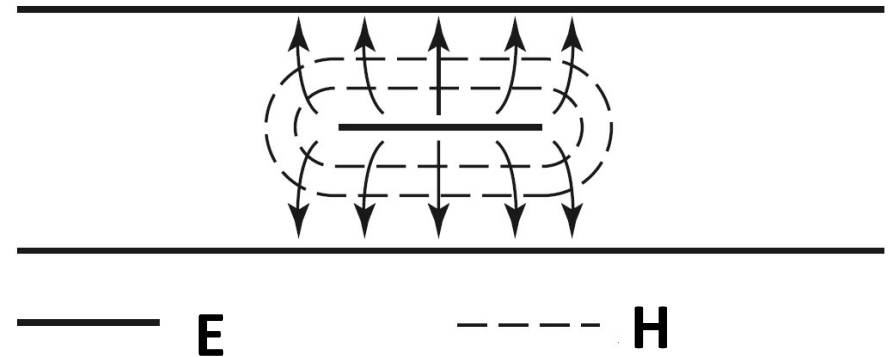
- TEM moodi korral on faasikiirus ribaliinis

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}},$$

kus ϵ_r on kasutatava dielektriku suhteline dielektriline läbitavus.

- Laine arv

$$k = \frac{\omega}{v_p}.$$



Ribaliini lainetakistus

- Ligikaudne avaldis (viga alla 1%) ribaliini karakteristikliku impedantsi leidmiseks on

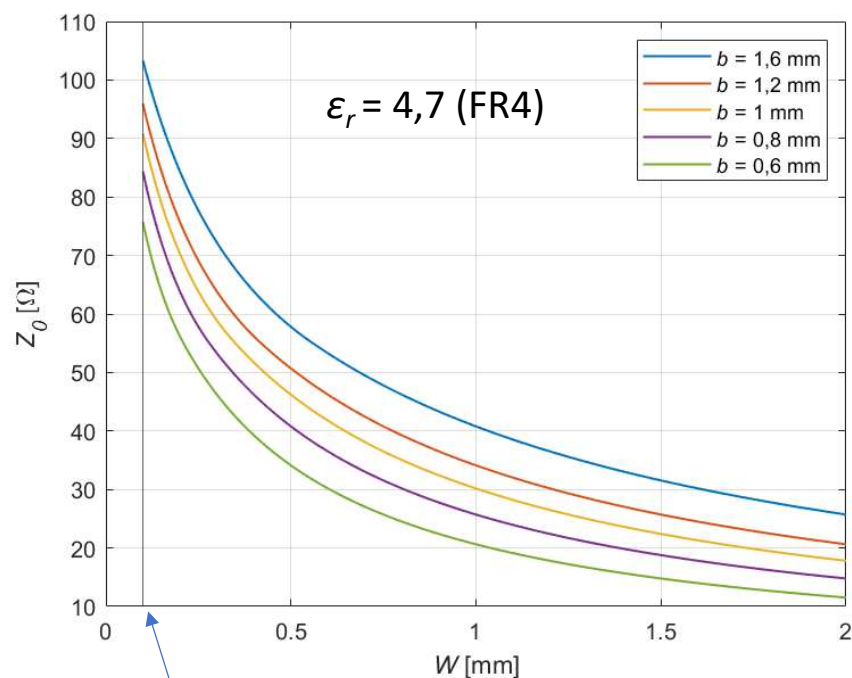
$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{b}{W_e + 0,441b},$$

kus W_e on keskmise juhtiva riba efektiivne laius mis on leitav kui

$$\frac{W_e}{b} = \frac{W}{b} - \begin{cases} 0 & \text{kui } \frac{W}{b} > 0,35 \\ \left(0,35 - \frac{W}{b}\right)^2 & \text{kui } \frac{W}{b} < 0,35 \end{cases}.$$

- Täiendavalt eeldatakse, et riba paksus t on väga väike ($t \approx 0$).

Ribaliini lainetakistus



Minimaalne valmistatav vaseriba
laius trükkplaadil on 0,1 mm.

- Valmistatava ülekandeliini impedantsil on praktilised piirid.
- Trükkplaadi valmistamise tolerantsid määravad omakorda ülekandeliini parameetrite tolerantsi.

