



Flutningslinur

Sæmundur E. Þorsteinsson, TF₃UA



Flutningslínur

- Á formlegri ensku heita þær „Transmission Lines“
 - Líka oft kallaðar „Feeder lines“
 - Fæðilínur
 - Flutningslínur, merkjaflutningslínur
- Flutningslína flytur afl (merki) milli sendis og loftnets
 - Í báðar áttir
 - Getur líka flutt merki milli tækja
 - Einstakra stiga (tækjahluta)
 - t.d. frá sveifluvaka inn á blandara í viðtæki
 - Hugsum þó oftast um flutningslínur milli sendis-viðtækis og loftnets
- Hvað er svona merkilegt við þessar línur?

Úr Otradal

http://tf4m.com/nextgen-gallery/nggallery/amateur-radio-2/web_024-2/



Háspennulínur



<http://landsnet.is/raforkukerfid/flutningskerfilandsnets/>

Útvarpsstöð í Póllandi

225 kHz, 1,2 MW



http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line#Twisted_pair

Hvað er svona merkilegt við flutningslínur?



- Mjög lítið þegar bylgjulengdin er miklu miklu lengri en línan
 - $\lambda \gg L$, þar sem L er lengd línunnar
 - Reyndar er það fjórðungur úr bylgjulengd sem er áhugaverður
- Þetta á t.d. við lampasnúrur. Bylgjulengdin á 230 V 50 Hz veituspennunni er:
 - Ljóshraðinn er 300 þús. km á sekúndu eða 300 milljón metrar á sekúndu eða

$$c = \lambda \times f$$
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{50 \text{ /s}} = 6 \times 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$$

- Þá er fjórðungur úr bylgjulengd = 1500 km



Þjappaðir og dreifðir stuðlar

- Þegar línan er miklu miklu styttri en bylgjulengdin þurfum við ekki að hugsa um línueiginleikana
- Til að reikna út rafrásir notum við oftast líkön sem eru byggð á því, þ.e. allir stuðlar eru „þjappaðir“ (e. lumped)
- Þetta klikkar þegar tíðnin verður mjög há
 - Í tölvu getur takturinn verið 3 GHz, þá er bylgjulengdin 10 cm og fjórðungur úr henni 2,5 cm. Þá þurfa hönnuðir að kunna línufræði

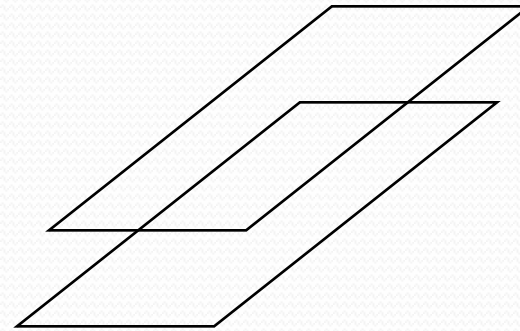
Margar gerðir lína



2 vírar
balanseruð



kóax
óbalanseruð



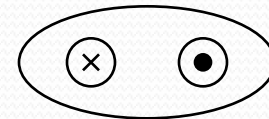
samsíða plötur með
einangrandi efni á milli



randalína
microstrip

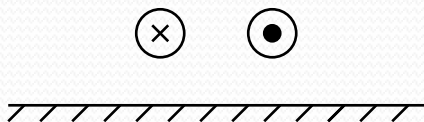


randalína

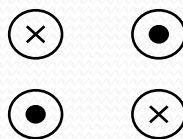


2 skermaðir vírar
balanseruð

Margar gerðir lína



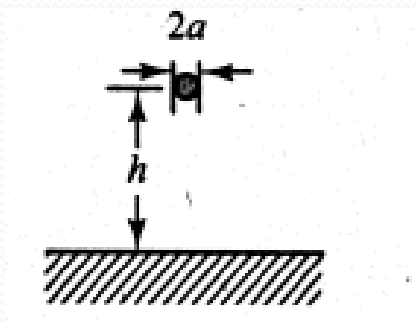
2 vírar yfir jörð
balanseruð



4 vírar
balanseruð

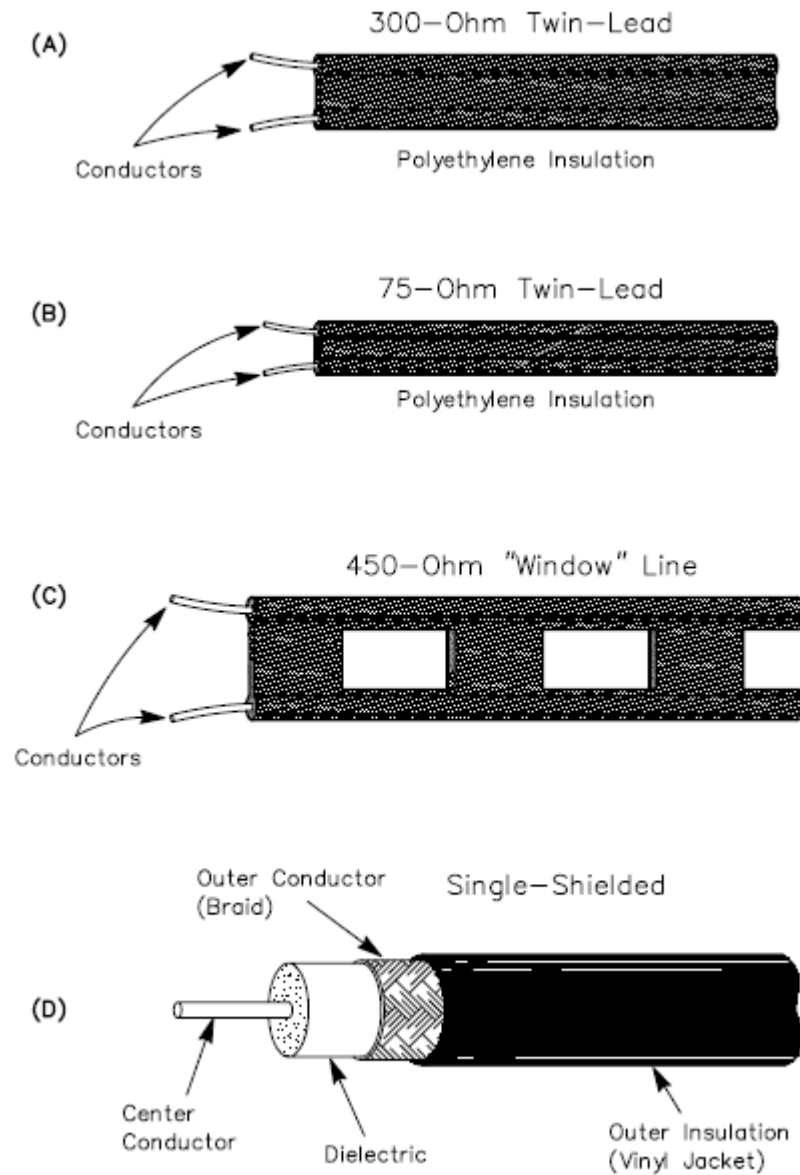
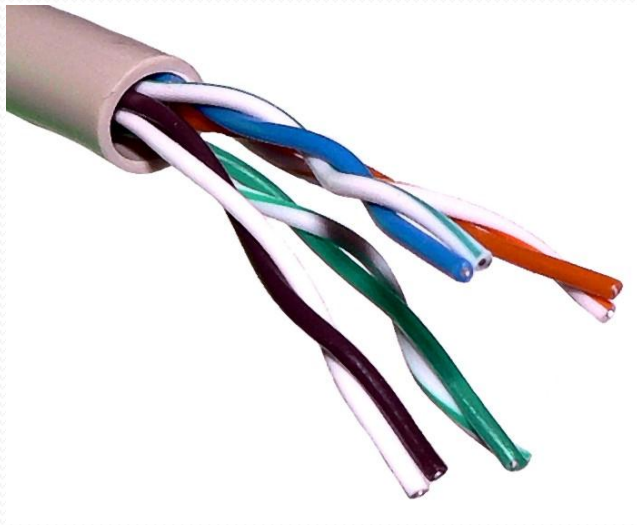


3 vírar
óbalanseruð



Vír yfir jörð

Margar gerðir lína



Balanseraðar og óbalanseraðar línur



- Kóax er dæmi um óbalanseraða línu
- Opin lína er balanseruð
- Lína sem mynduð er úr tveimur kóöxum er balanseruð
- Lína þar sem báðir leiðarar eru á sömu spennu gagnvart jörð er balanseruð
 - Þá er sami straumur í báðum leiðurum
- Balun (**B**alanced to **U**nbalanced)
 - Notað þar sem tengja þarf balanseraða línu við t.d. sendi með kóax útgangi
 - Balun eru oft spennar í leiðinni 1:4, 1:8 og s.frv.
 - Með ferritkjörnum og línunum undnum á þá er hægt að búa til balun með nærri hvaða spennuhlutfalli sem er
 - Jerry Sevick, W2FMI, Transmission Line Transformers

