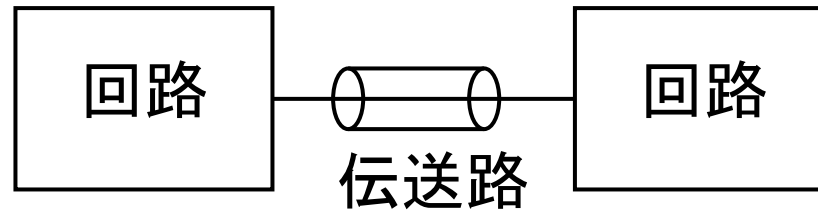


情報デバイス工学特論

第9回

伝送路による信号伝達

出力バッファ



大きな負荷容量

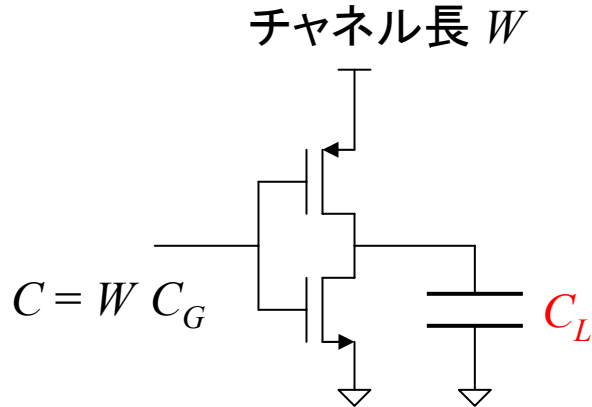
インピーダンス整合

信号伝達がシステムの大きな性能を決める

- ・信頼性
- ・スピード
- ・消費電力

Exponential Horn

大きな負荷容量 C_L を駆動



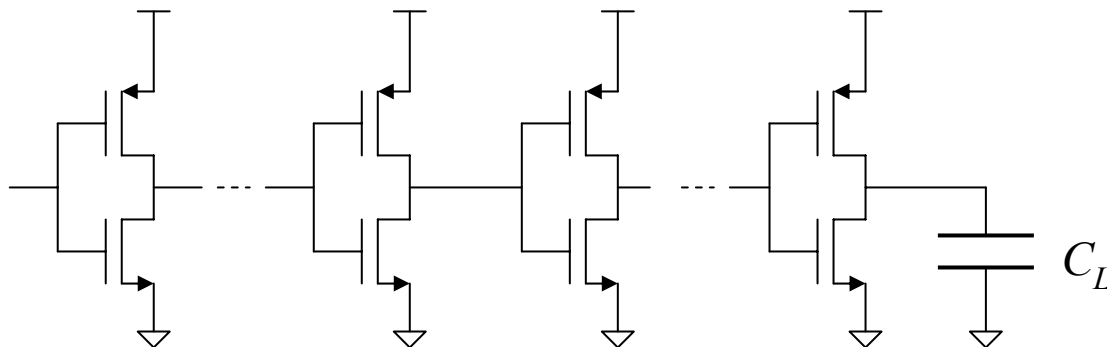
$$\tau = \frac{V_{DD} C_L}{I_{DSS}}$$

τ を小さくするため I_{DSS} を大きくする
