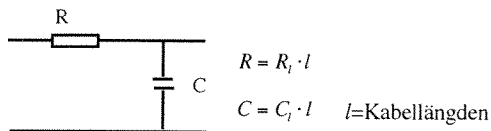


1

Kabel i lågfrekventa området

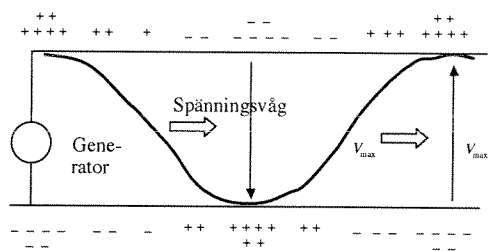
Modell



Typiska värden koax: $R_l = 0,01 \Omega/m$ och $C_l = 100 pF/m$

"Korta" kablar $Z_{kabel} = 1/j\omega C = 1/j\omega \cdot l \cdot C$

Kabel i högfrekventa området



Momentanbild av spännings- och strömvåg på dubbelledare.

Diskreta nät/kretsar

Stationära och kvasistationära förlopp

$$\text{ledningslängden} \ll \lambda = \frac{c}{f}$$

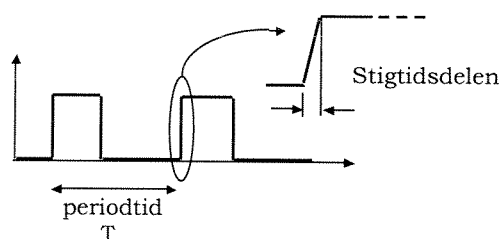
Transmissionsledningar (högfrekvens)

VÅGGENSKAPER

A **Högfrekvens** - sinus, pulser

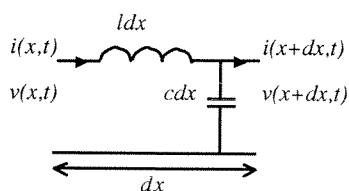
$$\text{ledningslängden} \geq \lambda = \frac{c}{f}$$

B Låga frekvenser - pulser med **kort stig**



Modell dubbelledare - hög frekvens

Definiera $c [F/m]$ och $l [H/m]$



Spänningen över induktanselementet

$$v(x+dx,t) - v(x,t) = -l dx \frac{di(x,t)}{dt} \quad (1)$$

Division med dx och gränsövergång, $dx \rightarrow 0$, ger

$$\frac{dv(x,t)}{dx} = -l \frac{di(x,t)}{dt}$$

Strömskillnaden

$$i(x+dx,t) - i(x,t) = -c dx \frac{dv(x,t)}{dt} \quad (2)$$

Division med dx och gränsövergång, $dx \rightarrow 0$, ger

$$\frac{di(x,t)}{dx} = -c \frac{dv(x,t)}{dt} \quad \text{men} \quad \frac{d^2}{dt dx} = \frac{d^2}{dx dt} \quad \text{ger}$$

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = lc \frac{d^2 v}{dt^2} \quad \text{och} \quad \frac{d^2 i}{dx^2} = lc \frac{d^2 i}{dt^2} \quad (3a, b)$$

vågekvationen (gäller allmän kurvform)

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \frac{1}{c_k^2} \frac{d^2 s}{dt^2} \quad \text{utbredningshast} \quad c_k = \frac{1}{\sqrt{l \cdot c}}$$

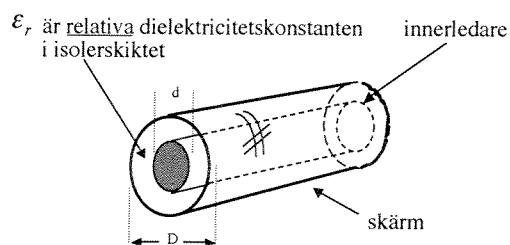
För koaxialkabel:

induktansen per meter $l = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$

kapacitansen per meter $c = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \frac{D}{d}}$

μ_0 = permeabiliteten

ϵ_0 = dielektricitetskonstant



2

Hastigheten i kabeln

$$c_k = \frac{1}{\sqrt{l \cdot c}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \text{ är ljushastigheten i vakuum.}$$

För koax RG58C/U med **polyethylen** $\epsilon_r = 2,28$

$$c_k \approx \frac{2}{3} c_0 = 200 \text{ Mm/s}$$

Ohms lag: $Z_0 = \frac{V}{I}$

Med vågekvationen erhålles då

Karaktäristiska impedansen

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad \text{enhet} \quad \sqrt{\frac{Vs/A}{As/V}} = \Omega$$

Z_0 blir rent **resistiv**

Koaxialkabel belastar generator med Z_0 .