Balanseraðar og óbalanseraðar línur

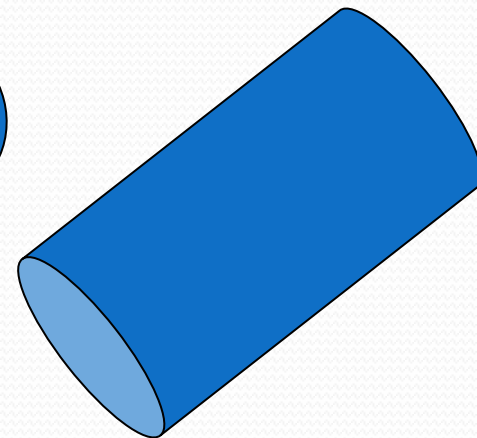
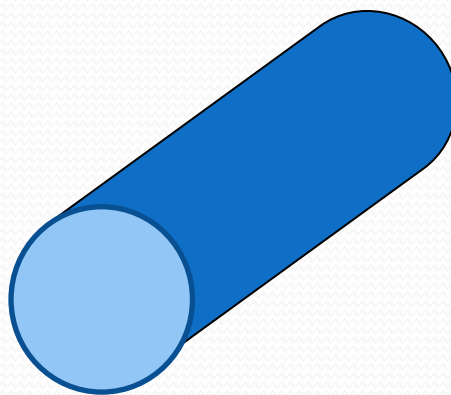
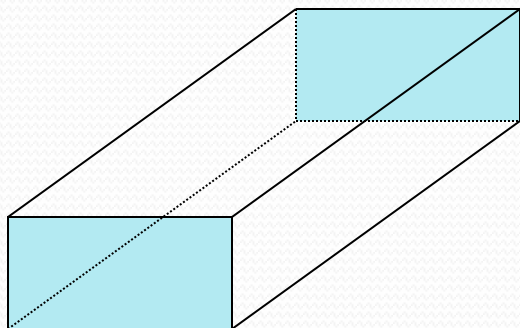


- Gott er að nota balun þegar kóax er notaður til að fæða tvípól
 - Minnkar hættu á því að straumur streymi á ytra byrði kóaxins og valdi útgeislun sem við viljum ekki
- Hugsanlegt er að nota ferritkjarna sem balun á kóax
 - Þá verður til dvalvefja (sjók) gagnvart ytri stramnum en hefur engin áhrif á strauminn inni í kóaxinum
- Einnig hægt að vefja kóaxinn í spólu
- Einnig eru til UnUn
 - Spennir milli tveggja óbalanseraðra kerfa

Bylgjuleiðarar



- Línur eru sértilvik af bylgjuleiðurum. Línur hafa þann galla að þegar tíðnin er mjög há eru mikil töp
 - t.d. eru kopartöp $\propto \sqrt{f}$
- Bylgjuleiðarar eru oftast ferhyrndar, hring- eða sporöskjulaga (ellipsulaga) holar pípur

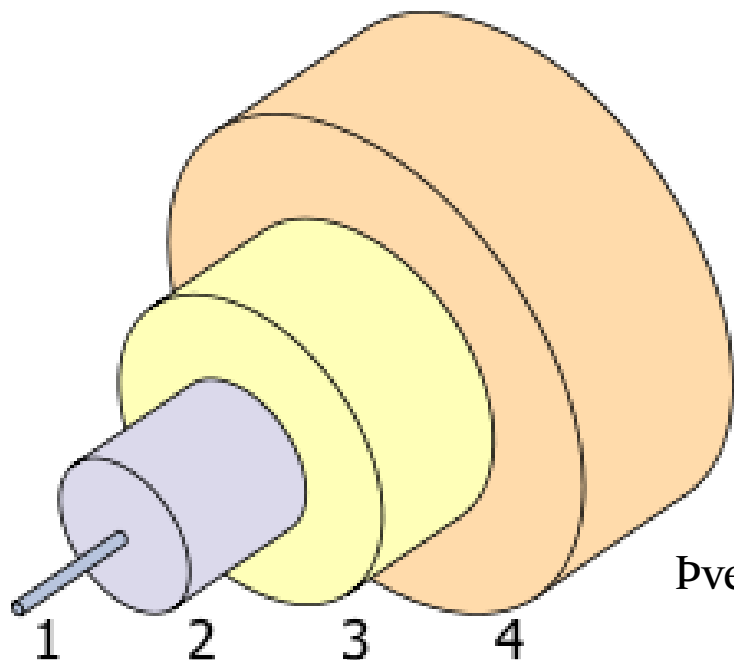




Bylgjuleiðarar

- Einnig eru til svonefndir “dielectric slab” bylgjuleiðarar þar sem bylgjurnar berast eftir yfirborði rafsvarandi efnis
- Bylgjur berast eftir bylgjuleiðurum með mismunandi háttum (modes)
 - TEM (Transverse Electric Magnetic)
 - TM (E-bylgjur)
 - TE (H-bylgjur)
- Ljósleiðarar eru bylgjuleiðara fyrir ljós
 - Þvermál einsháttar (e. single mode) ljósleiðara er

Ljósleiðari



Eins háttar (e. single mode) ljósleiðari

1. Kjarni: $8\text{ }\mu\text{m}$ þvermál
2. Klæðning: $125\text{ }\mu\text{m}$
3. Buffer: $250\text{ }\mu\text{m}$
4. Kápa: $400\text{ }\mu\text{m}$

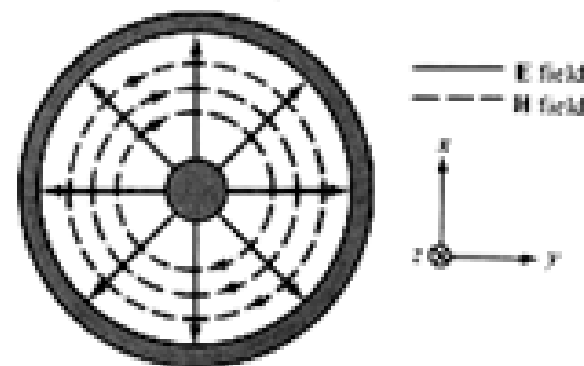
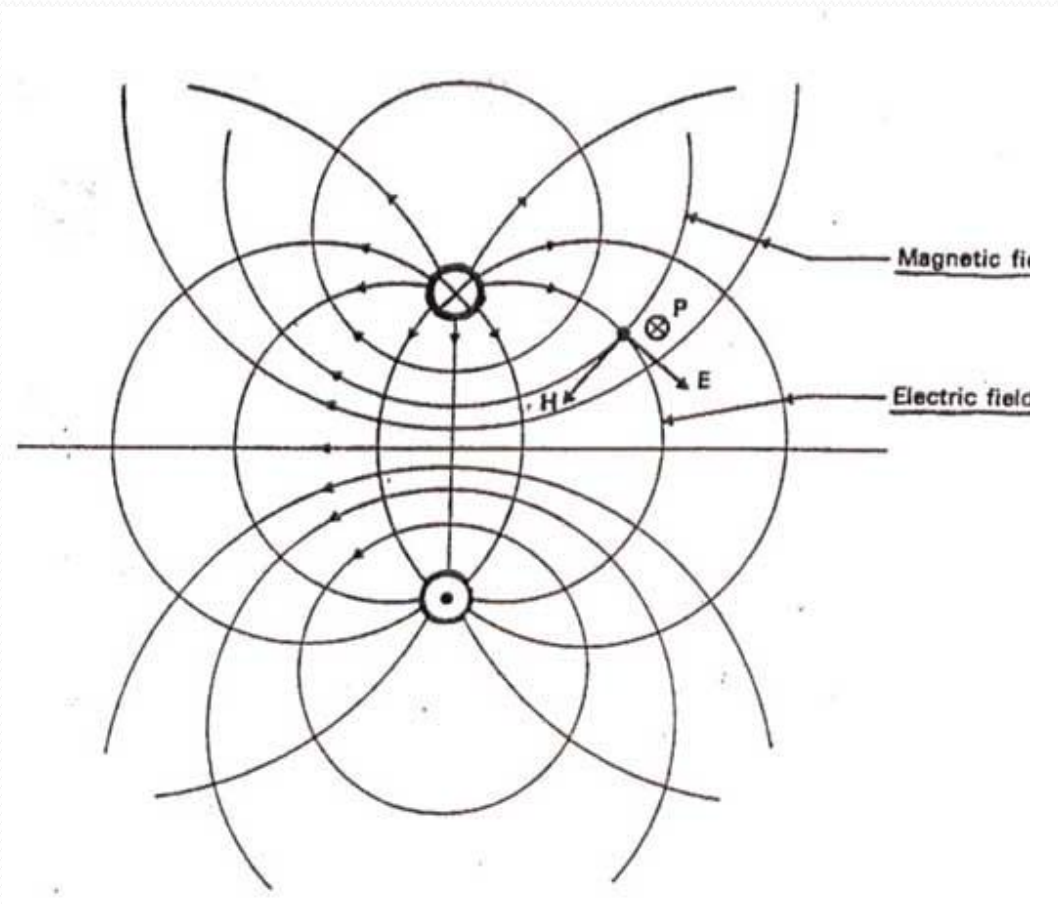
Þvermál mannshárs er $17 - 180\text{ }\mu\text{m}$