 $\rightarrow W$ を大きくする

\Rightarrow インバータ入力側の
 キャパシタンスも増大

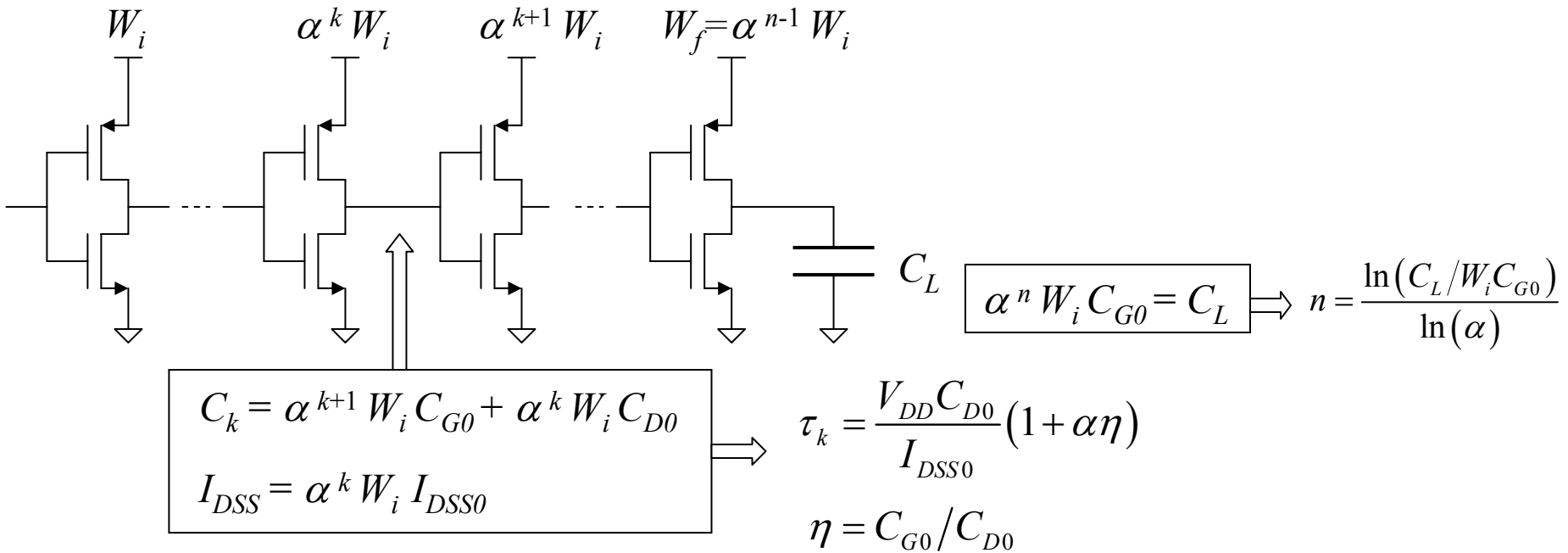
\Rightarrow インバータの前段にも大きな
 駆動電流 I_{DSS} が必要

ゲート幅を変えたインバータを直列接続 — 最適なサイズは？



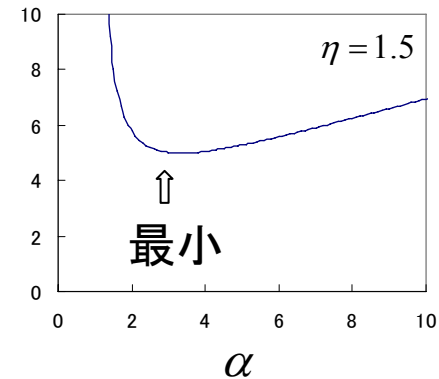
Exponential Horn

等比的にゲート幅を変えたインバータを直列接続

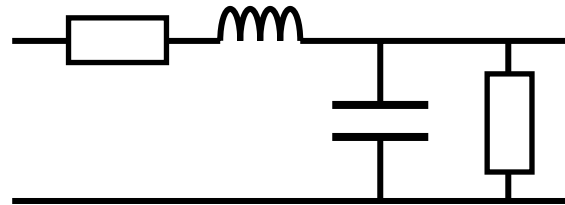
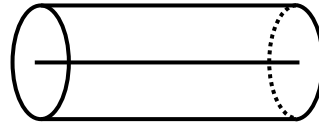