Ribaliini laiuse leidmine

- Praktikas on enamasti dielektriku paksus b ja materjal (ϵ_r) etteantud suurused. Seega tuleb arvutada soovitud lainetakistuse Z_0 realiseerimiseks vajalik ribaliini laius W . Viimase saab leida kasutades avaldist

$$\frac{W}{b} = \begin{cases} x & \text{kui } \sqrt{\epsilon_r} Z_0 < 120 \, \Omega \\ 0,85 - \sqrt{0,6 - x} & \text{kui } \sqrt{\epsilon_r} Z_0 > 120 \, \Omega \end{cases}$$

kus

$$x = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r} Z_0} - 0,441.$$

Kaod ribaliinis I

- Sumbetegur (kaod) ülekandeliini juhtivate osade takistuse tõttu on leitavad ligikaudse avaldisega

$$\alpha_j = \begin{cases} \frac{2,7 \cdot 10^{-3} R_s \varepsilon_r Z_0}{30\pi(b-t)} A & \text{kui } \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 < 120 \, \Omega \\ \frac{0,16 R_s}{Z_0 b} B & \text{kui } \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 > 120 \, \Omega \end{cases},$$

kus

$$A = 1 + \frac{2W}{b-t} + \frac{1}{\pi} \frac{b+t}{b-t} \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right),$$
$$B = 1 + \frac{b}{(0,5W + 0,7t)} \left(0,5 + \frac{0,414t}{W} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi W}{t} \right).$$

Kaod ribaliinis II

- Ülekandeliini juhtiva osa pinnatakistus on

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = \frac{1}{\delta_s\sigma},$$

kus σ on juhi materjali juhtivus ja μ selle magnetiline läbitavus ning

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

on pinnakihi paksus.

- Ülekandeliini plaatide vahelises dielektrikus tekkivate kadude panus sumbeteguri kujul on

$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2},$$

kus $\tan \delta$ on dielektriku materjali kaonurga tangens

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{Q}.$$

Ribaliini kasutamine

- Eelised:

- Toetab TEM moodi, alumine lõikesagedus null.
- Sarnaselt koaksiaalkaablile häirekindel.
- Suhteliselt lihtne valmistada.



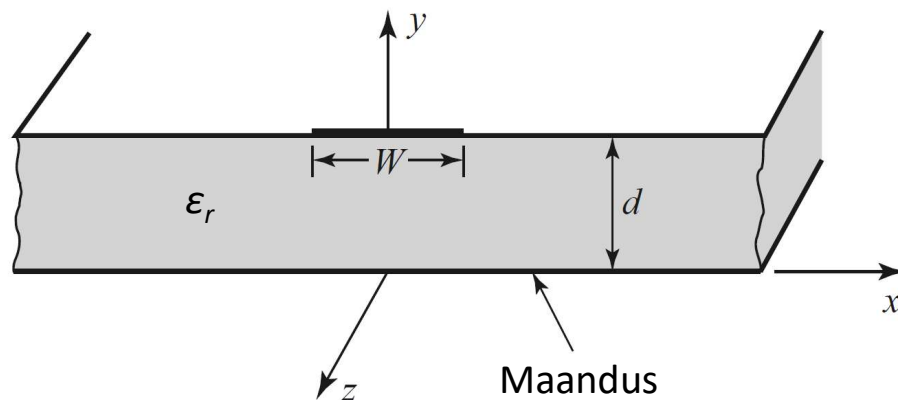
- Puudused:

- Vajab valmistamiseks vähemalt neljakihilist trükkplaati.
- Ühenduste loomine komponentidega trükkplaadil on keerukas.
- Matemaatiline analüüs keerukas, puuduvad lihtsad analüütilised lahendused.



Mikroribaliin

- **Mikroribaliin** (*microstrip line*) on üks praktikas enamlevinud ülekandeliini tüüpe. Laiusega W juhtiv riba asub maandatud tasapinnast kaugusel d . Nende kahe vahel on isolaator suhtelise dielektrilise läbitavusega ϵ_r .
- Kui dielektrik on piisavalt õhukene ($d \ll \lambda$), siis toimub lainelevi kvaasi-TEM moodis.