Reikna má bandbreidd ljósleiðarans ca. $3 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$
 $= 300\text{ THz} = 300\text{ 000 GHz} = 300\text{ milljón MHz}$

M.v. Kóðun með 8 b/s / Hz gæfi það $2400\text{ Tb/s} = 2,4\text{ milljónir Gb/s}$

Núverandi tækni: ca. $400\text{ Gb/s} \times 100 = 40\text{ þús. Gb/s}$

Raf- og segulsvið



Kenniviðnám lína (e. Characteristic impedance)



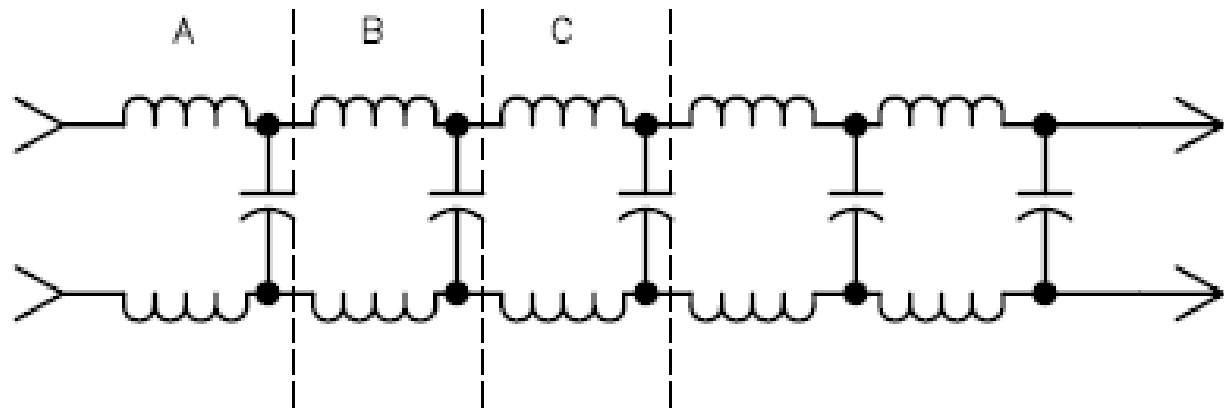
- Kenniviðnámið er eiginleiki hverrrar línu
- RG58, RG213, RG174 og fleiri hafa kenniviðnám 50Ω
- RG59, RG6 og fleiri hafa kenniviðnám 75Ω
- RG62 hefur kenniviðnám 93Ω
- „Twinlead“ (opin sjónvarpslína hefur 300Ω)
- Opin fæðilína eins og í Otradal hefur $450 - 700 \Omega$
- Hvernig mælist kenniviðnámið?
 - Ef línan væri óendanlega löng væri viðnámið sem sést við nærenda hennar sama og kenniviðnámið
 - Ef álagsviðnámið á enda línunnar er sama og kenniviðnámið mælist innviðnámið á nærenda hennar sama og kenniviðnámið
 - Ef álagsviðnámið er ekki sama og kenniviðnámið myndast standbylgja og innviðnámið mælist annað en kenniviðnámið

Kenniviðnám lína



- Kenniviðnámið fer eftir þykkt leiðara, fjarlægð þeirra frá hvor öðrum og efninu sem er á milli þeirra
- Hægt er að líkja eftir hegðun línunnar með rásalíkani
- Ef línan er taplaus:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$
$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$



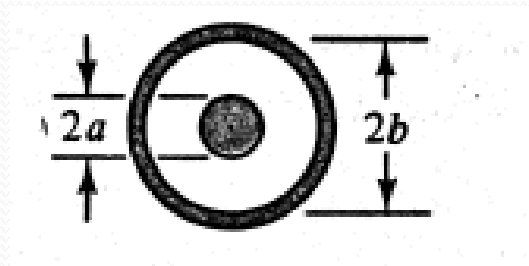
Kenniviðnám lína



- Línan er full af litlum dreifðum spólum og þéttum þar sem hægt er að mæla sjálfsþétti L í H/m og rýmdina C í F/m
- Kenniviðnámið er þá

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

Kóaxlínan



$$Z_o = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \log_{10} \left(\frac{b}{a} \right)$$

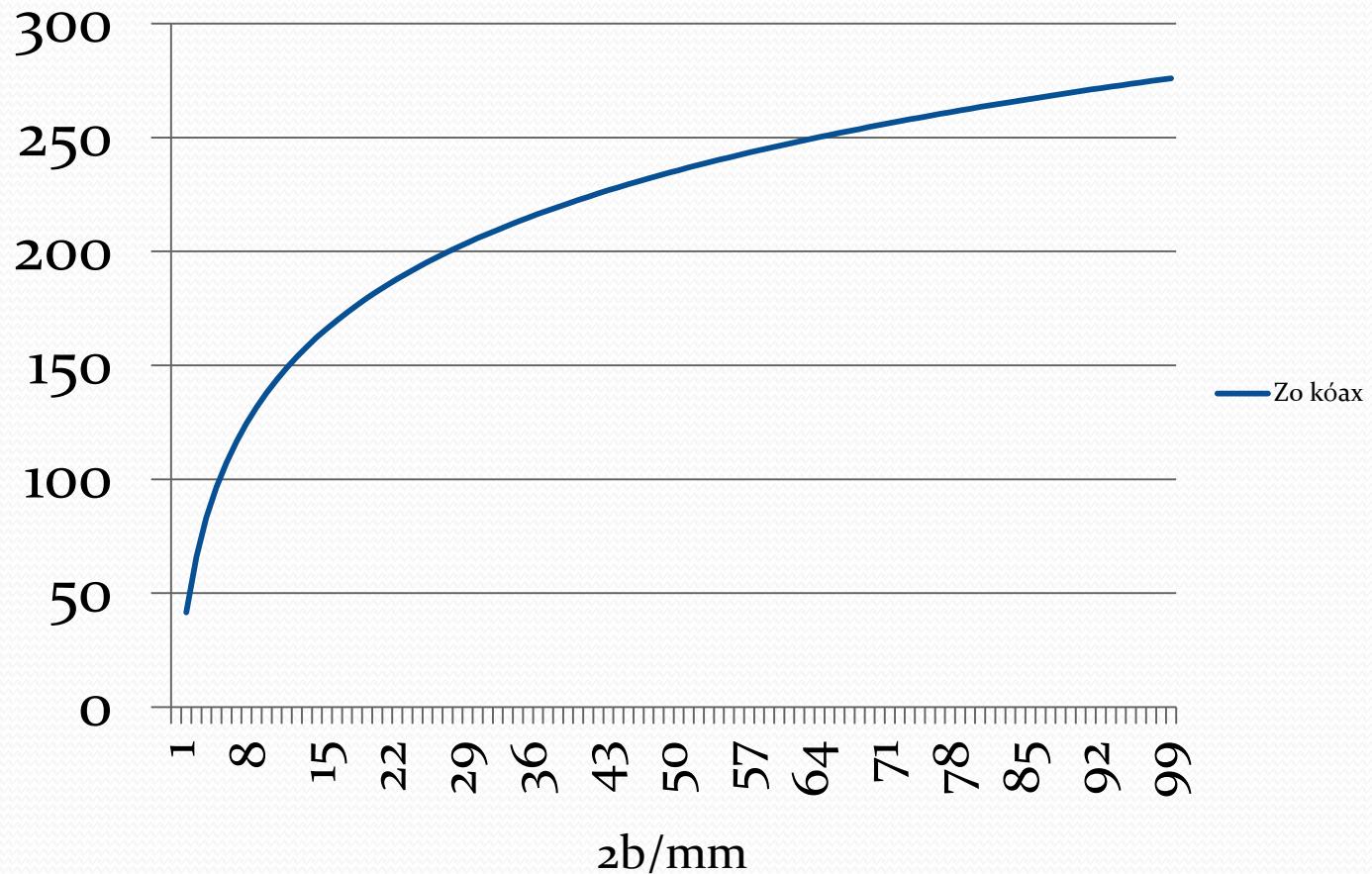
- Z_o = Kenniviðnám í Ohm
- a = Radíus innri leiðara
- b = Innri radíus ytri leiðara
- ϵ_r = rafsvörunarstuðull efnisins inni í kóaxinum



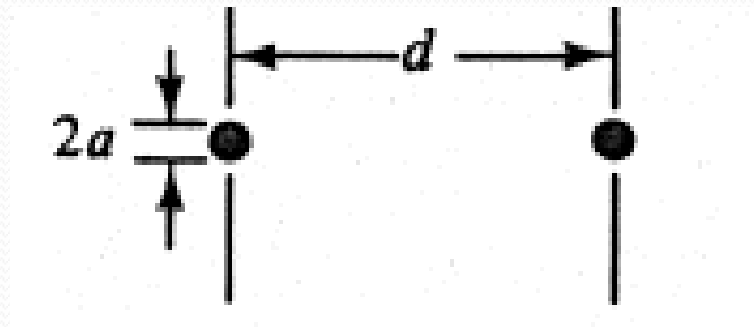
Kenniviðnám kóax línu

miðleiðari 1 mm, loftfyllt

Z_0 /Ohm, kóax



Opin lína



$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{r}} \cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right)$$
$$\approx 276 \log_{10} \frac{d}{a}$$

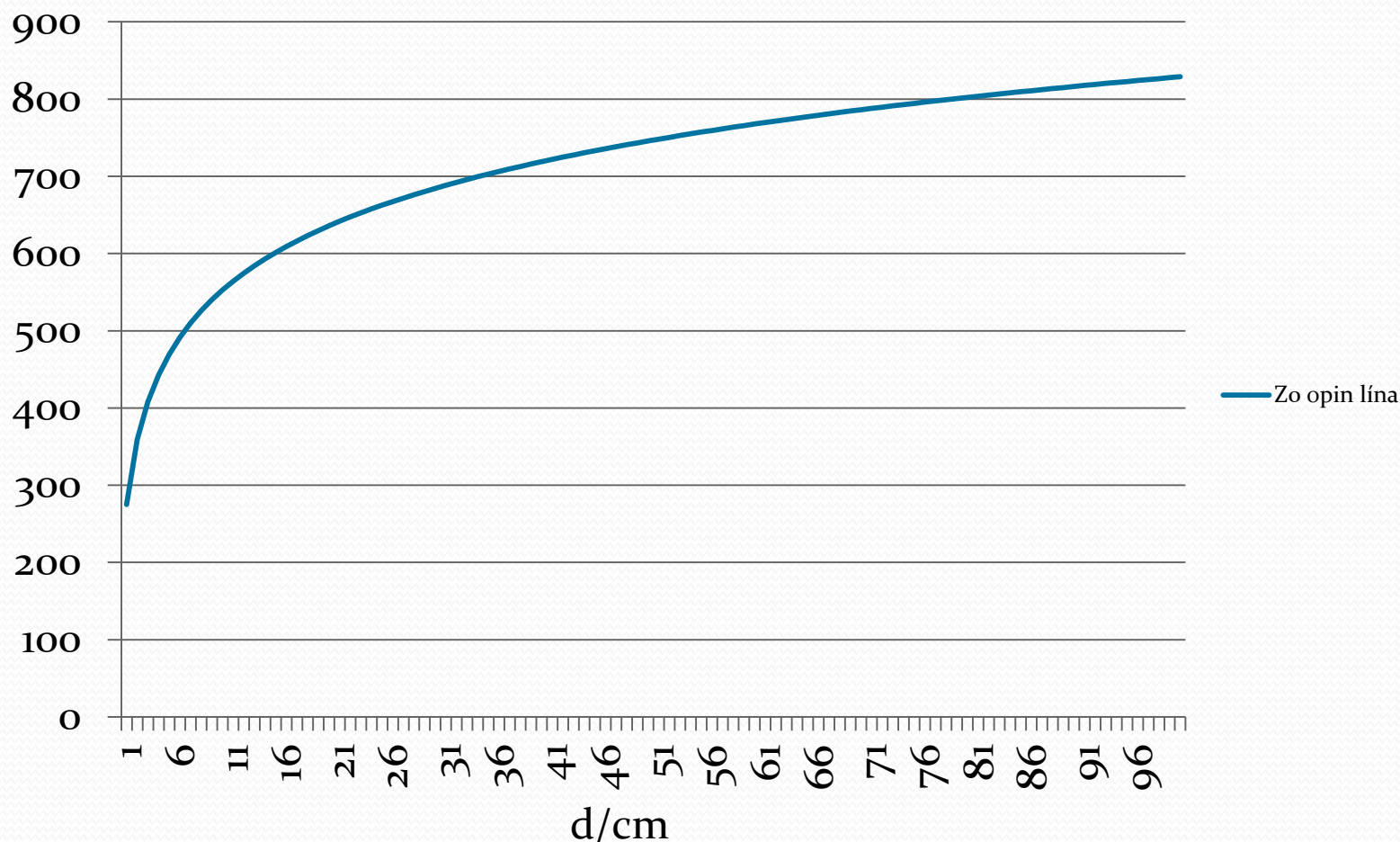
- Z_0 = Kenniviðnám í Ohm
- d = Bil milli víra
- $2a$ = Þvermál víra
- r = Hlutfallslegur rafsvörunarstuðull efnisins milli vírar (fyrir loft er $r = 1.00054$)

Frá Tom O'Brien, AB5XZ

Kenniviðnám opinnar línu

2 mm sverir leiðarar

Z_0 /Ohm, opin lína



Hver fann upp kóaxinn?



- Nokkrir fengu einkaleyfi á honum
 - 1880 Oliver Heaviside (1850-1925) GB#1,407
 - 1884 Werner von Siemens (1816-1892)
 - 1894 Nikola Tesla (1856-1943) US#514,167
 - 1929 Lloyd Espenschied (1889-1986) og Leonard Affel (1893-1972) US#1,835,031
- ***Fyrsta hagnýtingin*** 1936
 - Sjónvarp frá Ólympíuleikunum Berlin - Leipzig
 - Sæstrengur – 1 TV, 7 símalínur, Melbourne til Tasmaníu
 - 1 TV, 240 símalínur NY – PA
 - 30 símalínur London - Birmingham

Hraðastuðull í línunum



- Bylgja sem ferðast eftir flutningslínu fer aðeins hægar en bylgja sem fer um tómarúmið (e. free space)
- Tíðnin er sú sama hvort sem bylgjan fer eftir línu eða í tómi

$$c = \lambda \times f$$

- Ef hraðinn c minnkar hlýtur bylgjulengdin λ að minnka líka, þ.e. bylgjulengdin sem mælist á línunni er minni en bylgjulengdin sem mælist í tómarúmi
- Í línunum fer hraðastuðullinn eftir rafsvörunarstuðli (e. dielectric constant) efnisins sem er milli leiðaranna

Hraðastuðull lína



- Hraðastuðullinn er $v_f = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}}$
- Þar sem ϵ_r er rafsvörunarstuðull
- Hraðastuðullinn getur verið mismikill í kóaxi með mjög svipað nafn, jafnvel frá sama framleiðarnda

Hraðastuðull



RG or Type	Part Number	Nom. Z_0 W	VF %	Cap. pF/ft
RG-6	Belden 1694A	75	82	16.2
RG-6	Belden 8215	75	66	20.5
RG-8	Belden 7810A	50	86	23.0
RG-8	TMS LMR400	50	85	23.9
RG-8	Belden 9913	50	84	24.6
RG-8	CXP1318FX	50	84	24.0
RG-8	Belden 9913F7	50	83	24.6
RG-8	Belden 9914	50	82	24.8
RG-8	TMS LMR400UF	50	85	23.9
RG-8	DRF-BF	50	84	24.5
RG-8	WM CQ106	50	84	24.5
RG-8	CXP008	50	78	26.0
RG-8	Belden 8237	52	66	29.5
RG-8X	Belden 7808A	50	86	23.5
RG-8X	TMS LMR240	50	84	24.2
RG-8X	WM CQ118	50	82	25.0
RG-8X	TMS LMR240UF	50	84	24.2
RG-8X	Belden 9258	50	82	24.8
RG-8X	CXP08XB	50	80	25.3
RG-9	Belden 8242	51	66	30.0
RG-11	Belden 8213	75	84	16.1
RG-11	Belden 8238	75	66	20.5
RG-58	Belden 7807A	50	85	23.7
RG-58	TMS LMR200	50	83	24.5
RG-58	WM CQ124	52	66	28.5
RG-58	Belden 8240	52	66	28.5
RG-58A	Belden 8219	53	73	26.5
RG-58C	Belden 8262	50	66	30.8
RG-58A	Belden 8259	50	66	30.8
RG-59	Belden 1426A	75	83	16.3
RG-59	CXP 0815	75	82	16.2
RG-59	Belden 8212	75	78	17.3
RG-59	Belden 8241	75	66	20.4
RG-62A	Belden 9269	93	84	13.5
RG-62B	Belden 8255	93	84	13.5
RG-63B	Belden 9857	125	84	9.7
RG-142	CXP 183242	50	69.5	29.4
RG-142B	Belden 83242	50	69.5	29.0
RG-174	Belden 7805R	50	73.5	26.2
RG-174	Belden 8216	50	66	30.8
RG-213	Belden 8267	50	66	30.8
RG-213	CXP213	50	66	30.8
RG-214	Belden 8268	50	66	30.8

Tap í línunum

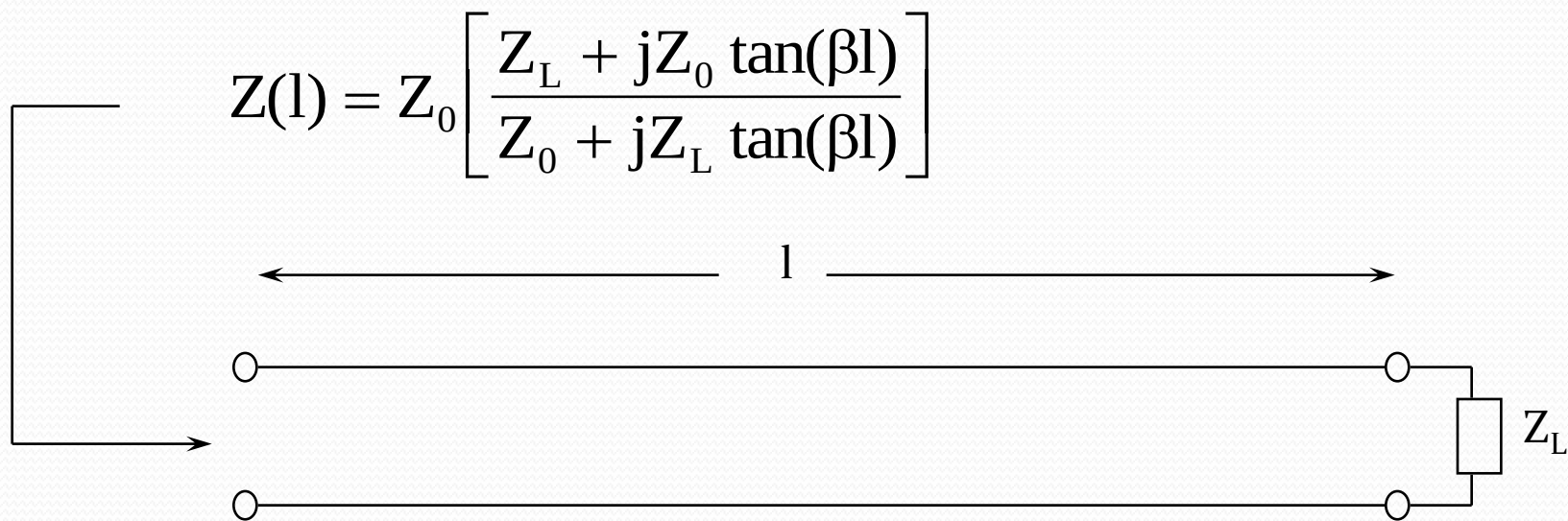


- Í reikningum er oft gert ráð fyrir að línur séu taplausar
 - Einfaldar dæmin og leiðir til betri skilnings
 - Vitum hins vegar að alltaf er tap í línunum
- Tapið stafar af viðnámi í vírunum og smáræðis leiðni milli þeirra
- Ef opin lína er leidd í gegnum efni með miklu tapi, t.d. gluggapóst getur tapið aukist

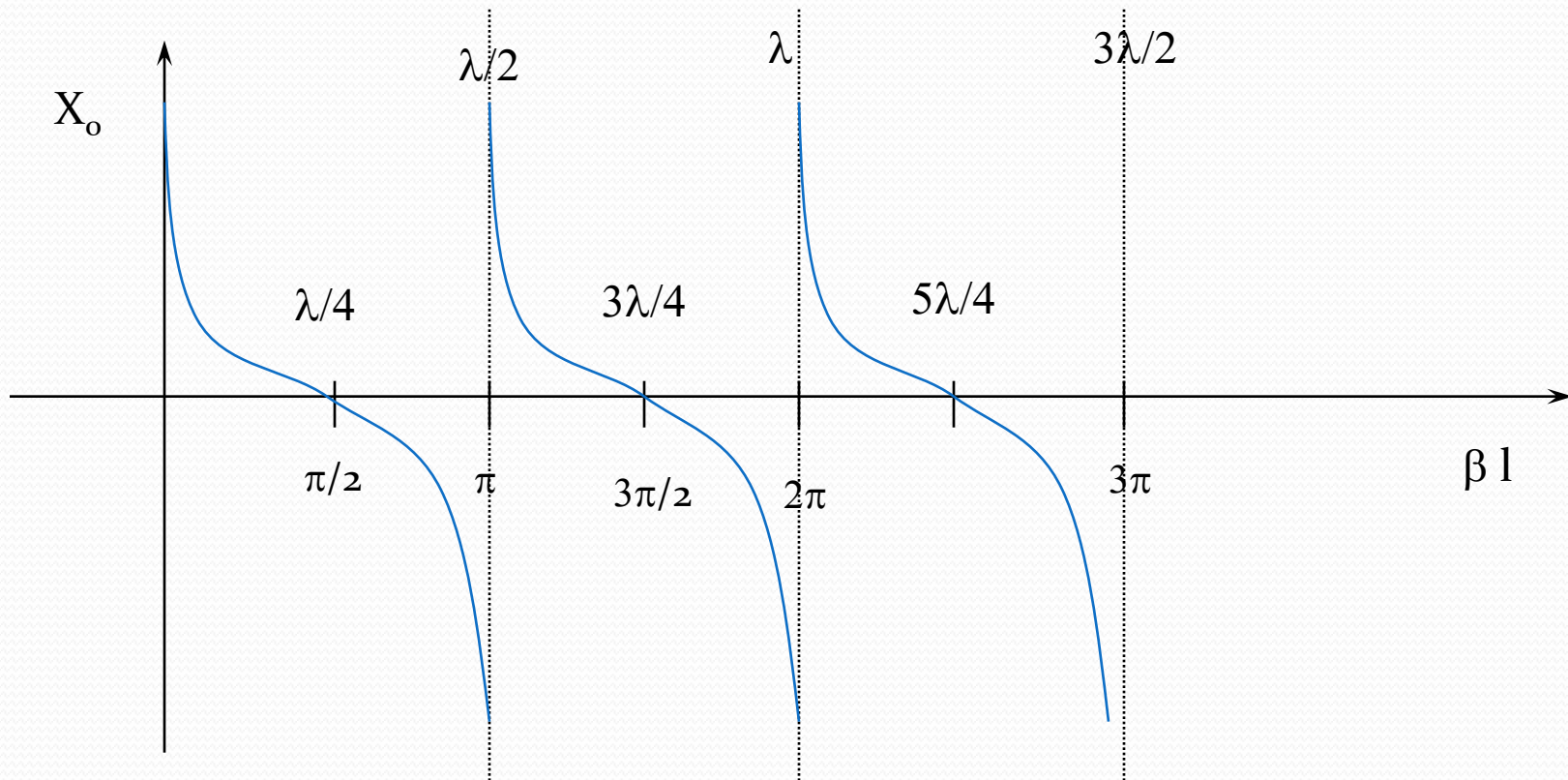
Samviðnámið (impedans) Z sem við sjáum inn í línu af lengd l , sem hefur álagið Z_L



- Gerum ráð fyrir að línan sé taplaus $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$
- Kenniviðnámið er Z_0
- Samviðnámið séð inn í línuna í vegalengd l frá álaginu Z_L er:



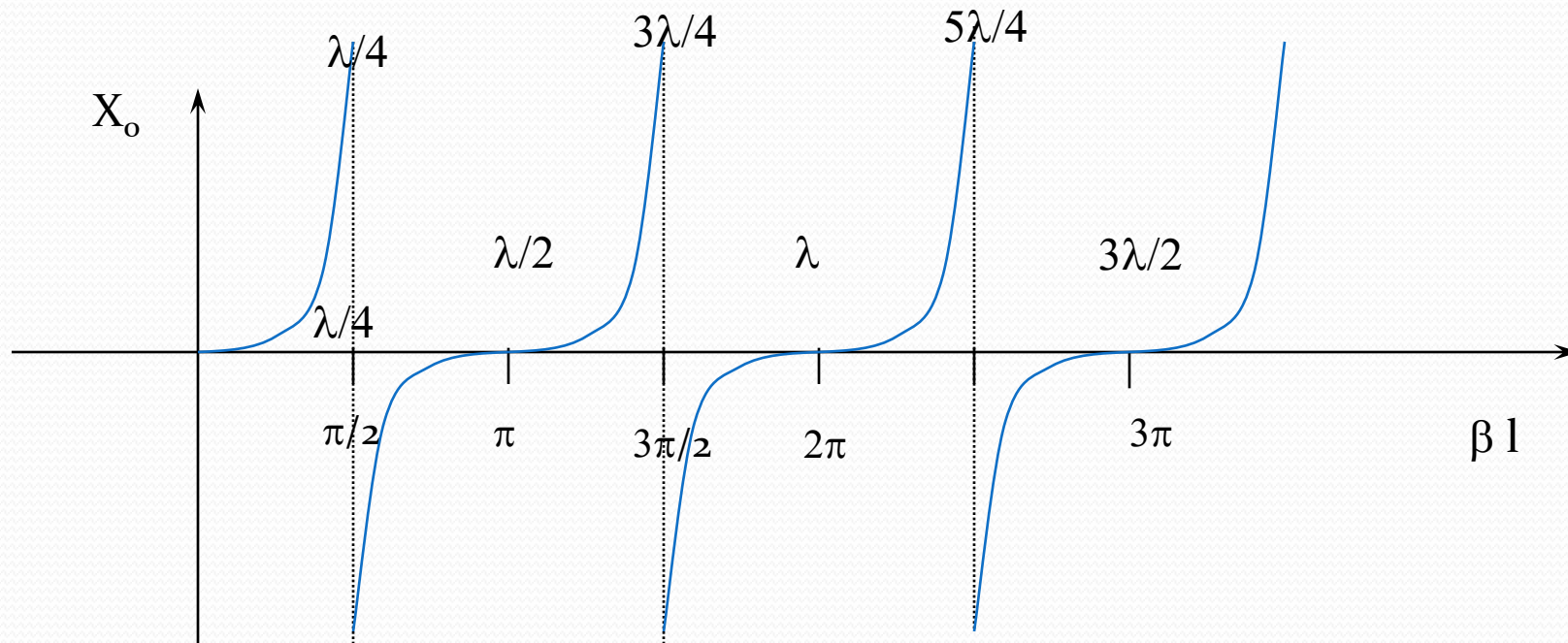
Lína þar sem álagsviðnámið Z_L er óendanlega stórt, opin
lína



- Sjáum að við $\beta l = \pi/2$ þ.e. $l = \lambda/4$, verður $X_o = 0$ þ.e. **opin rás verður skammhlaup**. Sjáum líka að $Z(l)$ er rýmdarkennt $0 < l < \lambda/4$ en spankennt ef $\lambda/4 < l < \lambda/2$



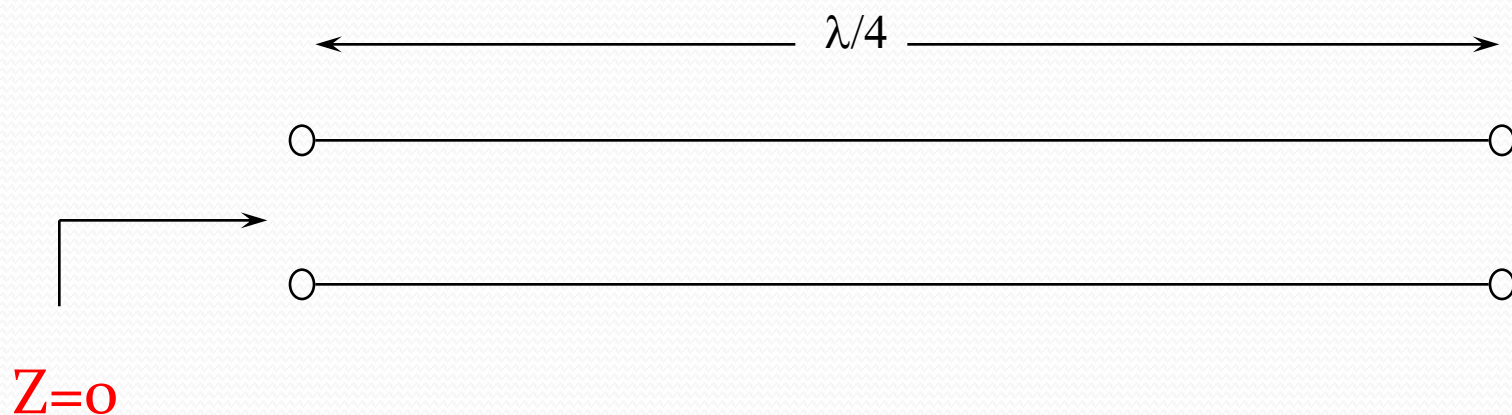
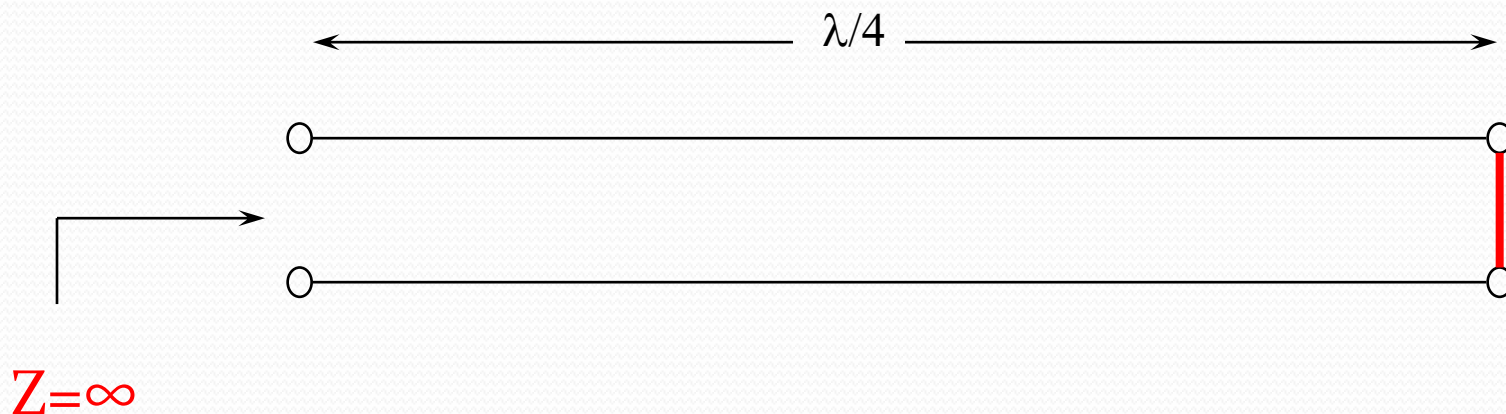
- Dæmi 2: $Z_L = 0$, þ.e. enda skammhleyp



- $Z(l)$ er spankennt (indúktíft) ef $\beta l < \pi/2$
- $Z(l)$ er rýmdarkennt (kapasítíft) ef $\pi/2 < \beta l < \pi$

$$|Z(l)| \rightarrow \infty \text{ ef } \beta l = (2n+1)\pi/2 \text{ þ.e. } l = \frac{\lambda}{4}(2n+1)$$

Merkileg hegðun lína



Kvartbylgjulöng lína varpar skammhlaupi í opna rás
Kvartbylgjulöng lína varpar opinni rás í skammhlaup

Kvartbylgjuspennir



- Hægt er að nota kvartbylgjulínu sem spennni til að aðlaga álag (t.d. loftnet) að tiltekinni línu

$$l = \frac{\lambda}{4}$$

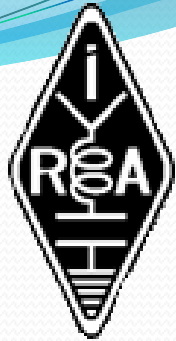
$$Z(l) = \lim_{\beta l \rightarrow \pi/2} Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \right] = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_L Z(l)}$$

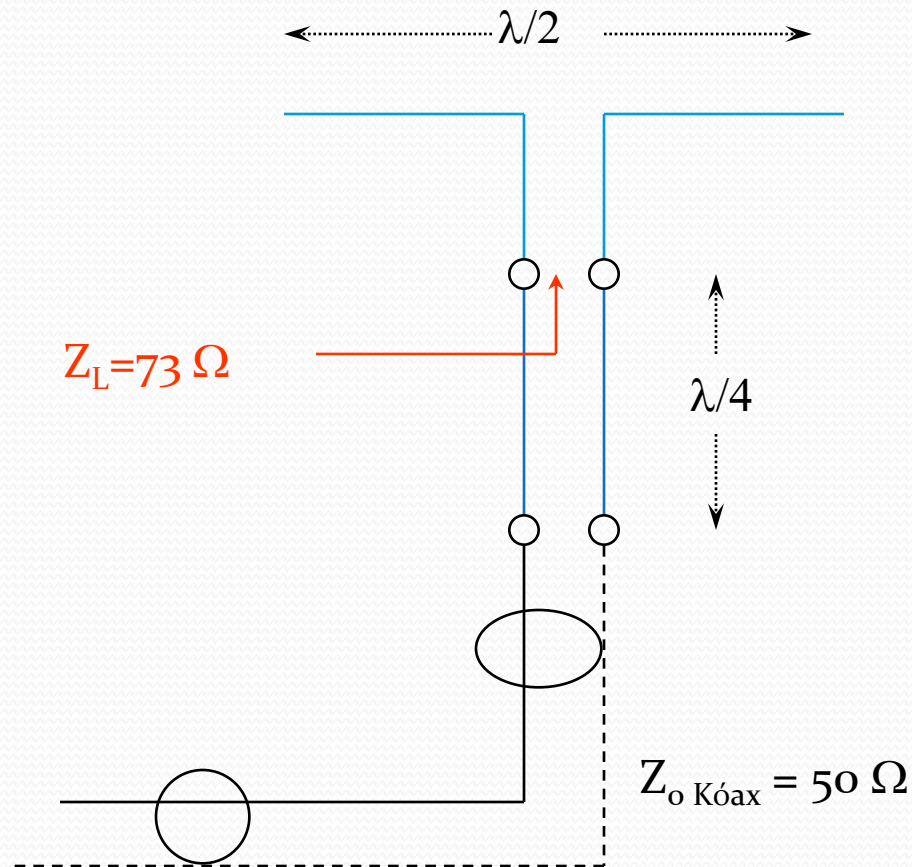
Genguraðeinsef $Z_L \in \Re$

Loftnetið verður að vera í resónans

Kvartbylgjuspennir



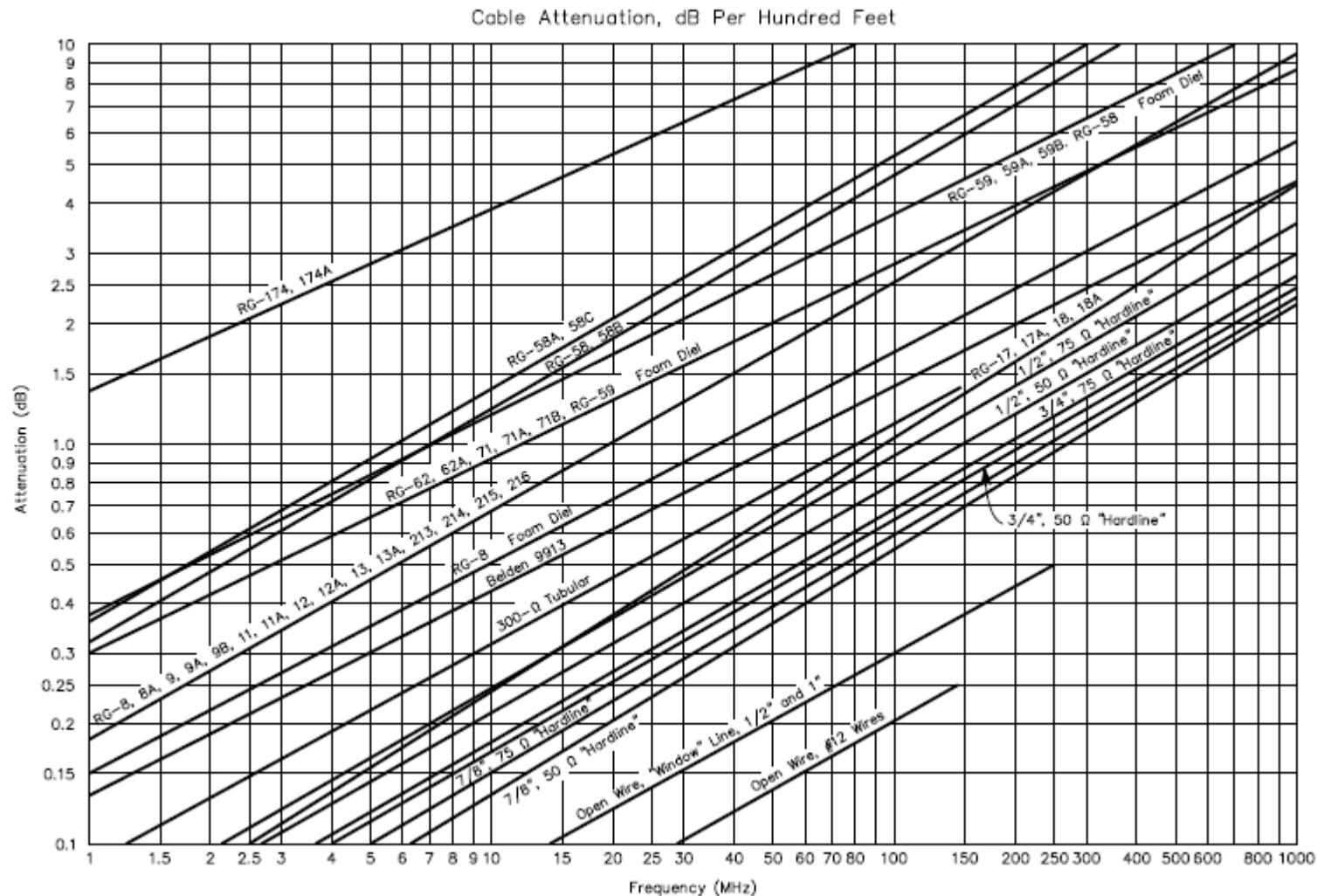
- Dæmi: Viljum tengja opinn $\lambda/2$ dípól við 50Ω kóax línu:



Veljum línu með

$$Z_0 = \sqrt{73 \cdot 50} = \underline{\underline{60 \Omega}}$$

Deyfing á línum



Fengið úr ARRL Antenna Book, 21. útgáfu, 2007

Deyfing á línunum



- Hvernig lesum við úr þessum upplýsingum?
 - Skoðum t.d. 15 MHz, (rétt við 20 m bandið), erum með 40 m langan kóax. Taflan miðast við 100 ft = 31,5 m. Þurfum því að margfalda uppgefna deyfingu með 40/31,5
 - Lesum töfluna
 - Fyrir RG-58A: 1,7 dB $\rightarrow 1,7 \cdot 40/31,5 = 2,2$ dB
 - Fyrir RG-213: 0,87 dB $\rightarrow 0,87 \cdot 40/31,5 = 1,1$ dB
 - Erum með 100 W út úr sendinum okkar = 20 dB
 - Fáum 20 dB – 1,8 dB = 18,2 dB út í loftnet með RG-58A
 - Fáum 20 dB – 1,1 dB = 18,9 dB út í loftnet með RG-213
 - 18,2 dB samsvara $10^{1,82} = 66$ W
 - 18,9 dB samsvara $10^{1,89} = 78$ W