総遅延時間 $= \sum \tau_k \propto \frac{1 + \alpha \eta}{\ln(\alpha)}$

$\frac{1 + \alpha \eta}{\ln(\alpha)}$



伝送路の構成要素

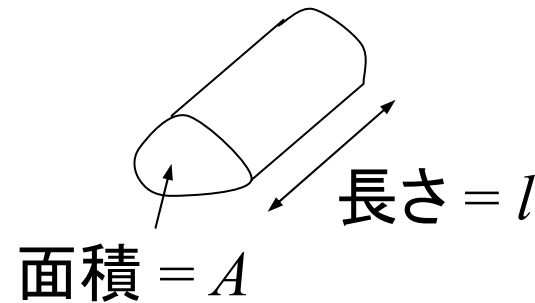


抵抗

キャパシタンス

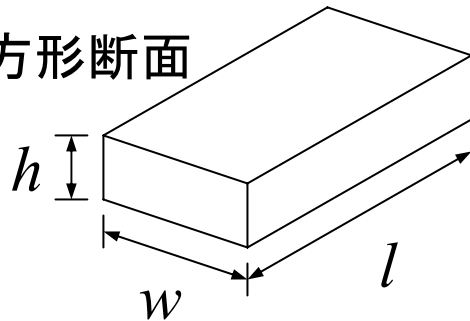
インダクタンス

抵抗



$$R = \frac{\rho l}{A}$$

長方形断面



$$R = \frac{\rho}{h} \frac{l}{w}$$

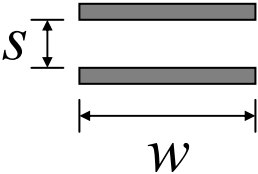
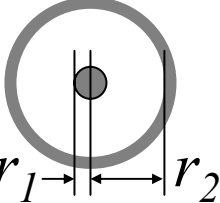
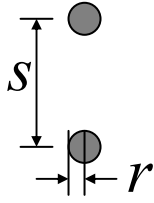
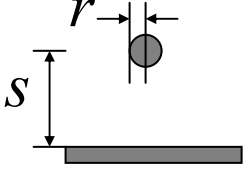
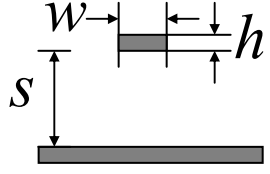
Ω/square

ρ : 抵抗率

材料	記号	ρ ($\Omega\text{-cm}$)
銅	Cu	1.7×10^{-8}
金	Au	2.2×10^{-8}
アルミニウム	Al	2.7×10^{-8}
タングステン	W	5.5×10^{-8}

キャパシタンス

単位長当たりのキャパシタンス

平行平板	同軸	対	グランド上棒	グランド上線
				
$\varepsilon \frac{w}{s}$	$\varepsilon \frac{2\pi}{\ln(r_2/r_1)}$	$\varepsilon \frac{\pi}{\ln(s/r)}$	$\varepsilon \frac{2\pi}{\ln(2s/r)}$	$\varepsilon \frac{w}{s} + \varepsilon \frac{2\pi}{\ln(4s/h)}$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

材料

ε_r

空気

1

テフロン

2

ポリイミド

3

シリコン酸化膜

3.9

ガラス・エポキシ

4

アルミナ

10

シリコン

11.7

インダクタンス

一様な誘電体の中に導体がある時

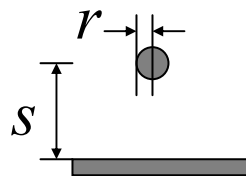
$$CL = \varepsilon\mu = \varepsilon_r\mu_r/c^2$$

$$\mu = \mu_r\mu_0, \quad \varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}, \quad \varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2}$$

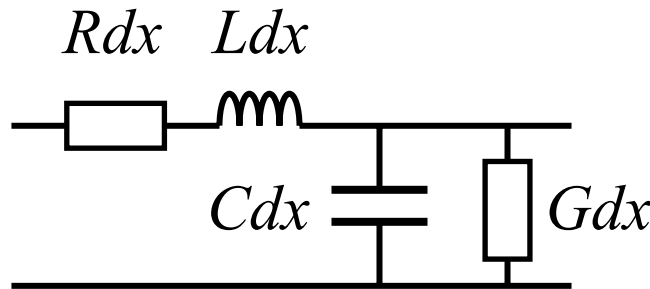
$$\mu_r \cong 1$$

例： グランド上棒



$$L = \frac{\mu \ln(2s/r)}{2\pi}$$

伝送線 transmission line



R, L, C, G : 単位長当たり

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t} \quad \frac{\partial I}{\partial x} = -GV - C \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = RGV + (RC + LG) \frac{\partial V}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

チップ内配線等 $G \sim 0, L \sim 0$ $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = RC \frac{\partial V}{\partial t}$ 拡散方程式

チップ外配線等 $G \sim 0, R \sim 0$ $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$ 波動方程式

Frequency-Domain の解

$$V \propto e^{st} V_s \quad s = j\omega = j 2\pi f$$

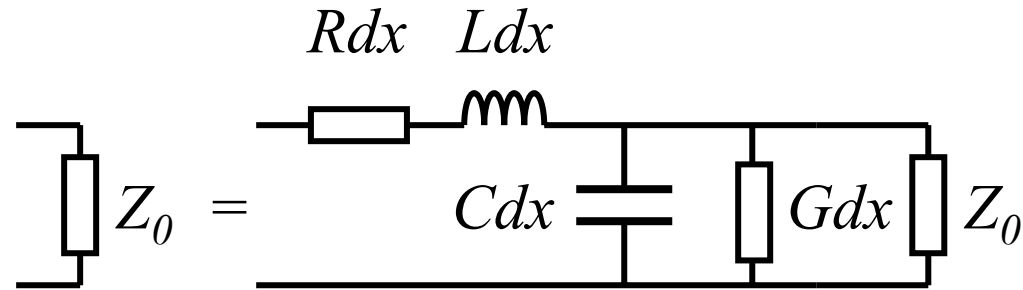
$$V_s(x) = V_s(0) \exp(-A(s)x)$$

$$A(s) = \left[(G + Cs)(R + Ls) \right]^{1/2}$$

$\text{Re } A(s)$: 減衰

$\text{Im } A(s)$: 位相シフト

無限長の伝送線インピーダンス



$$Z_0 = Rdx + Lsdx + \frac{1}{Csdx + Gdx + 1/Z_0}$$

$$\Rightarrow Z_0 = \left(\frac{R + Ls}{G + Cs} \right)^{1/2}$$

$R = G = 0$ の時

$$Z_0 = \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2}$$

周波数依存性が無い

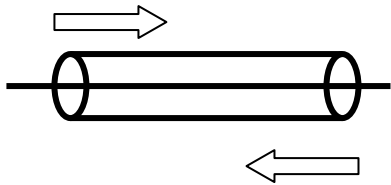
無損失LC伝送線

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

伝播速度 $v = (LC)^{-1/2} = (\mu_r \epsilon_r)^{-1/2} \underline{c}$
光速

インピーダンス $Z_0 = \left(\frac{L}{C}\right)^{1/2}$

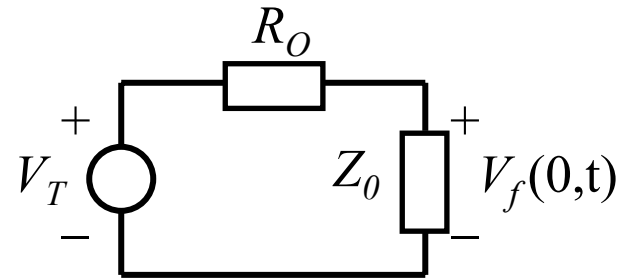
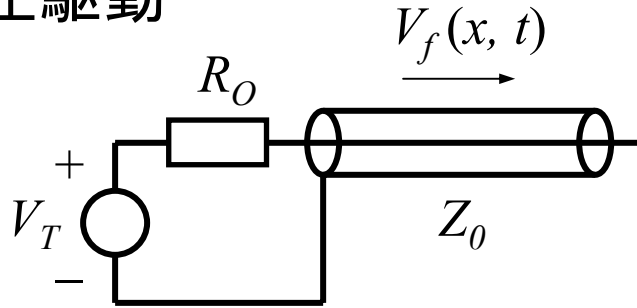
$$V_f(x, t) = V_f\left(0, t - \frac{x}{v}\right), \quad I_f(x, t) = \frac{V_f(x, t)}{Z_0}$$



$$V_r(x, t) = V_r\left(x_{\max}, t - \frac{x_{\max} - x}{v}\right), \quad I_r(x, t) = -\frac{V_r(x, t)}{Z_0}$$

LC伝送線への信号入力

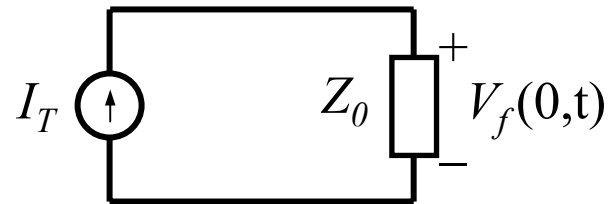
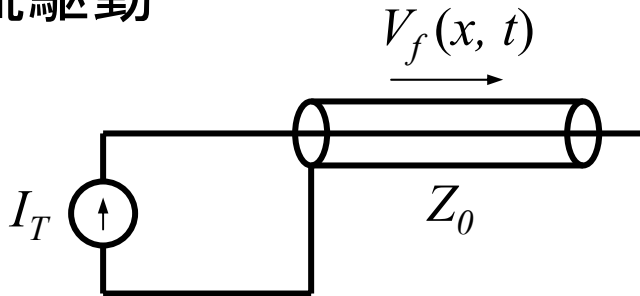
電圧駆動



$$V_f(x, t) = \frac{Z_0}{Z_0 + R_0} V_T \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

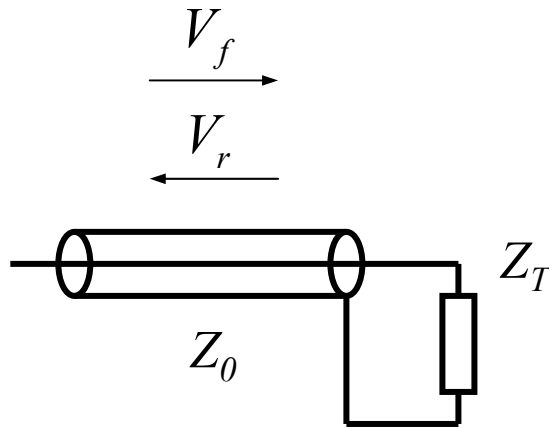
R_0 : 出力インピーダンス

電流駆動



$$V_f(x, t) = Z_0 I_T \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

LC伝送線での信号反射



$$V = V_f + V_r$$

$$I = \frac{V_f - V_r}{Z_0}$$

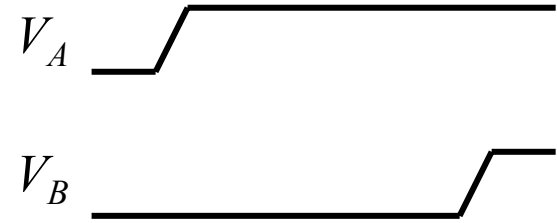
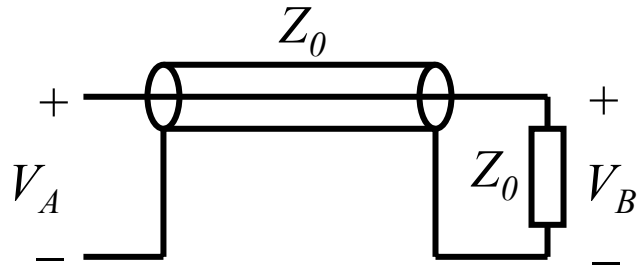
終端では

$$V = Z_T I$$

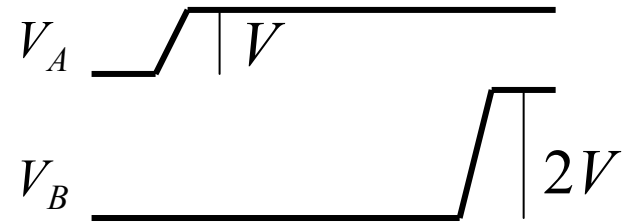
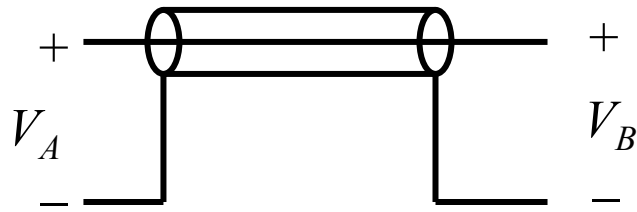
反射率

$$k_r = \frac{V_r}{V_f} = \frac{Z_T - Z_0}{Z_T + Z_0}$$

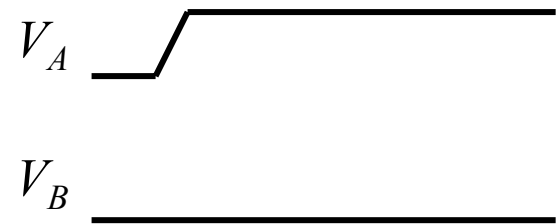
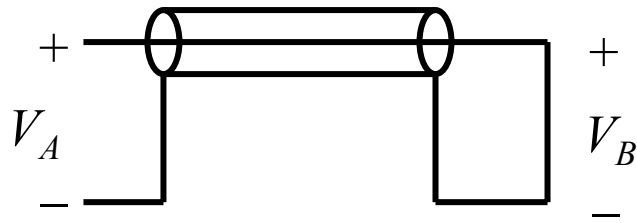
整合



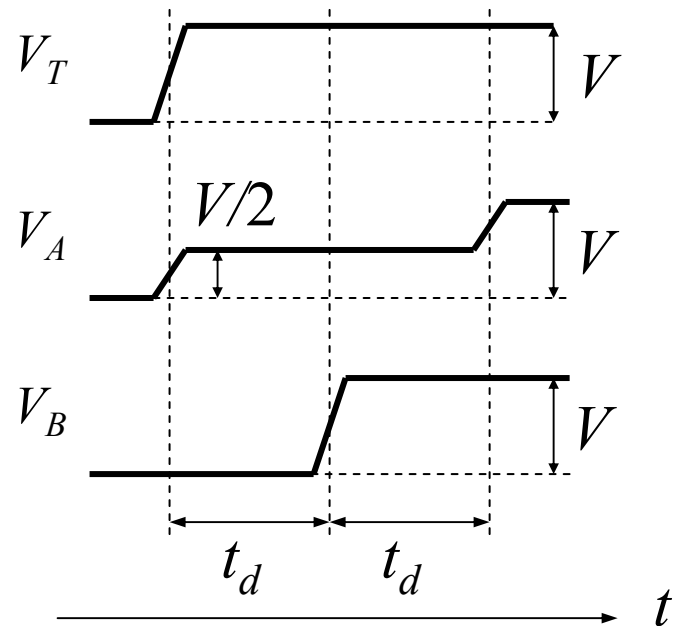
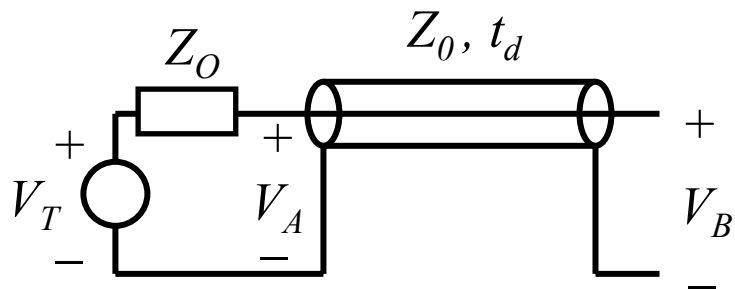
オープン



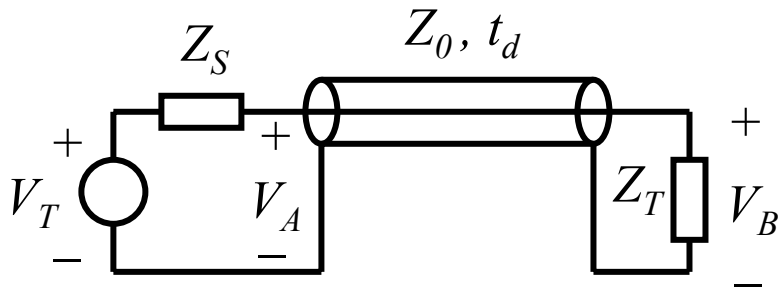
ショート



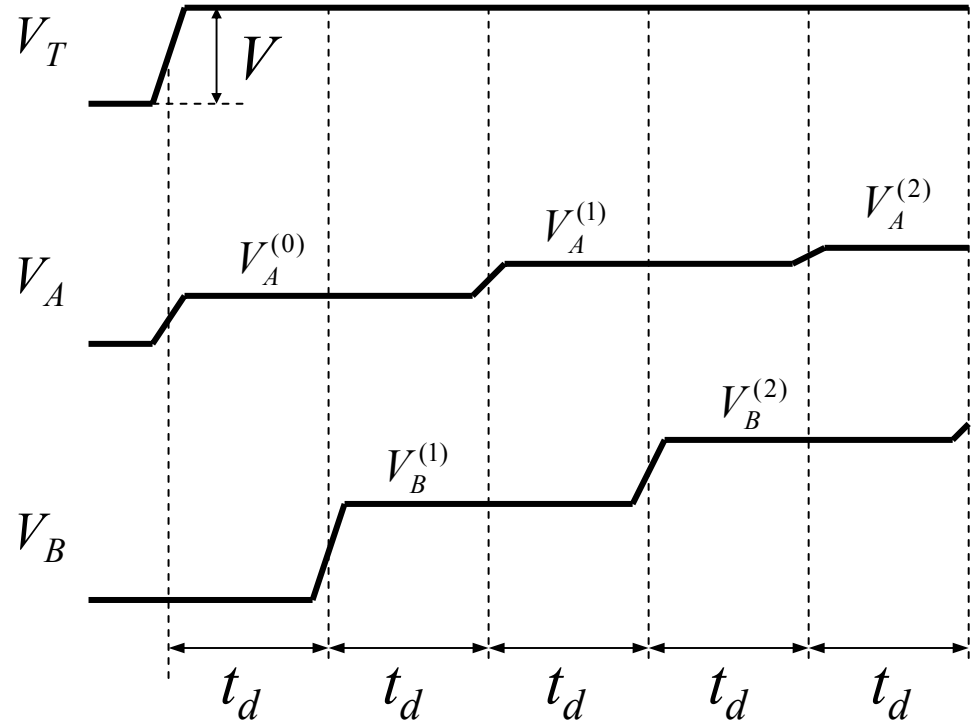
ソース終端



一般の場合



$$K_{rS} = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \quad K_{rT} = \frac{Z_T - Z_0}{Z_T + Z_0}$$



$$V_A^{(n)} = \frac{1 + K_{rT} - K_{rT}(1 + K_{rS})(K_{rS}K_{rT})^n}{1 - K_{rS}K_{rT}} \frac{Z_0 V}{Z_0 + Z_S}$$

$$V_B^{(n)} = \frac{(1 + K_{rT}) \{1 - (K_{rS}K_{rT})^n\}}{1 - K_{rS}K_{rT}} \frac{Z_0 V}{Z_0 + Z_S}$$

 $t \rightarrow \infty$

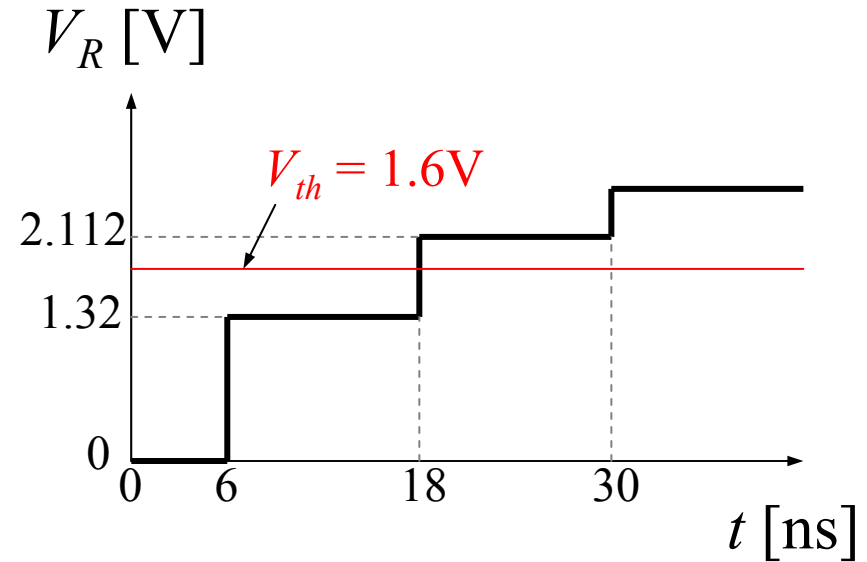
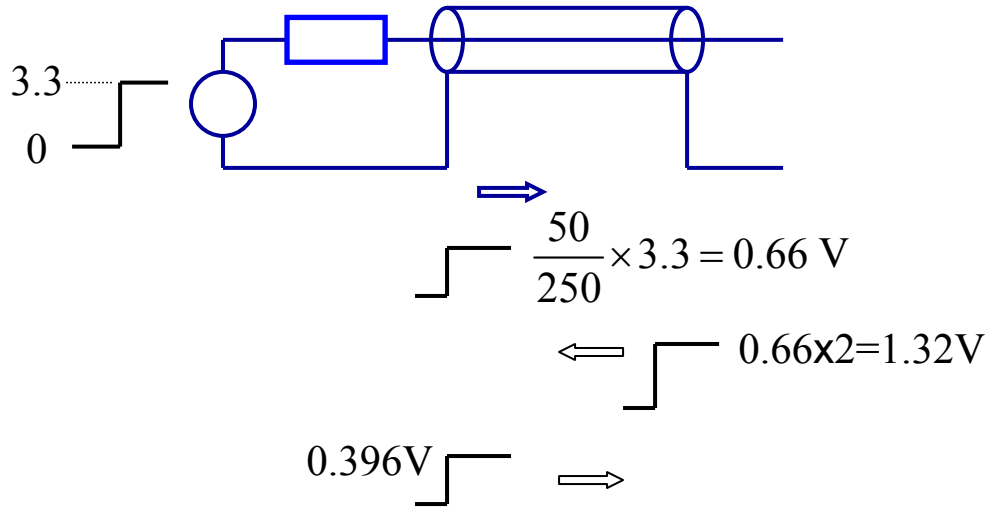
$$V_A = V_B = \frac{1 + K_{rT}}{1 - K_{rS}K_{rT}} \frac{Z_0 V}{Z_0 + Z_S} < V$$

