6. Ülekanedliini lõikudega sobitamine

IEE2560 – Raadiosageduslik elektroonika



Allika ja koormuse sobitamine

Meeldetuletus

- Koormatud ülekandeliini impedants $Z(x)$ kaugusel x koormusest Z_K:

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

- Kaovaba ülekandeliini korral lihtsustus viimane kujule:

$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_K - \mathrm{j} Z_0 \tan(kx)}{Z_0 - \mathrm{j} Z_K \tan(kx)}.$$

- **Kuidas leida** ülekandeliini pikkus mis tagaks vajaliku impedantsi väärtuse?

Otsast lahtine ülekandeliin reaktiivsusena

- Mäletatavasti on kaovaba ülekandeliini impedantsi sõltuvus liini pikkusest *x* ja sellel lõpus oleva koormuse impedantsist Z_K kujul:

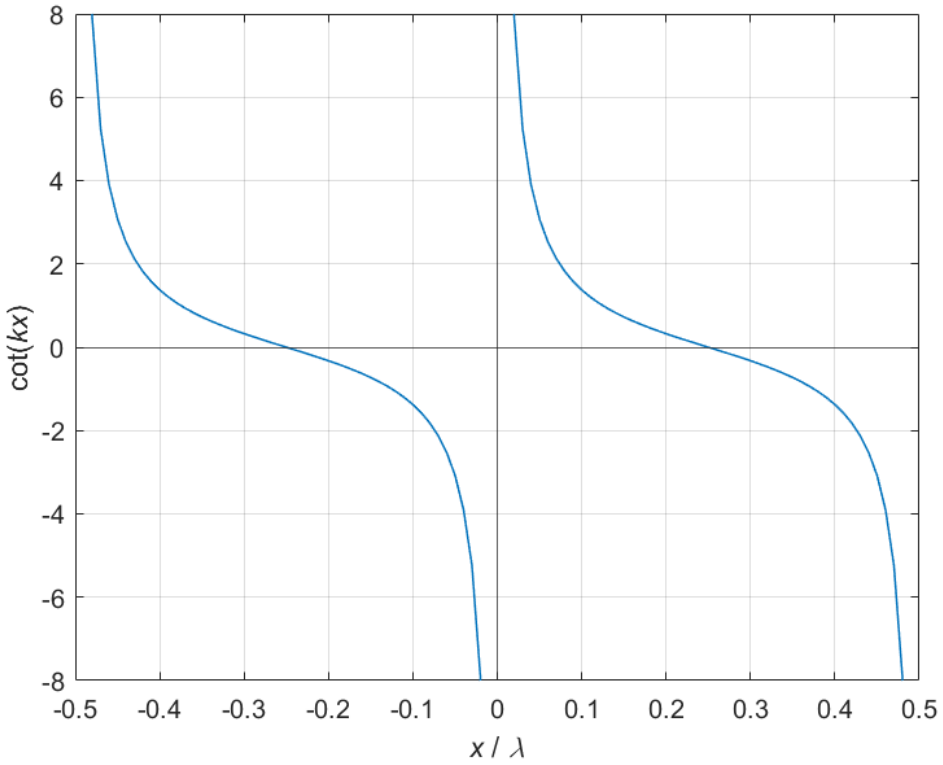
$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_K - \mathrm{j}Z_0 \tan(kx)}{Z_0 - \mathrm{j}Z_K \tan(kx)}.$$

- Kui liini lõpp on lahti, ehk tühises, siis sellele vastav $Z_K = \infty$. Viimane avaldis lihtsustub kujule

$$Z(x) = Z_0 \frac{1}{-\mathrm{j}\tan(kx)} = \mathrm{j}Z_0 \cot(kx)\,.$$

- Näeme, et impedants on puhtalt imaginaarne – just nagu reaktiivkomponentide korral! **NB! Pikkus *x* allika suunas on negatiivne!**

Otsast lahtine ülekandeliin reaktiivsusena



- Liinilõiguga mille pikkus on kuni veerand laine omast ($0 > x > -\lambda/4$) on võimalik realiseerida kuitahes suurt, negatiivset reaktiivtakistust – **mahtuvust**.
- Liiniliõiguga mille pikkus on veerand kuni pool laine omast ($-\lambda/4 > x > -\lambda/2$), on võimalik realiseerida kuitahes suurt, positiivset reaktiivtakistust – **induktiivsust**.

Induktiivsuse realiseerimine

- Leiame soovitud induktiivsuse *L* realiseerimiseks vajaliku liinilõigu pikkuse *x*. Selleks tuleb lahendada võrrand:

$$\mathrm{j}Z_0 \cot(kx) = \mathrm{j}\omega L.$$

- Arvestame, et $\omega = 2\pi f$ ja

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v_p} = \frac{\omega}{VF \cdot c},$$

kus v_p on signaali faasikiirus konkreetses ülekandeliinis.

- Tulemuseks on

$$x = \frac{v_p}{\omega} \operatorname{acot} \frac{\omega L}{Z_0}.$$

- Arkuskootangens on üheselt defineeritud vahemikus ±π/2, kuid ülekandeliini pikkus on aga vahemikus –π/2 kuni 0. Seega tuleb avaldist kohendada kujule:

$$l = \frac{v_p}{\omega} \left(\pi - \operatorname{acot} \frac{\omega L}{Z_0} \right).$$

- NB! Saadud lõigu pikkus *l* on **positiivne suurus**.