Joonised: D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.



Mikroribaliin

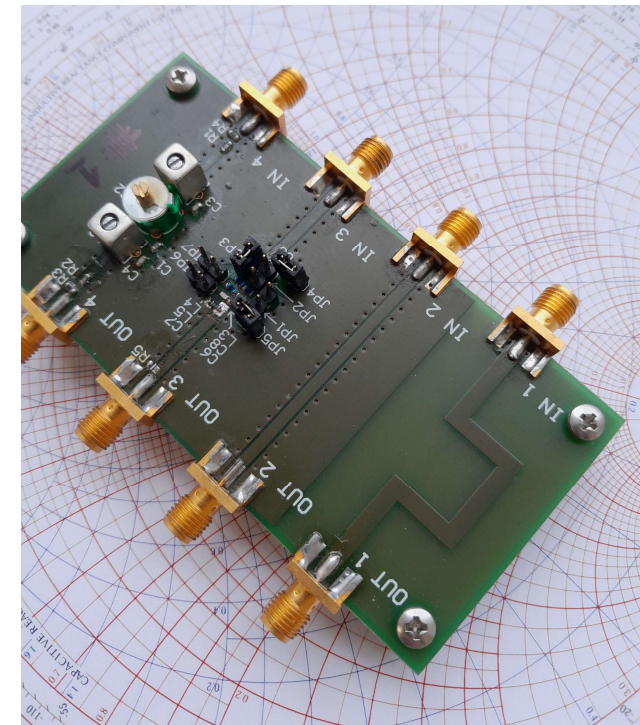
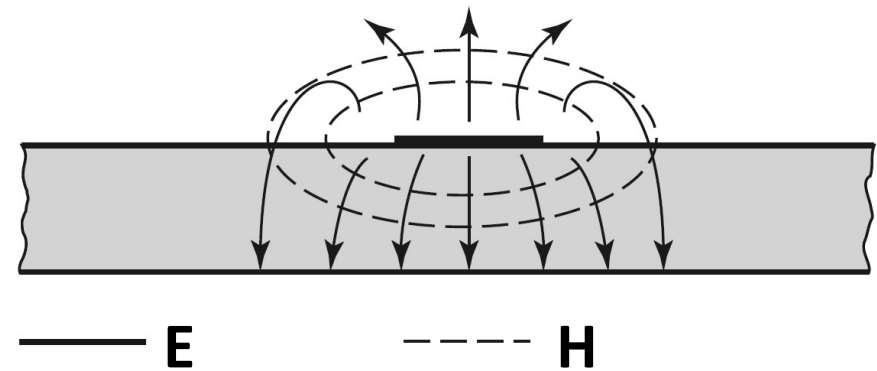
- Kvaasi- TEM moodi korral on faasikiirus ribaliinis

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}},$$

kus ϵ_e on levikeskkonna ekvivalentne suhteline dielektriline läbitavus.

- Viimane jääb vahemiku $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$, olles ligikaudu:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}}.$$