- ・電圧信号を伝達するのに長時間を要する
- ・完全な振幅には至らない

例

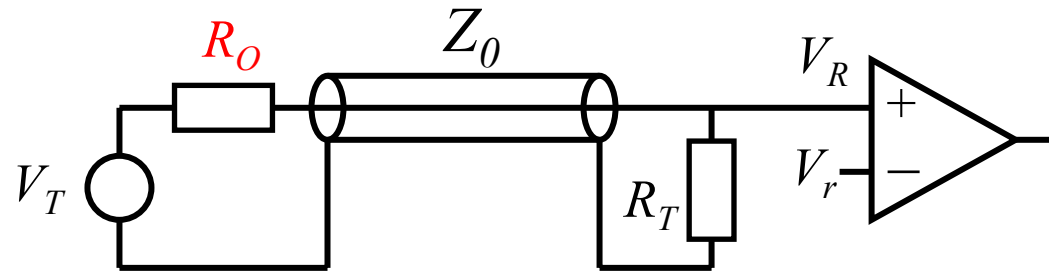
$$V_{DD} = 3.3\text{V}$$

$$R_O = 200\Omega \quad 50\Omega, 6\text{ns}$$



- 信号を伝達するのに3倍の時間を要する
- 波形がきれいでない

ドライバの出カインピーダンス



出カインピーダンス R_O

$R_O \approx 0$ 電圧モード

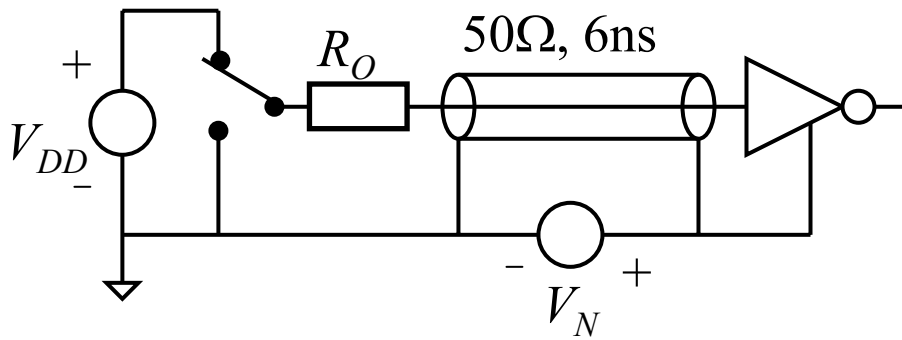
$R_O = Z_0$ ソース終端

$R_O \approx \infty$ 電流モード

昔は電圧モードで信号を伝達

現在は電流モードで信号を伝達するのが主流

Full-Swing CMOS Transmission System



$$V_{DD} = 3.3V$$

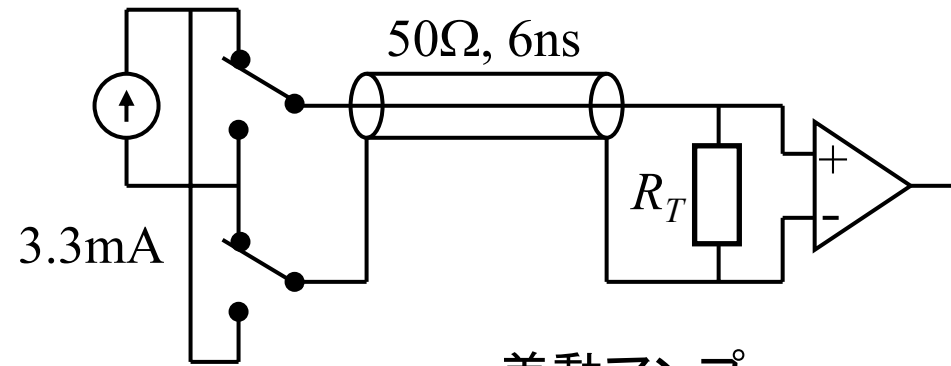
$$R_O = 200\Omega$$

CMOS inverter

感度=300mV

入力オフセット電圧=±250mV

Low-Swing Current-Mode Transmission System (LSC)



差動アンプ

感度=10mV

入力オフセット電圧=±10mV

情報信号

電圧モード: 0 = GND, 1 = V_{DD}

電流モード: 0 = -3.3mA, 1 = +3.3mA

参照信号

電源: $V_R \sim V_{DD}/2$

$I_R = 0mA$

終端

R_O と直列

R_T と並列 ($R_T = Z_0 \pm 10\%$)

信号エネルギー

1.3 nJ

22 pJ

消費電力

130 mW

11 mW

ノイズ耐性

0.7

3.6

遅延

18 ns

6 ns

LVCD (Low Voltage Differential Signaling)