Mahtuvuse realiseerimine

- Sarnaselt saab leida mahtuvuse *C* ekvivalendi realiseerimiseks vajaliku liinilõigu pikkuse:

$$l = \frac{v_p}{\omega}\operatorname{acot}\frac{1}{\omega C Z_0} = \frac{v_p}{\omega}\operatorname{atan}(\omega C Z_0).$$

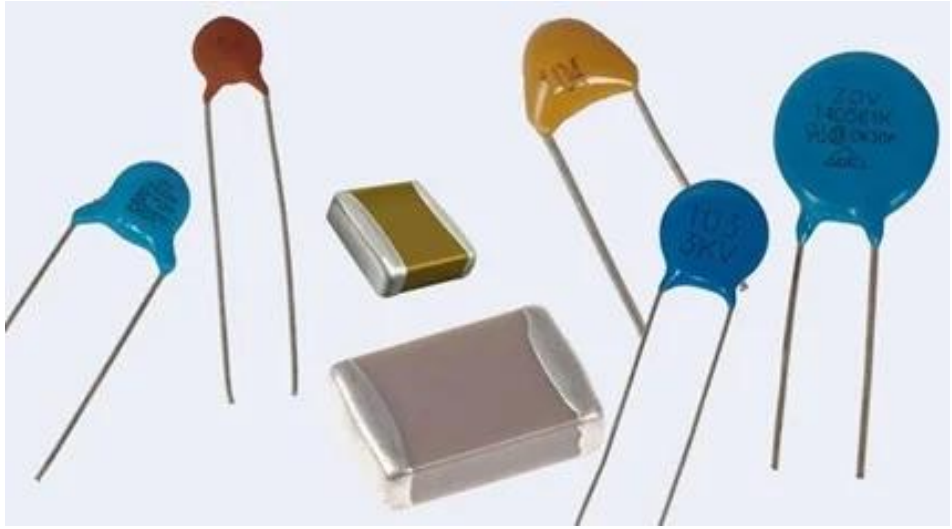


Foto: https://www.quarktwin.com/blogs/capacitor/ceramic-capacitor-its-definition-main-types-characteristics-and-uses/5

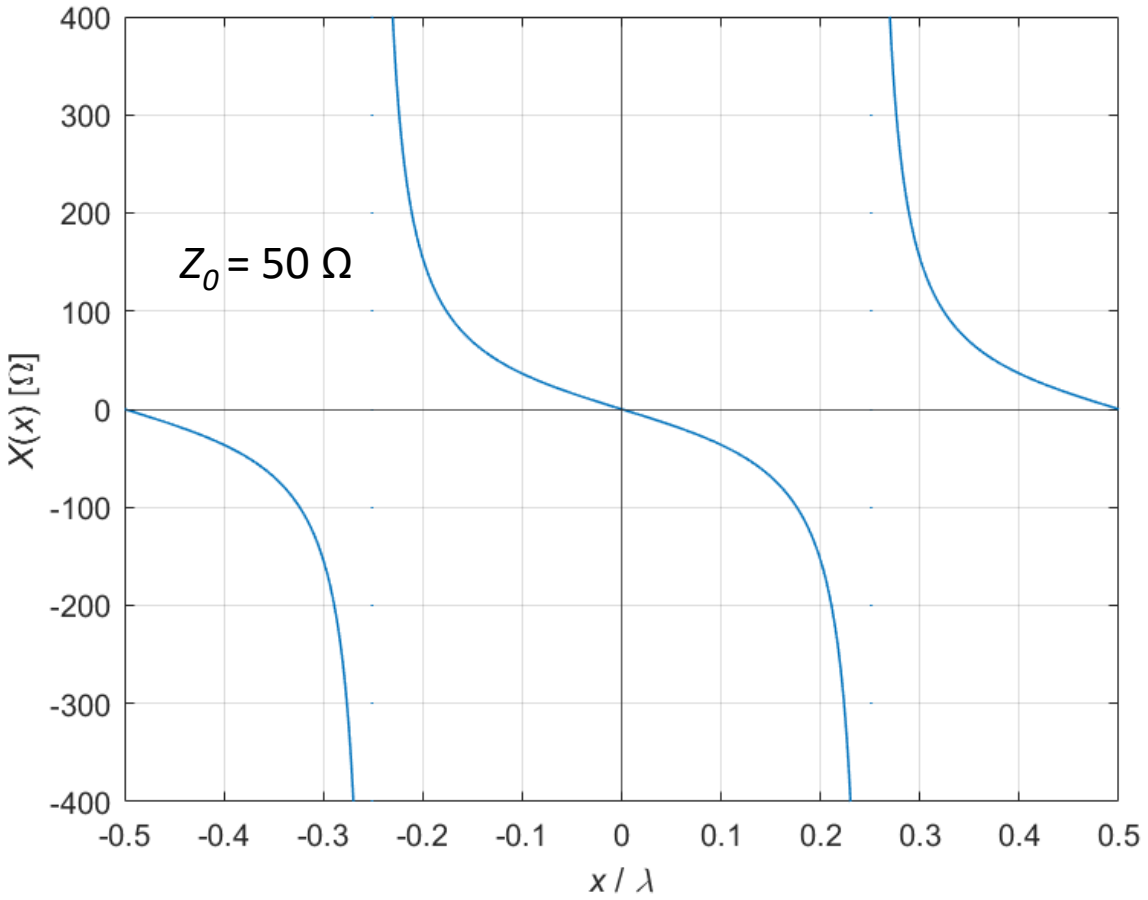
Lühistatud ülekandeliin reaktiivsusena

- Kui ülekandeliin on otsast lühistatud ($Z_K = 0$) siis impedants tema teisest otsast mõõdetuna on samuti puhtalt reaktiivne

$$Z(x) = -\mathrm{j}Z_0 \tan(kx).$$

- Vähim pikkus *l* mille korral, ülekandeliin lainetakistusega Z_0, käitub sagedusel *f* induktiivsusena *L* on leitav kui

$$l = \frac{v_p}{\omega} \operatorname{atan} \frac{\omega L}{Z_0}.$$



Lühistatud ülekandeliin reaktiivsusena

- Analoogiliselt induktiivsusele saab realiseerida ka mahtuvust *C*:

$$l = \frac{v_p}{\omega}\left(\pi - \operatorname{atan}\frac{1}{\omega C Z_0}\right) = \\ = \frac{v_p}{\omega}\left[\pi - \operatorname{acot}(\omega C Z_0)\right].$$



Veerandlainetrafo

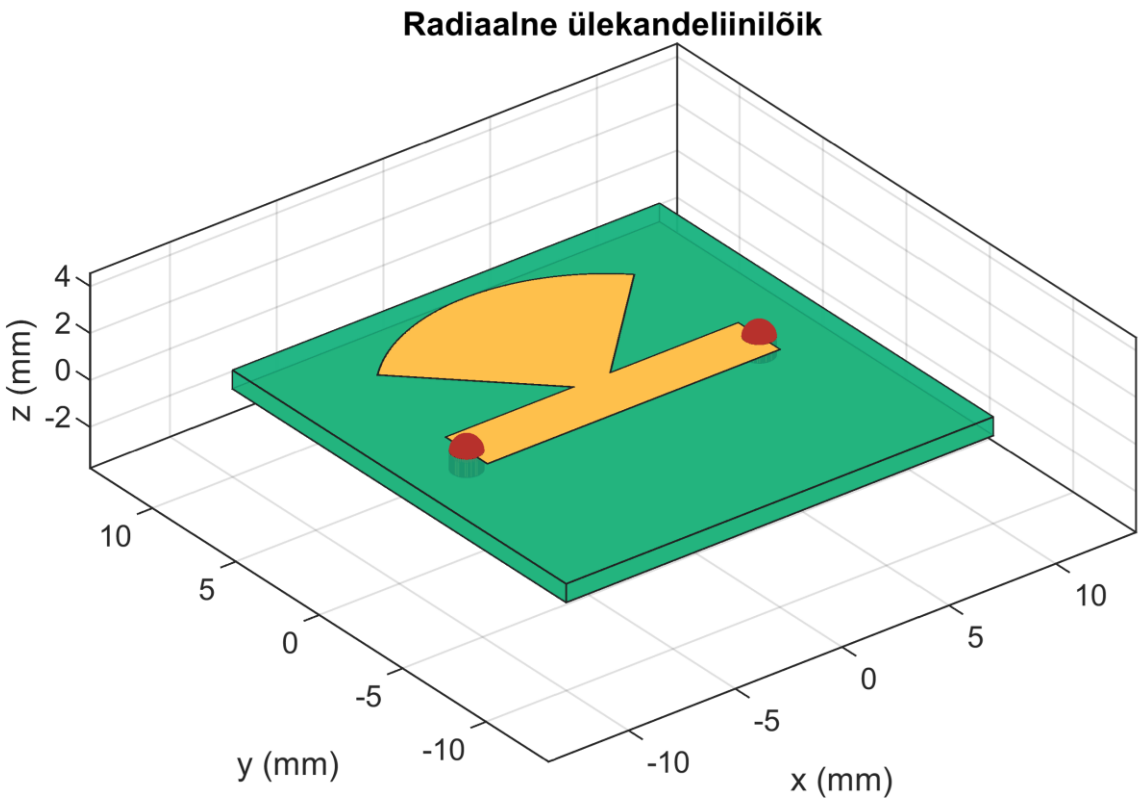
- Üheks koormatud ülekandeliini erijuhuks on olukord kus viimase pikkus on võrdne veerandiga selles kulgeva laine omast λ.
- Sellist liinilõiku nimetatakse **veerandlainetraafoks** (*quarter wavelength transformer*).
- Kaovaba liini impedantsi vaadeldaval erijuhul $x = \lambda/4$ on

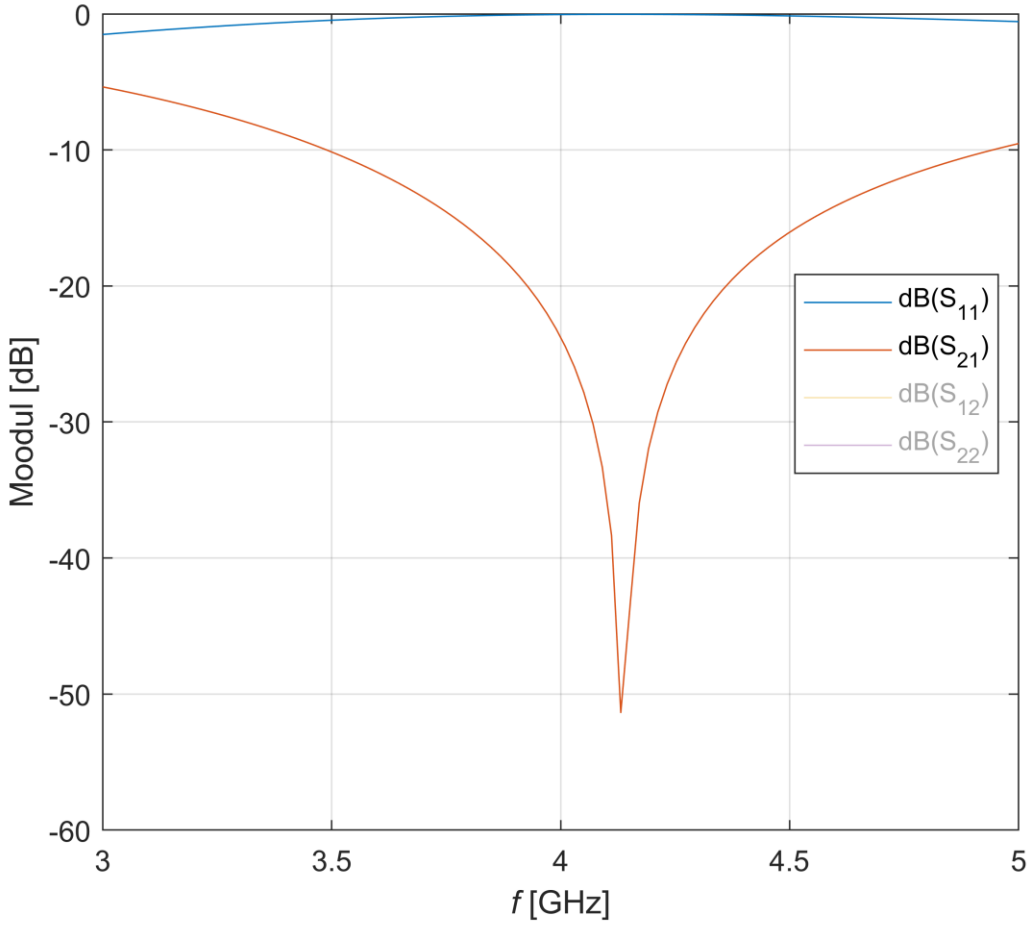
$$Z\left(\frac{\lambda}{4}\right) = Z_0 \frac{Z_K - \mathrm{j}Z_0 \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{Z_0 - \mathrm{j}Z_K \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{Z_0^2}{Z_K}.$$