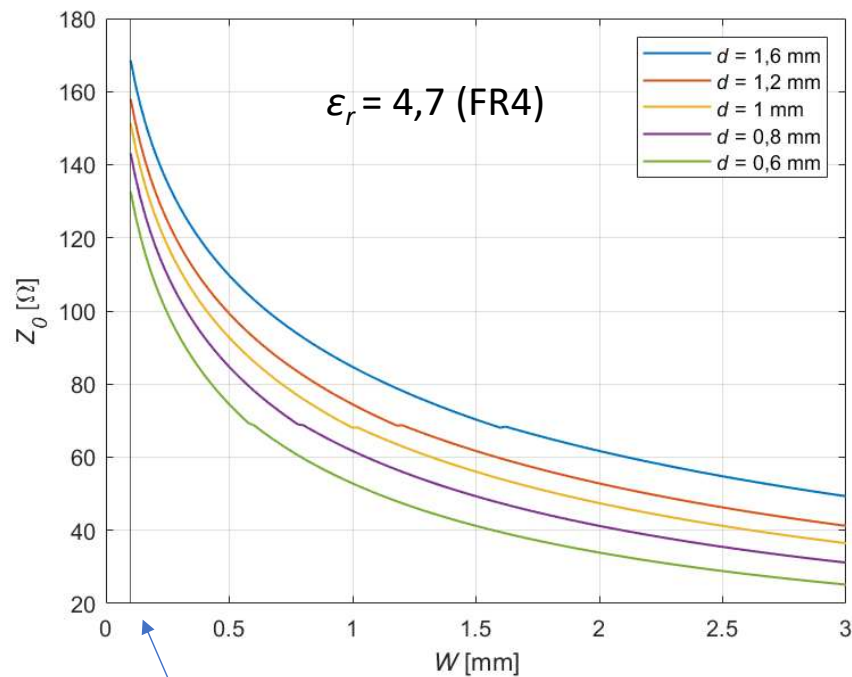


Mikroribaliini lainetakistus

- Ligikaudne avaldis ribaliini karakteristikliku impedantsi leidmiseks on

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{kui } \frac{W}{d} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \left[\frac{W}{d} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1,444 \right) \right]} & \text{kui } \frac{W}{d} > 1 \end{cases}$$

Mikroribaliini lainetakistus



Minimaalne valmistatav vaseriba
laius trükkplaadil on 0,1 mm.

- Mikroribaliiniga on kergem saada suuremaid impedantsi väärtuseid kui ribaliiniga.
- Vastupidiselt on raskem saavutada madalamaid impedantsi väärtuseid.
- Sama impedantsi jaoks on vaja suuremat liini laiust W .

Mikroribaliini laiuse leidmine

- Teades soovitud lainetakistust Z_0 ja dielektriku ε_r saame leida W/d suhte:

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{kui } \frac{W}{d} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right\} \right] & \text{kui } \frac{W}{d} > 2 \end{cases},$$

kus

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right),$$
$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}.$$

Kaod mikroribaliinis

- Sumbetegur kadude tõttu ülekanaliini juhtivates osades:

$$\alpha_j = \frac{R_s}{Z_0 W}.$$

- Dielektrikus tekkivate kadude panus on aga

$$\alpha_d = \frac{k_0 \varepsilon_r (\varepsilon_e - 1) \tan \delta}{2 \sqrt{\varepsilon_e} (\varepsilon_r - 1)},$$

kus k_0 on lainearv vaakumis (kui $v_p = c$).

- Praktikas domineerivad mikroribaliini korral just juhtivuslikud kaod.

Mikroribaliini kasutamine

- Eelised:

- Lihtne valmistada.
- Lihtne trükkplaadi servas pistikute ja pesade külge ühendada.
- Jadakomponentide lihtne ühendamine.
- Saab valmistada ka ainult kahekihilisel trükkplaadil.