Långa kablar/mycket höga frekvenser

fasvridning och **pulsdistorsion**

karaktäristisk impedans $Z_0 = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$

r = längsresistansen

g = tvärkonduktansen i isolermaterialet

Med uttryck på l och c erhålls

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}} = \ln \frac{D}{d} \sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi^2 \epsilon_r \epsilon_0}} \quad (6)$$

men μ_0 är $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/A m}$
 $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ ger

$$\text{Koaxkabel } Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (7)$$

Kabeltyp res. pF/m D/d ck(% av c_0) kV max dB/100m

| | | | | | | |
|-----------|----|-----|------|--------|-----|-----|
| RG 58 C/U | 50 | 101 | 3,6 | 66,2 * | 2,5 | 16 |
| RG 213/U | 50 | 101 | 3,6 | 66,2 * | 5 | 6,5 |
| S07232 | 50 | 82 | 3,6 | 81 ** | 2 | 5 |
| RG214/U | 50 | 100 | 3,6 | 66,2 * | 1,5 | 5 |
| RG 59 B/U | 75 | 67 | 6,7 | 66,2 * | 3,5 | 11 |
| RG62A | 93 | 44 | 4,7 | 84 ** | 1,5 | 6,2 |
| RG22B/U | 95 | 53 | **** | 66,2 * | 1 | 10 |

* Polyethylen $\epsilon_r = 2,28$ ** Polyethylenskum $\epsilon_r = 1,5$

*** Luftisolerad/lågkapacitiv $\epsilon_r = 1$

**** Balanserad/två innerledare

jmf.

Bästa **optiska fibern**: c:a 0,02 dB/100 m.

Cylindriska **vägledare** för TE_{01} -moden (magnetiska vägen) och är för GHz-frekv. 0,5-1 dB/m

Reflexion vid impedansändring

För alla slag av vågor gäller:

$$\frac{\text{reflekterad amplitud}}{\text{infallande amplitud}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

I det elektriska fallet gäller:

$$\Gamma = \frac{\hat{U}_{refl}}{\hat{U}_{inf}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Z_0 är impedansen i kabeln

Z_L ($L=Load$) är lasten

Olika fall

$Z_L \gg Z_0$ (**avbrott**) vilket ger $\Gamma \approx +1$ och $\hat{U}_{refl} \approx \hat{U}_{inf}$

$Z_L \ll Z_0$ (**kortslutning**) ger $\Gamma \approx -1$ och $\hat{U}_{refl} \approx -\hat{U}_{inf}$

$Z_L = Z_0$ (**anpassning**) $\Gamma = 0$ och $\hat{U}_{refl} = 0$ **ingen reflex**

$Z_L > Z_0$ ger $\Gamma > 0$ positiv

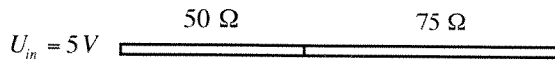
$Z_L < Z_0$ ger $\Gamma < 0$ negativ

3

Energi (effekt) transporten

$$U^2/Z_0$$

Ex: Skarvade kablar



$$U_{refl} = \Gamma \cdot U_{in} = \frac{75 \Omega - 50 \Omega}{75 \Omega + 50 \Omega} \cdot U_{in} =$$

$$= 0,2 \cdot U_{in} = 0,2 \cdot 5V = 1V$$

I skarvstället är $U_{in} + U_{refl} = 5V + 1V = 6V$

Inkommande effekt $\frac{U_{in}^2}{Z_0} = \frac{(5V)^2}{50\Omega} = 0,5W$

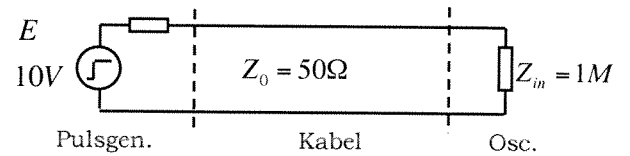
Reflekterad effekt $\frac{U_{refl}^2}{Z_0} = \frac{(1V)^2}{50\Omega} = 0,02W$

Transmitterad effekt $\frac{U_{trans}^2}{Z_0} = \frac{(6V)^2}{75\Omega} = 0,48W$

Effekten bevaras!