- Allika ja koormuse impedantside sobitamiseks saab kasutada seega veerand lainepikkuse pikkust liinilõiku lainetakistusega

$$Z_0 = \sqrt{Z_A \cdot Z_K}.$$

Radiaalne liinilõik tõkkefiltrina





Radiaalne liinilõik lahtisidestusahelas

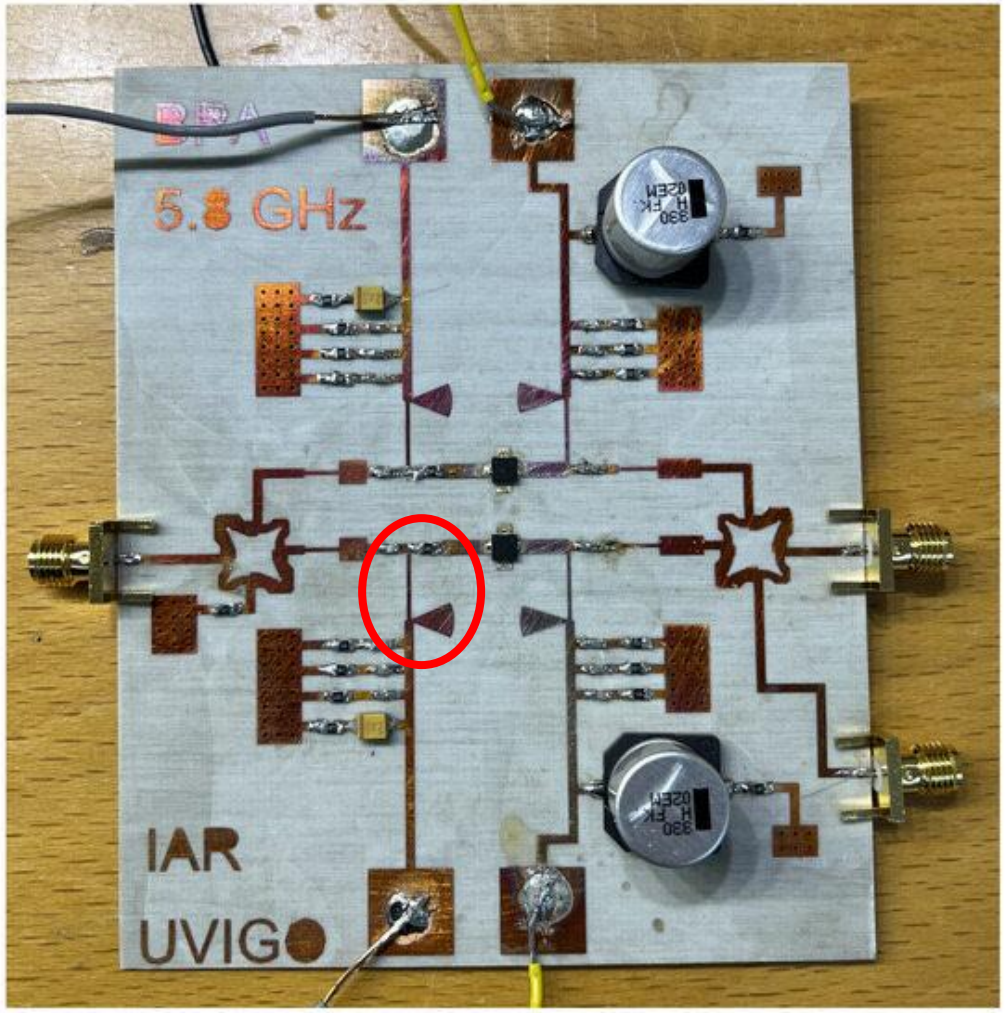
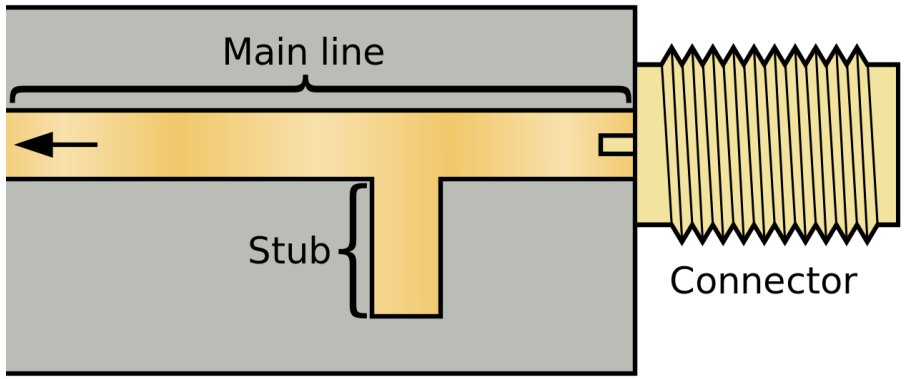


Foto: Alvarez-Ramos, I.; Morales-Fernandez, A.; Marante-Boado, M.; Fernandez-Barciela, M.; Martin-Rodriguez, F. Hybrid Balanced Power Amplifier at 5.8 GHz Using GaN HEMTS and Sierpinski Space-Filling Couplers Design Approach. Electronics 2026, 15, 3168. https://doi.org/10.3390/electronics15143168

Ülekandeliinidega sobitusahelad

- Tutvume meetodiga (*single stub matching*) järgneva näite varal.
- Sobita koormus Z_K = 25 - j50 Ω ülekandeliiniga mille lainetakistus on Z_0 = 50 Ω.
  - Antud juhul on siis allikaks ülekandeliin ja $Z_A = Z_0$.
- Olgu kasutatava ülekandeliini kiirusteguri väärtus *VF* = 0,8.
- Sobitus on vaja tagada töösagedusel f = 862 MHz.



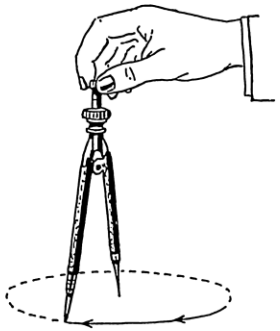
Sobitamine ülekandeliinidega

- Esmalt peame leida ülekandeliini pikkuse *l* mille juures teisendataks koormuse impedantsi reaalosa (takistus R_K) võrdseks allika omaga R_A.
- Vajaliku pikkuse saab leida kui lahendame võrrandi

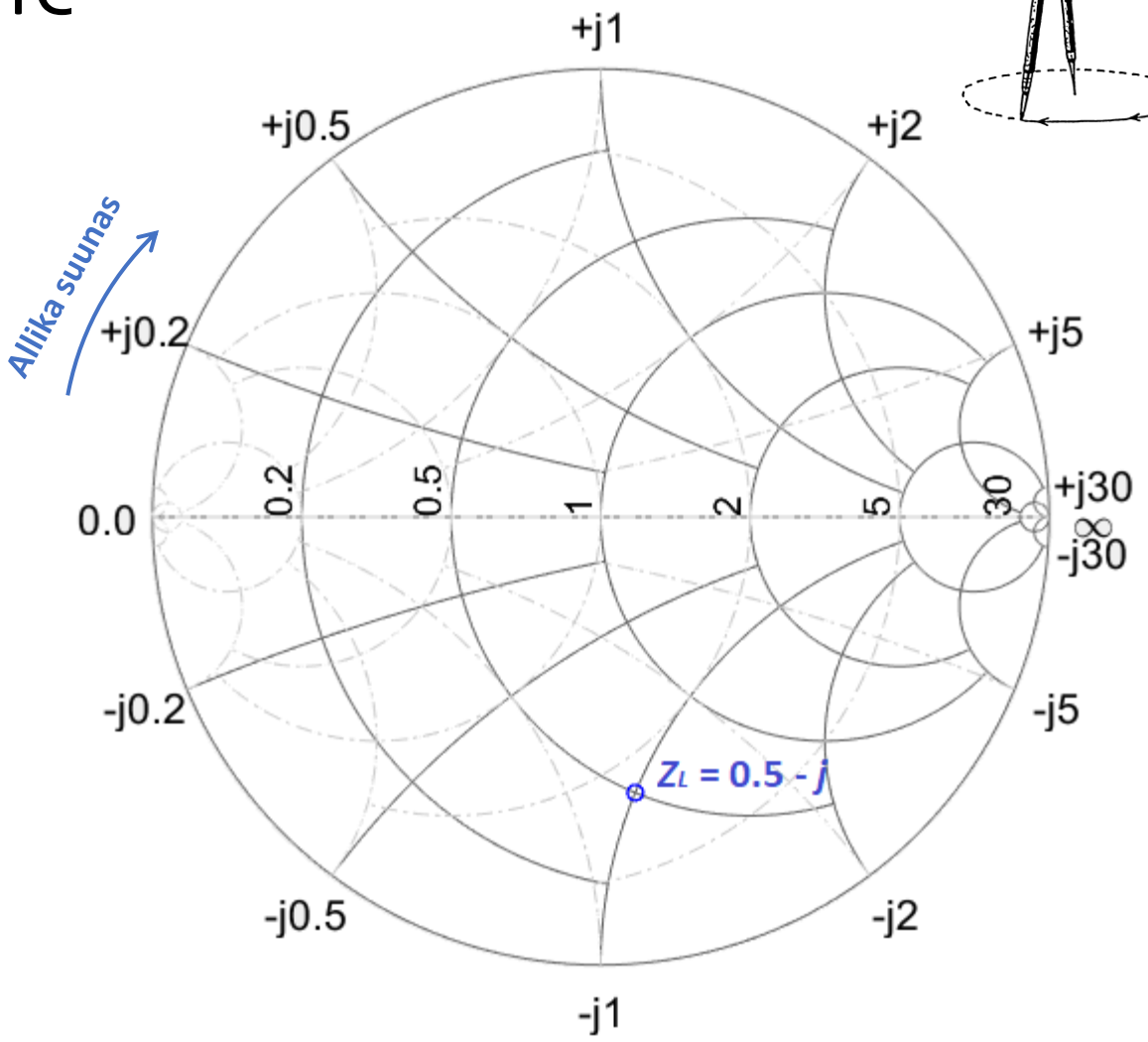
$$\mathrm{Re}\left\{Z_0 \frac{Z_K - \mathrm{j}Z_0 \tan(kl)}{Z_0 - \mathrm{j}Z_K \tan(kl)}\right\} = R_A.$$

  Viimane on siis eeldusel et ülekandeliin on kaovaba.
- Alternatiivina on võimalik vajalik pikkus leida Smithi diagrammi abil. Sellisel juhul peame esmalt normeerima koormuse impedantsi Z_K ja kandma saadud tulemuse Smith'i diagrammile.