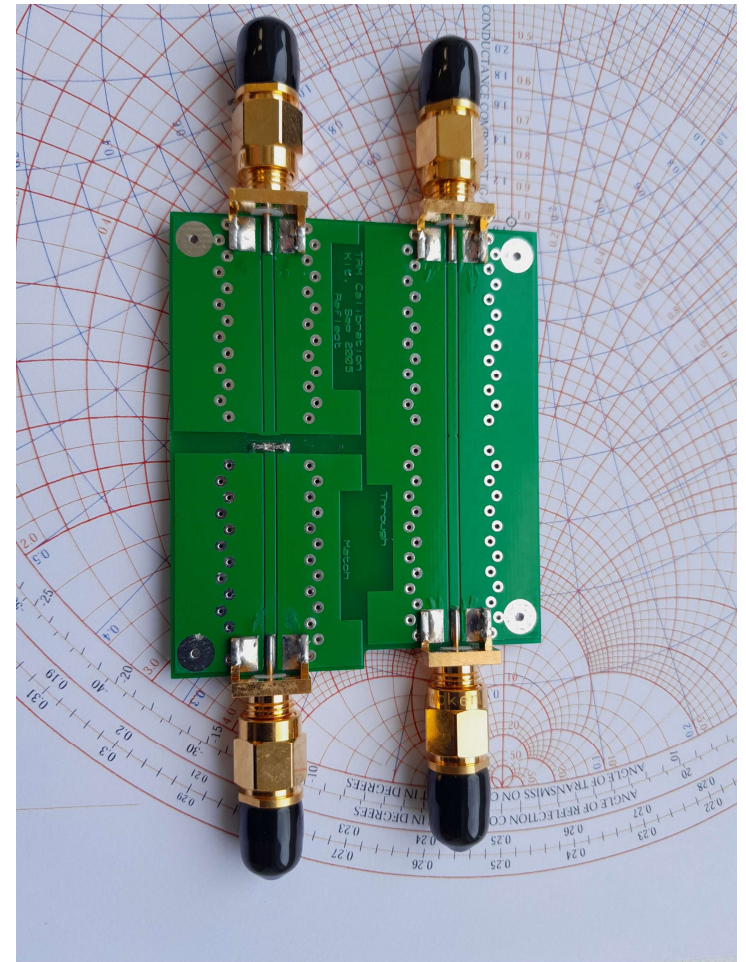
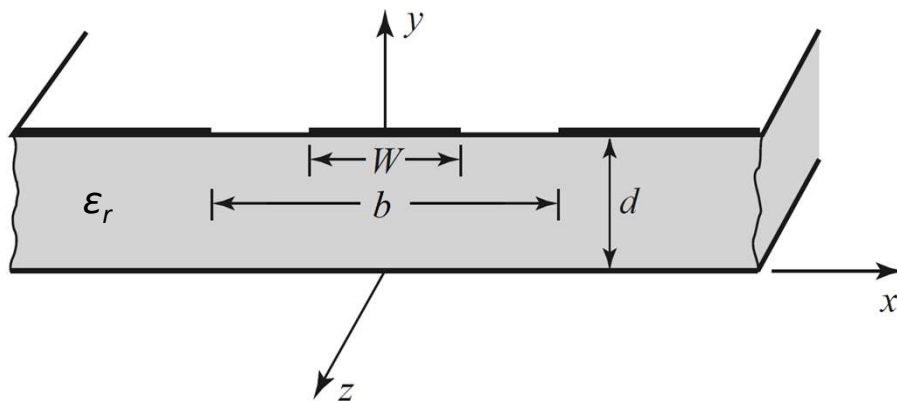
- Puudused:

- Ei toeta TEM moodi.
- Väiksem häirekindlus – võib toimida antennina.
- Ülekostvus naaberradade vahel.
- Komponentide ühendamine ülekandeliini ja maa vahele keerukas.



Koplanaarne ülekandeliin

- **Koplanaarne** (*Coplanar Transmission Line*) lainejuht koosneb kolmest, samal tasandil asuvast (koplanaarsest) juhust.
- Võib omada ka täiendavat neljandat juhti – dielektriku vastasküljel olevat maandatud pinda.



Joonised: D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.

Koplanaarse ülekandeliini lainetakistus I

- Koplanaarse ülekandeliini lainetakistus on

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{e,t}}} \frac{K(k_t')}{K(k_t)}.$$

- Avaldises kasutatakse **esimest liiki täielik elliptiline integraal** on defineeritud kui

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{dt}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}}.$$

- Lihtsustamiseks saab kasutada ligikaudseid avaldise:

$$\frac{K(k)}{K(k')} \approx \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right), \text{ kui } 0 \leq k \leq \sqrt{0,5},$$

$$\frac{K(k')}{K(k)} \approx \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right), \text{ kui } \sqrt{0,5} < k \leq 1,$$

kus

$$k = \frac{W}{b}, \quad k_t = \frac{W_t}{b_t}.$$

Koplaneaarse ülekandeliini lainetakistus II

- Levikeskkonna efektiivne dielektriline läbitavus, kompenseerituna ülekandeliini paksusega:

$$\varepsilon_{e,t} = \varepsilon_e - \frac{\varepsilon_e - 1}{\frac{b - W}{1.4t} \frac{K(k)}{K(k')} + 1}.$$

- Levikeskkonna efektiivne dielektriline läbitavus ise on leitav kui

$$\varepsilon_e = 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{K(k')K(k_1)}{K(k)K(k_1')}.$$

- Lisaks:

$$k'_t = \sqrt{1 - k_t^2},$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2},$$

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi W_t}{4d}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi b_t}{4d}\right)},$$

$$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2}.$$

Koplanaarse ülekandeliini lainetakistus III

- Ülekandeliini paksuse suhtes kohendatud liini laiused:

$$W_t = W + \frac{1,25t}{\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{4\pi W}{t} \right) \right],$$

$$b_t = b - \frac{1,25t}{\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{4\pi W}{t} \right) \right].$$

Koplanaarse ülekandeliini kasutamine

- Eelised:

- Saab valmistada ka ühekihilisel trükkplaadil.
- Komponentide ja pesade jootmine on väga mugav.
- Saame valida sobiva ülekandeliini laiuse W . Vajaliku karakteristliku impedantsi saame realiseerida liini ja maa kauguse sobiva väärtusega

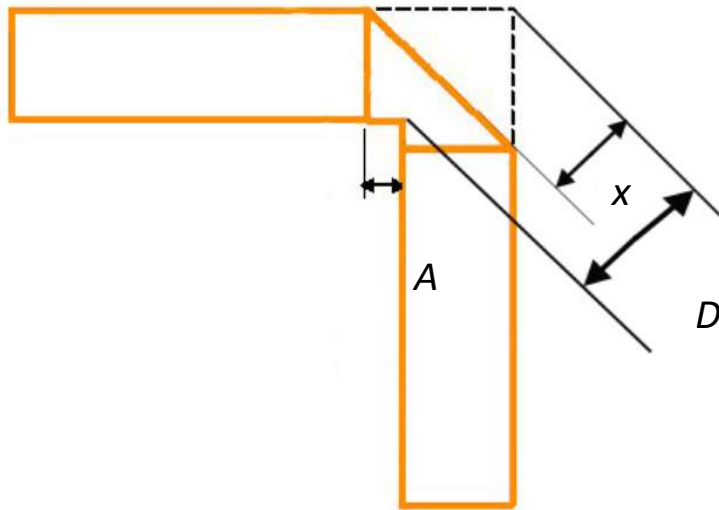


- Puudused:

- Keerukad arvutused.
- Võtab trükkplaadil rohkem ruumi. Maa laius, mõlemal pool tühikut, peaks olema vähemalt $5b$.
- Vajalik liinist kahele poole jäävate alade omavaheliseks ühendamiseks, vähemalt sammuga $\lambda/10$.



Ülekandeliini suuna muutmine



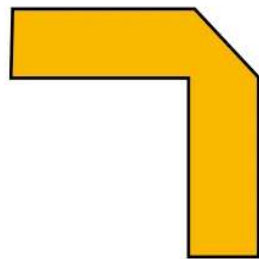
- Kaldlõikega üleminek (*mitered bend*).
- Ruumisäästlikum, sobivam madalamatele sagedustele.
- Optimaalsed mõõdud:

$$D = W\sqrt{2},$$

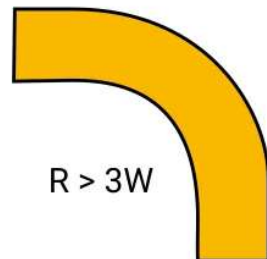
$$x = D \left(0,52 + 0,65e^{-1,35\frac{W}{d}} \right),$$

$$A = x\sqrt{2} - W.$$

Ülekandeliini suuna muutmine



Mittered



Curved

- Sujuva kurviga.
- Vähem parasiitkiirgust ja peegeldusi.
- Võtab trükkplaadil rohkem ruumi. Mõistlik kasutada suurematel sagedustel.
- Pöörderaadius peab olema suurem kui kolmekordne liini laius:

$$R > 3W.$$

Materjale



- Microwaves101, **Stripline Calculator**. [Microwaves101 | Stripline Calculator](#), 16.09.26
- EM: talk, **Microstrip Line Calculator**. [Microstrip Line Calculator | em: talk](#), 16.09.26
- Microwaves101, **Coplanar Waveguide Calculator**. [Microwaves101 | Coplanar Waveguide Calculator](#), 16.09.26
- Chemandy Electronics, **Coplanar Waveguide With Ground Characteristic Impedance Calculator**. [Coplanar Waveguide With Ground Calculator](#), 16.09.26
- Aksel Jõgi, **Erifunktsioonid I**. Tallinn, TTÜ 1995.