Deyfing á línunum



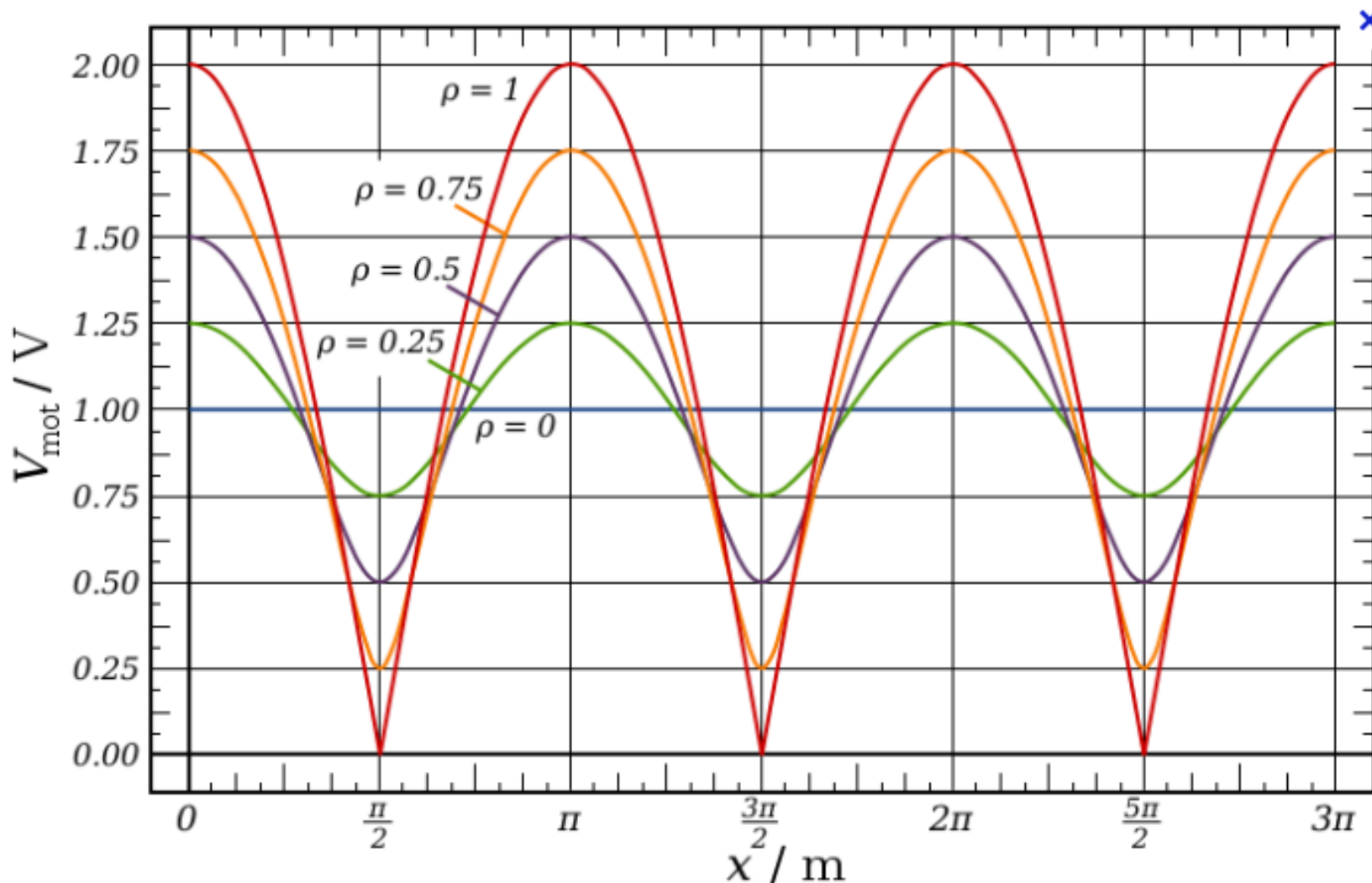
- 40 m RG 58 a kostar í USA \$39, 9360 kr. á Íslandi
- 40 m RG 213 kostar í USA \$ 117, 28000 kr. á Íslandi
- Mismunurinn er um 18 þús. kr. og 12 W.
- Borgar það sig ?
- Ef við myndum nota opna „Gluggalínu“ yrði deyfingin
 - 0,14 dB, fengjum við 97 W gegnum línuna!
 - Gluggalínan kostar svipað og RG 58

Standbylgja



- Hér er góð sýning á því hvernig standandi bylgja myndast á línu
- Standandi bylgjan myndar spennumynstur á línunni
 - Ef engin standbylgja mælist styrkur sendimerkisins jafn á allri línunni.
 - Ef standbylgja verður styrkurinn mikill á sumum stöðum og minni á öðrum.
- $VSWR = V_{\max}/V_{\min}$
 - Spennustandbylgjuhlutfall (Voltage Standing Wave Ratio)

Standbylgja



Endurkastsstuðlar og Standbylgja



- Standbylgja

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|},$$

$$|\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

$$\Gamma = 0 \Rightarrow S = 1$$

$$\Gamma = \pm 1 \Rightarrow S \rightarrow \infty$$

Einnig má rita:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Endurkastsstuðlar og Standbylgja



$$S = \frac{1 + \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|}{1 - \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|} = \frac{|Z_L + Z_0| + |Z_L - Z_0|}{|Z_L + Z_0| - |Z_L - Z_0|}$$

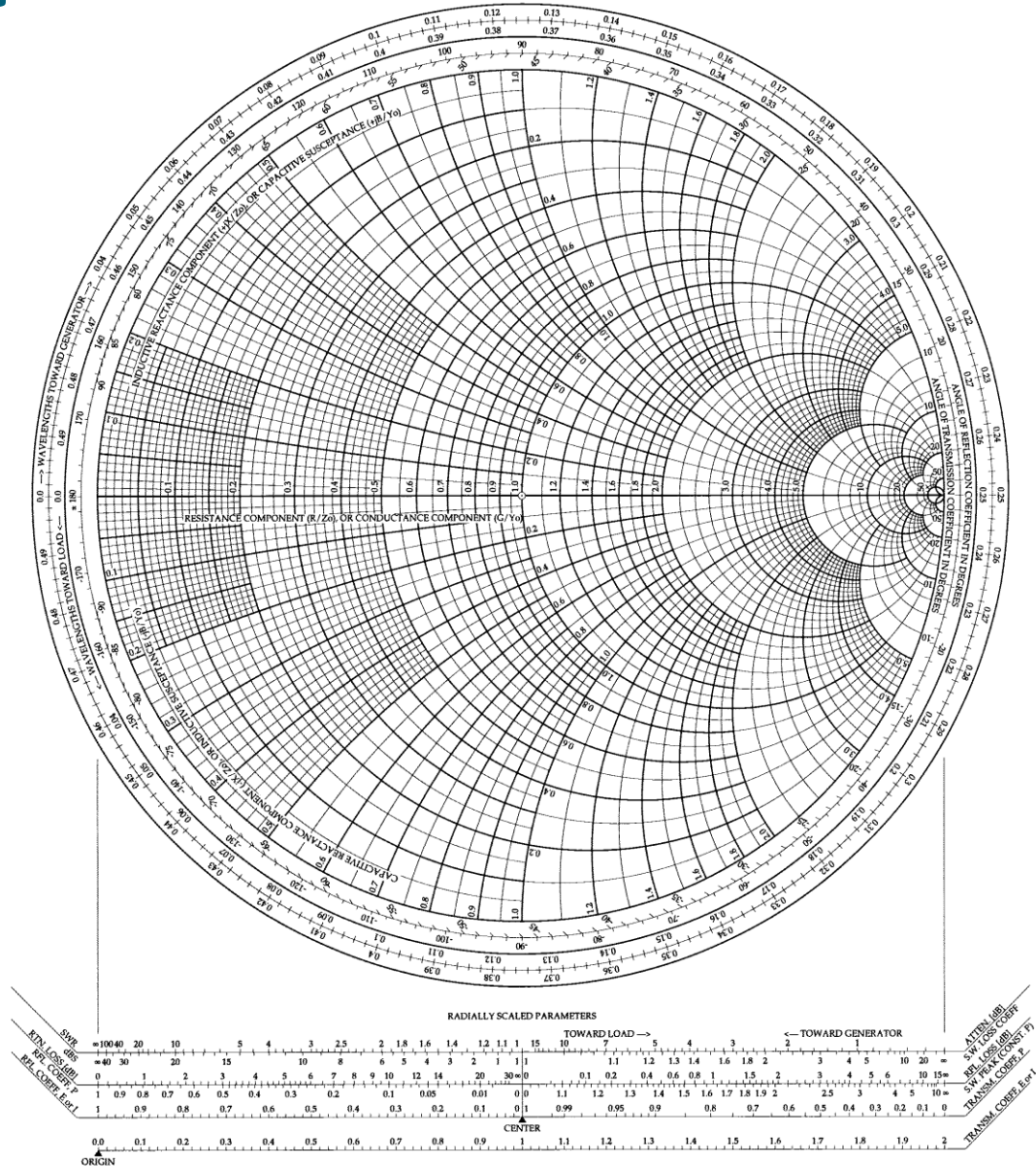
$$S = \begin{cases} \frac{Z_L}{Z_0} & \text{ef } Z_L > Z_0 \\ \frac{Z_0}{Z_L} & \text{ef } Z_L < Z_0 \end{cases} \quad Z_L \text{ og } Z_0 \in \mathfrak{R}$$

Smith kort



- Þróað af bandarískum verkfræðingi, P.H. Smith
- Öflugt grafískt hjálpartæki
 - til að reikna með komplexum tölum
 - sérstaklega hentugt til að reikna dæmi um flutningslínur
 - safn af hringjum og hringhlutum í komplexa planinu sem tákna normuð raun- og þverviðnám

The Complete Smith Chart Black Magic Design



Gerið og forðist



- Notið bestu flutningslínu sem þið tímið að kaupa
- Forðist raka við tengi (notið drulluteip, N-týpu tengi..)
- Forðist að láta einþáttung hreyfast mikið
- Ekki beygja neina flutningslínu kringum skörp horn
- Ekki búast við að kóax eða opin lína endist meira en 5-7 ár utanhúss
- Munið eftir afltakmörkunum lína
- Ekki spara tengi

Frá Tom O'Brien, AB5XZ

Áhugaverð forrit og vefsíður



- <http://www.antennex.com/shack/Deco4/tlnw.htm>
 - Fjallar um TLW forritið sem fylgir með ARRL Antenna Book, 21. útgáfa 2007
- <http://www.qsl.net/w9dmk/>
 - Nokkur forrit um flutningslínur og fróðleikur
- Sýningin sem að framan er getið er á
 - http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/Wave_Propagation_along_a_Transmission_Line.htm?cmid=zzfindnw_xline