Põhiliini pikkuse leidmine



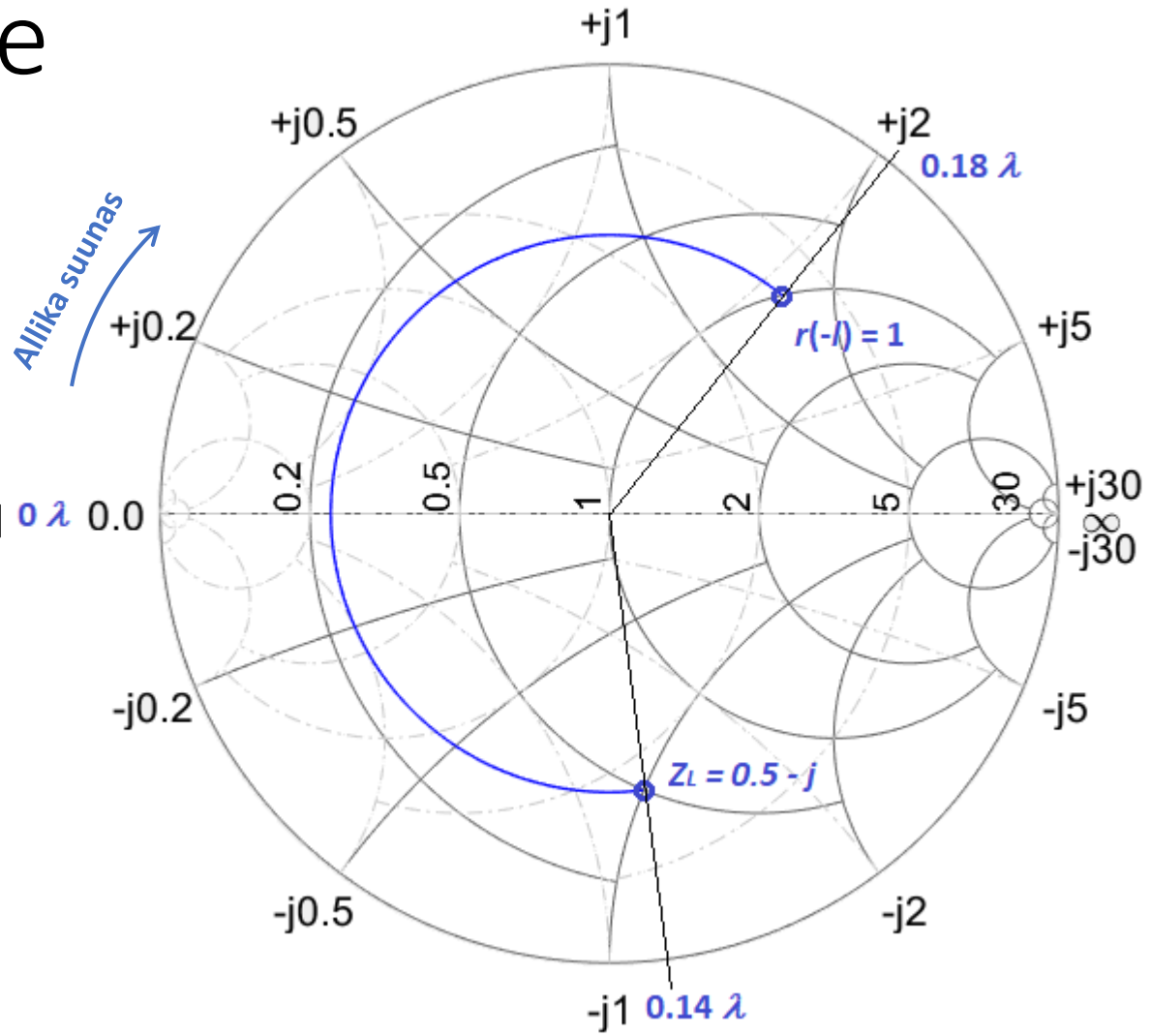
- Sobivaks normeerimisteguriks oleks antud juhul samuti $Z_0 = 50\ \Omega$. Normeeritud koormus: $z_K = 0{,}5 - j$.
- Sellest punktis hakkame kellaosuti liikumise suunas allika poole liikuma.
- Kaovaba ülekandeliini eeldusel on liikumisteekonnaks ringjoone lõik.
- Ringi keskpunktiks on diagrammi keskpunkt ja raadiuseks koormuse peegeldusteguri moodul $|\Gamma_K|$.



Põhiliini pikkuse leidmine

- Kaar lõppeb punktis kus ta lõikub konstantse takistuse ringiga r_A. Meie näites siis r = 1 (50 Ω).
- Saadud kaare pikkus on võrdne vajaliku põhiliini pikkusega. Mõõtühikuks ei ole meetrid vaid signaali lainepikkus.
- Diagrammi ümbritseva radiaalse skaala abil leiame, et vajalik pikkus on:

$$l = 0{,}18\lambda + 0{,}14\lambda = 0{,}32\lambda.$$



Põhiliini pikkuse leidmine

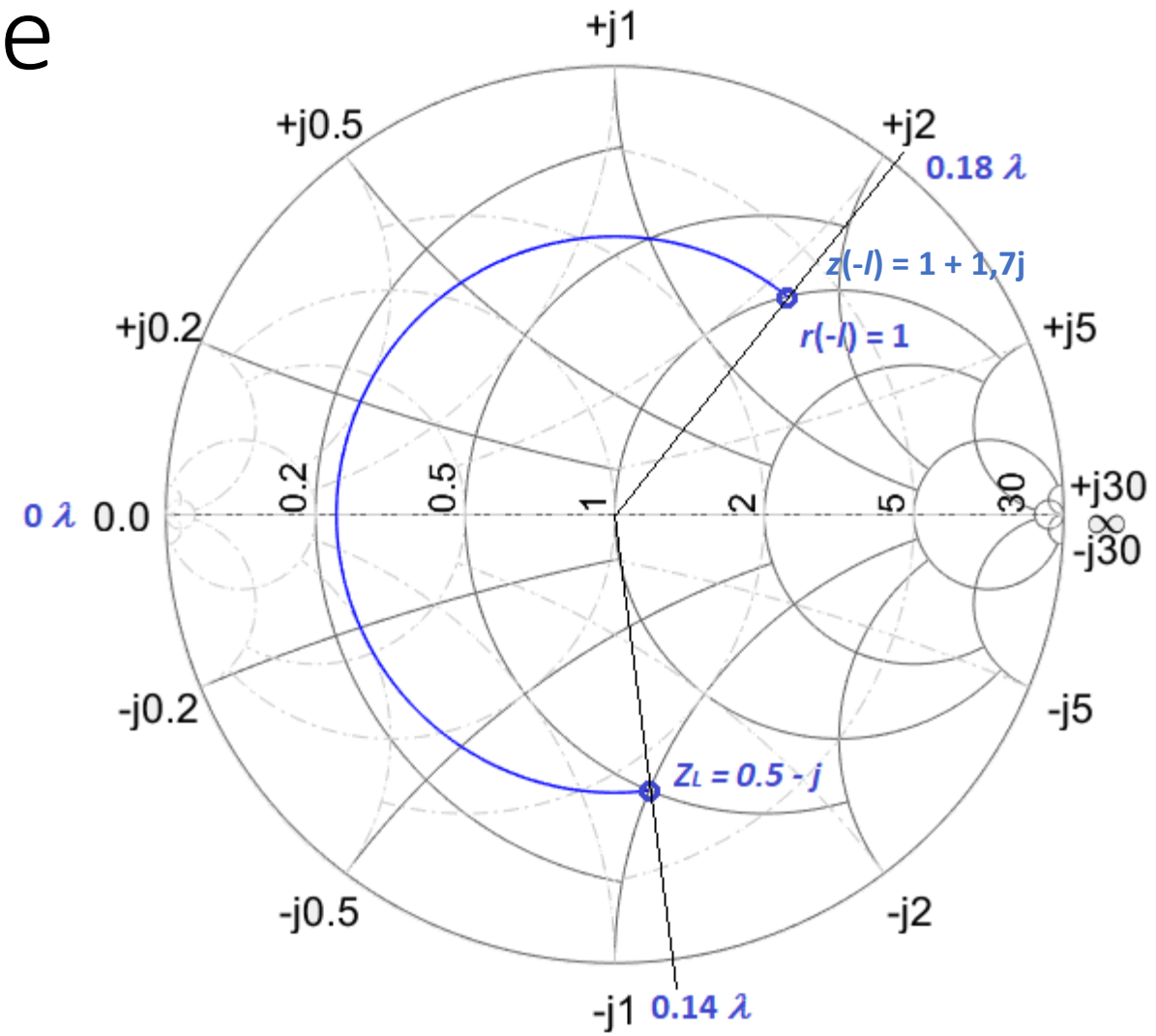
- Meie näites on signaali lainepikkus

$$\lambda = \frac{c \cdot VF}{f} = \frac{300 \cdot 0{,}8}{862} = 0{,}278\ \text{m}.$$

- Seega vajalik põhiliini pikkus:

$$l = 0{,}32\lambda = \underline{\mathbf{8{,}9\ cm.}}$$

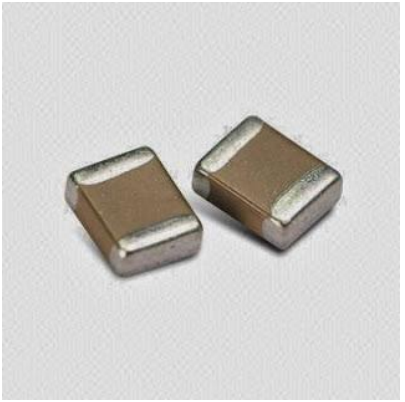
- Koormuse reaalosa on nüüd võrdne allika omaga. Järgnevalt on vaja lahti saada soovimatust reaktiivsusest x = +1,7j (85j Ω).



Reaktiivosa kompenseerimine

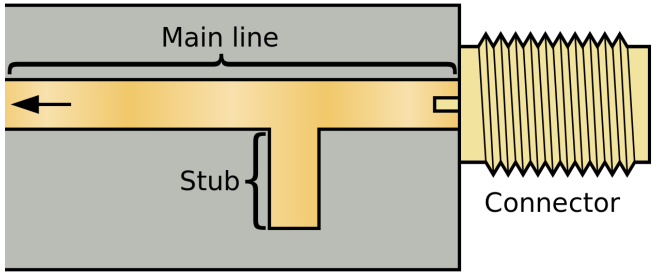
- Esimesena pähe tulevaks lahenduseks oleks kompenseerimismeetodi kasutamine.
- Soovimatu induktiivsuse kompenseerimiseks võib näiteks ülekandeliiniga jadamisi ühendada mahtuvuse:

$$C_j = \frac{1}{\omega Z_o |x|} = 2{,}2 \text{ pF}.$$



Sobitamine ülekandeliinidega

- Töösageduse tõustes muutuvad vajalike diskreetkomponentide nimiväärtused aina väiksemaks. Mingist hetkest alates ei ole sobilike komponente enam saada.
- Sobiva pikkusega, otsast avatud (*Open-circuited transmission line stub*) või lühistatud (*Short-circuited transmission line stub*), liinilõike saab kasutada nii induktiivsuse kui mahtuvuse asemel.
- Järgnevalt vaatame kuidas käesoleva näite korral leida mahtuvuse tagamiseks vajaliku, otsast lahtise, liinilõigu pikkus.



Sobituslõigu pikkus

- Vajaliku sobituslõigu pikkuse saab arvutada analüütiliselt. Antud juhul siis avaldisega

$$l_s = \frac{c \cdot VF}{\omega} \operatorname{atan}(\omega C Z_0).$$

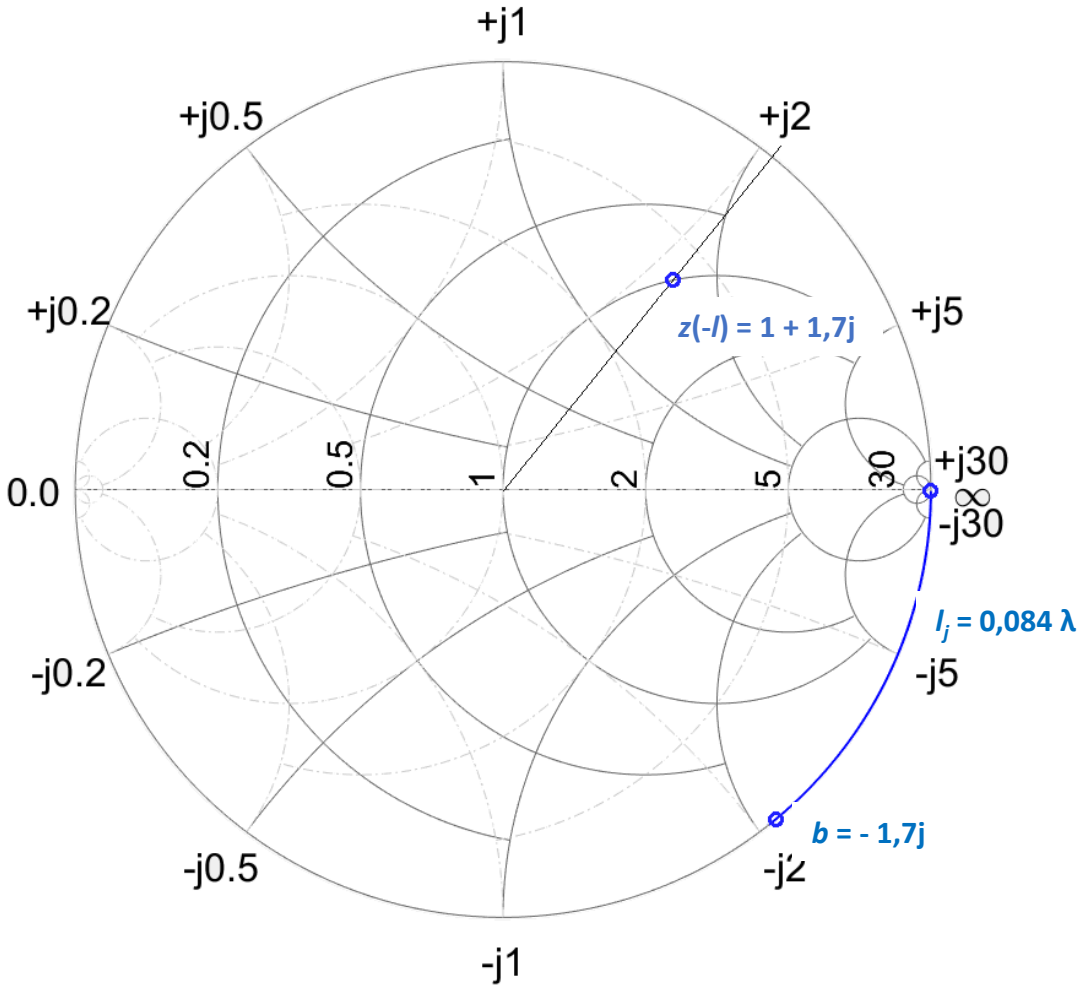
- Meie näite korral: l_s = 2,38 cm.
- Sobitusahel koosneb 2,38 cm pikkusest, otsast lahtisest liinilõigust mis on 8,9 cm kaugusel (pikki põhiliini) koormusest ja on ühendatud põhiliiniga **jadamisi**.

Sobituslõigu pikkus Smithi' diagrammiga

- Viimase mõju kompenseerimiseks vajame põhiliiniga jadamisi ühendatud sobituslõigu otsas impedantsi b_j = -1,7j.
- Otsast avatud liinilõigu koormuseks on g = 0. Millele vastav alguspunkt on diagrammi kõige parempoolsem ($r = \infty$).
- Sobituslõigu pikkuse saab nüüd lihtsalt Smithi diagrammilt maha lugeda:

$$l_p = 0{,}084\ \lambda = 2{,}33\ \text{cm}.$$

- Võrreldes saadud tulemust arvutatuga 2,38 cm, näeme, et erinevus on ainult 2%.



LISA A: Jada - rööpteisendus

- Mingil fikseeritud sagedusel *f* on igale RC ja LC jadaahelale võimalik leida ekvivalentne (RC või LC) rööpahel. Kui jadaahela impedants on $Z_j = R_j + jX_j$ siis vastava rööpahela takistus on leitav kui

$$R_p = \frac{|Z_j|^2}{R_j} = \frac{R_j^2 + X_j^2}{R_j}.$$

- Viimasega rööbiti on siis reaktiivtakistus suurusega

$$X_p = -\frac{|Z_j|^2}{X_j} = -\frac{R_j^2 + X_j^2}{X_j}.$$

- Loomulikult on teisendus võimalik ka vastupidises suunas $Z_p \rightarrow Z_j$.

LISA A: Jada – rööpteisendus hüveteguri kaudu

- Kui meil on teada jadaahela hüvetegur Q_j saab ekvivalentse rööpahela leida ka selle kaudu. Ilmselgelt ei sõltu hüvetegur sellest kas kirjeldame ahelat jada- või rööpskeemina, seega $Q_j = Q_p = Q$.
- Rööpahela takistus

$$R_p = R_j(1 + Q^2).$$

- Rööpahela reaktiivkomponendi reaktiivtakistus aga

$$X_p = X_j\left(1 + \frac{1}{Q^2}\right).$$

- Ka see teisendus on loomulikult mõlemasuunaline.