Generator + kabel + oscilloskop

$$R_s = 200\Omega$$



Utspänningen från gen. (**spänningsdelning**)

$$U_{ut} = \frac{50}{200 + 50} 10V = 2V$$

Vid osc. är $\Gamma_{osc} = +1$ Osc. Sp. blir $2V + 2V = 4V$

U_{ut} når gen. och refl. med

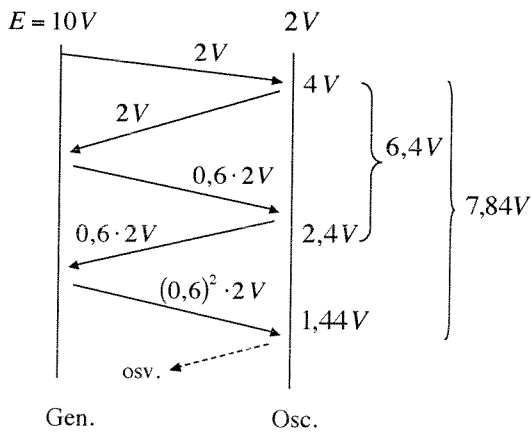
$$\Gamma_{gen} = \frac{U_{refl}}{U_{ut}} = \frac{200 - 50}{200 + 50} = 0,6 \quad U_{refl} = 0,6 \cdot 2V = 1,2V$$

U_{refl} når osc. med ny reflexion med $\Gamma_{osc} = +1$

Osc.-visningen stiger då från $4V$ till $(4 + 2 \cdot 1,2)V = 6,4V$

OSV
OSV
OSV

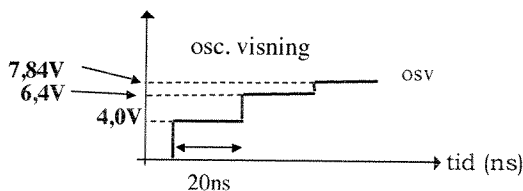
Reflexionsdiagram



$$\Gamma_{gen} = +0,6 \quad \Gamma_{osc} = +1$$

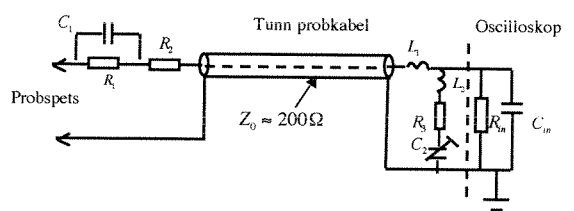
Tiden mellan de två pulsernas ankomst till osc.

$$\Delta t = \frac{2L}{c_k} = \frac{2L}{2c_0/3} = \frac{3L}{c_0} = \frac{3 \cdot 2m}{3 \cdot 10^8 m/s} = 20ns$$



För att undvika reflexioner används prober

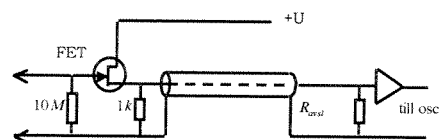
Passiv 10X-prob



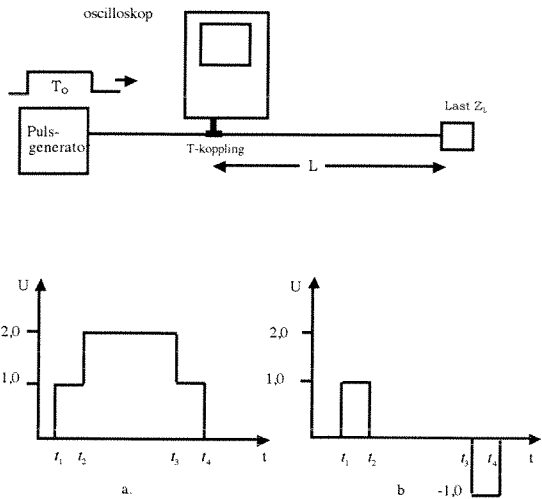
Proben har egenskaperna att

- * inte belasta mätpunkten
- * inte ge reflexioner

Aktiv 1X-prob

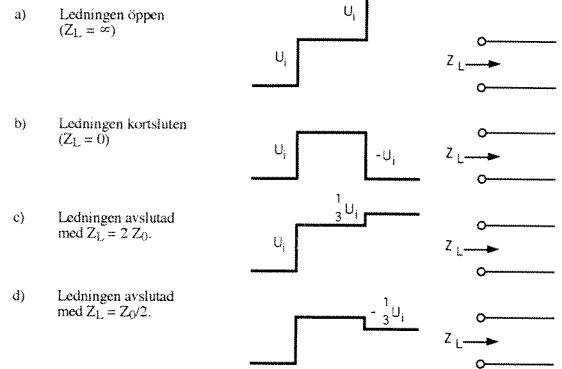


Undersökning av kabelavslutning med TDR (Time Domain Reflectometry)



Oscilloskopbildens utseende vid koppling enligt fig. Med kabelavslutningen **öppen** ($Z_L = \infty$) fig. a, och **kortsluten** ($Z_L = 0$) fig b.

Resistiva laster



Icke resistiva avslutningar:

