

遠端(レシーバ端)での反射対策

反射対策の代表的なものは、ダンピング抵抗である^{1),2),3)}.

ただ、この方法は、外部からユニットを購入して、そのユニットが駆動能力の過大なドライバを用いている場合には適用できない。

または、何らかの理由で、適切な場所にダンピング抵抗が設けられない場合もある。例えば、大きな IC パッケージの中央付近から出力が出ている場合に、「出力の直近にダンピング抵抗を入れる」という原則から外れてしまう場合などである。

これらの場合には、遠端、すなわち、レシーバ端で対策をする必要がある。これらの対策をいくつか述べる。

1. クランプダイオード

これは TTL 時代、特にショットキー TTL (74S, 74LS, 74AS など) のときに有効な対策であった。

TTL は、ハイ側とロー側の駆動能力が異なるため、ダンピング抵抗による対策が使えなかった。

ドライバの出力抵抗は、ハイ側は、およそ $100\ \Omega$ 、ロー側は、およそ $15\ \Omega$ 程度なので、ボードの特性インピーダンスは、 $80\ \Omega$ から $100\ \Omega$ 程度に設定していた。

特に、ロー側の反射の跳ね返りを抑えるために、クランプダイオードが有効であった。

図 1 は、これを、適用した例である。クランプダイオードは、PN 接合のダイオードではなく、逆回復時間 (t_{rr}) が短く、順方向電圧 (V_F) の小さいショットキーダイオードを用いる必要がある。

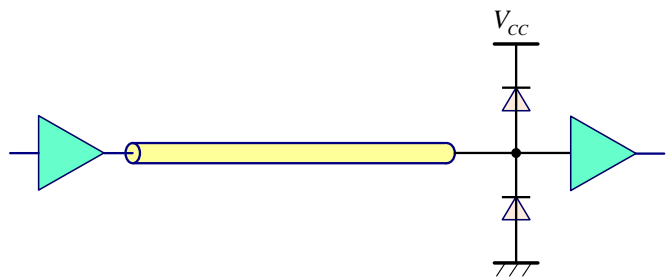


図 1. 遠端ダイオード終端 (クランプダイオード)

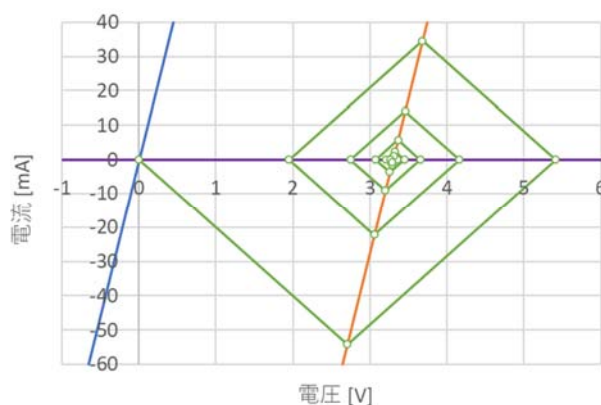


図 2. クランプダイオードなしのバリエーション

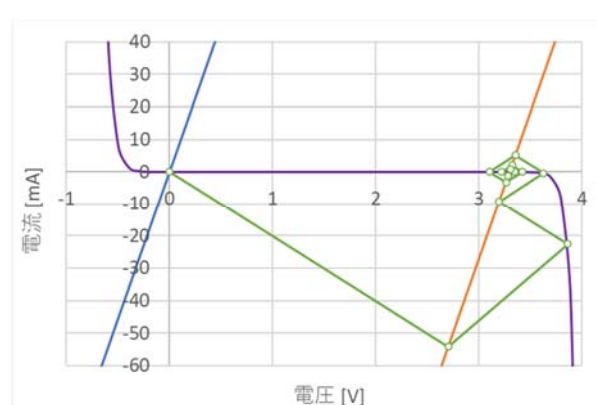


図 3. クランプダイオードありのバリエーション

同図で、電源電圧を V_{CC} と呼ぶのにはいろいろ議論がある。バイポーラトランジスタの回路では、コレクタが接続されるので、 V_{CC} と言っていたが、MOS の場合には、ドレインが接続されるので、 V_{DD} とすべきであるという

意見である。これは、抵抗負荷のソース接地の回路は V_{DD} でよいが、CMOS 回路では、プラス電源は、PMOS のソースに接続される。といって、CMOS 回路の電源を V_{SS} ということはあまりない。ここでは V_{CC} を用いる/

過去に戻って、真空管の回路では、プラスの電源は、 $B+$ と呼んでいた。150V から 350V 程度、電池式の真空管は、確か 67.5V だったと記憶しているが、筆者はこの電池を使用したことがないので、あくまで記憶の範囲である。ちなみに、真空管のヒータ(電池管の場合はフィラメントと呼んだ)の 1.5V の電池は、A 電池と呼ばれていた。

図2は、クランプダイオードを用いない場合の高駆動能力のドライバ(24mA)のバースェロン図表で、図3は、クランプダイオードを用いた場合のバースェロン図表である。

図4に、両者の時間応答を比較して示す。

2. 軽終端

反射を抑制する最もオーソドックスな方法は、図5において、特性インピーダンスを $Z_0 = 50\Omega$ としたときに、遠端の抵抗を特性インピーダンスに等しくする遠端の整合終端である。($R_2 = Z_0 = 50\Omega$)

この方法は、電源電圧が 3.3V の場合、 50Ω の整合終端をすると、1 回路当たり、100mW の電力を消費するので、対象の信号端子が多い場合には好ましくない。

そこで、終端抵抗の値を大きくして、反射の波形を求める。

図6は、図5の立ち上がりを解析したバースェロン図表である。ここでは $R_2 = 177\Omega$ の例を示す。

必要なのは、遠端の最初のオーバシュート $v(l, \tau)$ と、その跳ね返り $v(l, 3\tau)$ である⁴⁾。

参考文献 4)の、式(2.59)および式(2.60)に対して、終端抵抗と終端電圧によるシフト分を加えて、

$$v(l, \tau) = \frac{Z_0}{R_1 + Z_0} (1 + r_2) \times V_{CC} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \frac{V_{CC}}{2} \dots \dots \dots (1)$$

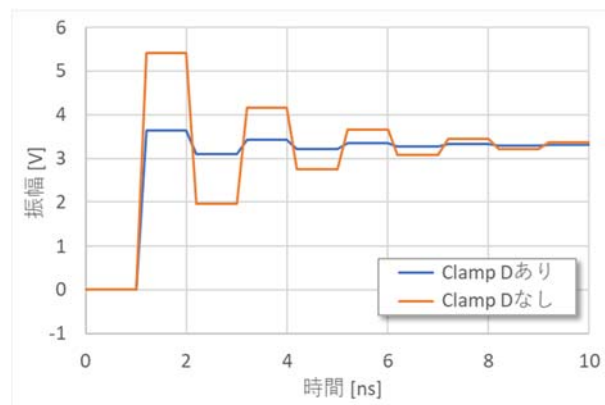


図4. 時間応答

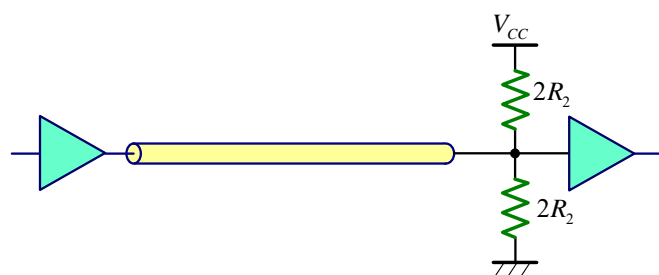


図5. 遠端終端

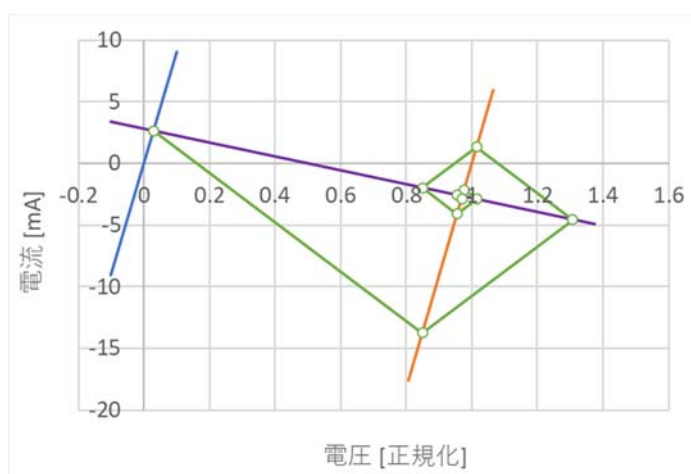


図6. バースェロン図表

$$v(l, 3\tau) = \frac{Z_0}{R_1 + Z_0} (1 + r_2)(1 + r_1 r_2) \times V_{CC} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \frac{V_{CC}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

ここで大切なのは、 $v(l, 3\tau)$ である。これがスレッショールド電圧に近くなると、ノイズマージンが小さくなる。

図7は、終端抵抗 R_2 に対する $v(l, 3\tau)$ である。

R_2 を小さくすると、跳ね返り電圧が小さい ($v(l, 3\tau)$ が大きい) が消費電力が大きくなる。

例えば、 $R_2 = 177\Omega$ では、 $v(l, 3\tau) = 0.85$ ，すなわち、跳ね返りが 15% である。このときの消費電力は、30mW 程度である。

図8に、 R_2 を、図7の抵抗値に対して変化させたときの時間応答を示す。

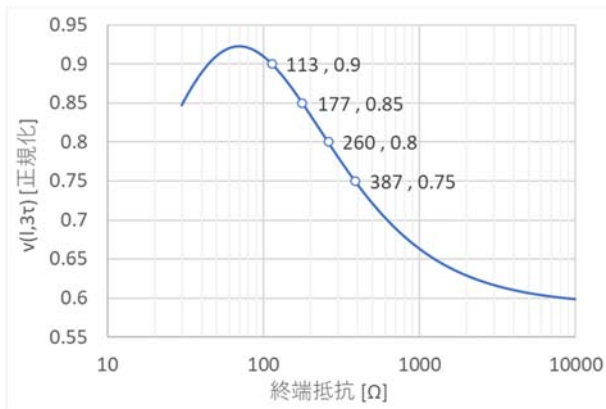


図7. R_2 と $v(l, 3\tau)$

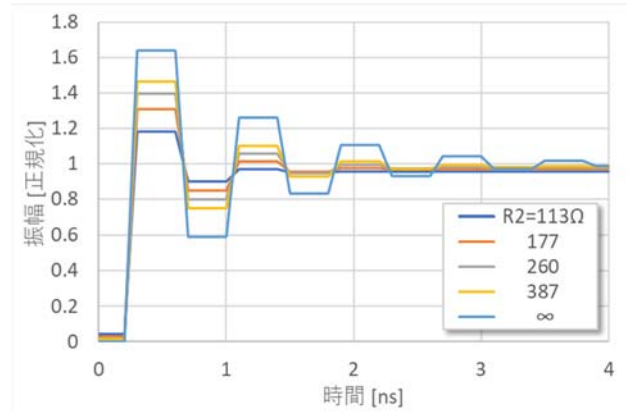


図8. R_2 を変化させたときの時間応答

3. 能動軽終端

消費電力を抑えて、反射の跳ね返りを小さくする試みが、図9に示す能動軽終端である。

信号が、ローからハイに変化する、立ち上がり時に、遠端のゲートの出力はローである。

信号がハイに変化すると、 R_2 からローへの終端となる。遠端のゲートの遅延時間後には、出力は、ローからハイに変化し、信号のハイと、終端電圧のハイにより、終端抵抗に流れる電流は、ほぼゼロとなる。

この動作を、図10で説明する。

式の変形が多いので、結論だけを知りたい場合は、式(22)まで飛ばしてもよい。

初期値は、遠端の終端電圧がゼロなので、電圧はゼロである。

すなわち、

$$v_0 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$i_0 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

である。



図9. 能動軽終端

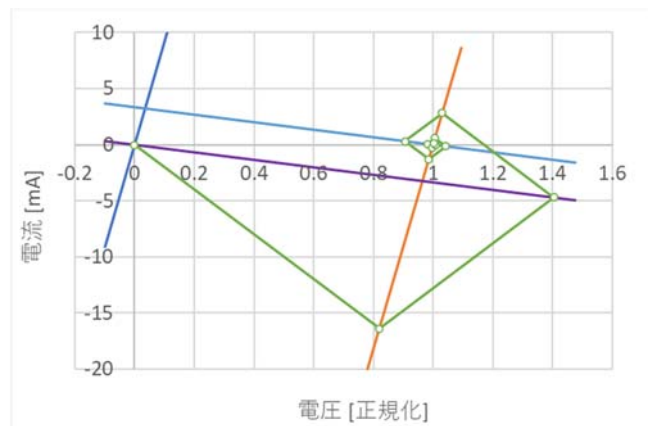


図10. 能動軽終端のバージェロン図表

原点 $(v_0, i_0) = (0, 0)$ から, PU (Pull Up) に向かって, $-1/Z_0$ の傾きで直線を引く.
PU との交点が, $(v(0,0), i(0,0))$ である.

この直線は,

$$i = -\frac{v}{Z_0} \dots\dots\dots (5)$$

であり, PU は,

$$i = \frac{v - V_{CC}}{R_1} \dots\dots\dots (6)$$

であるから, その交点 $v(0,0)$, $i(0,0)$ は,

$$\begin{pmatrix} 1 & Z_0 \\ 1 & -R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ V_{CC} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

であり,

$$v(0,0) = \frac{Z_0}{R_1 + Z_0} V_{CC} \dots\dots\dots (8)$$

$$i(0,0) = -\frac{V_{CC}}{R_1 + Z_0} \dots\dots\dots (9)$$

である.

この点を通して, 傾き $1/Z_0$ の直線と, 原点を通る終端との交点を求める.

$$i = \frac{1}{Z_0} \{v - v(0,0)\} + i(0,0) \dots\dots\dots (10)$$

$$i = -\frac{v}{R_2} \dots\dots\dots (11)$$

であるから, その交点 $v(l, \tau)$, $i(l, \tau)$ は,

$$\begin{pmatrix} 1 & -Z_0 \\ 1 & R_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(0,0) - Z_0 i(0,0) \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

$$v(l, \tau) = \frac{R_2}{R_2 + Z_0} \{v(0,0) - Z_0 i(0,0)\} = \frac{2R_2 Z_0}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} V_{CC} \dots\dots\dots (13)$$

$$i(l, \tau) = -\frac{1}{R_2 + Z_0} \{v(0,0) - Z_0 i(0,0)\} = -\frac{2Z_0}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} V_{CC} \dots\dots\dots (14)$$

となる. さらに, この点を通して, 傾き $-1/Z_0$ の直線と PU との交点を求める.

$$i = -\frac{1}{Z_0} \{v - v(l, \tau)\} + i(l, \tau) \dots\dots\dots (15)$$

$$i = \frac{v - 1}{R_1} \dots\dots\dots (6)$$

であるから, その交点 $v(0, 2\tau)$, $i(0, 2\tau)$ は,

$$\begin{pmatrix} 1 & Z_0 \\ 1 & -R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(l, \tau) + Z_0(l, \tau) \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$v(0, 2\tau) = \frac{1}{R_1 + Z_0} [R_1 \{v(l, \tau) + Z_0(l, \tau)\} + Z_0] = \frac{Z_0}{R_1 + Z_0} \left\{ 1 + \frac{2R_1(R_2 - Z_0)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \right\} V_{CC} \dots\dots\dots (17)$$

$$i(0, 2\tau) = -\frac{1}{R_1 + Z_0} [1 - \{v(l, \tau) + Z_0(l, \tau)\}] = \frac{1}{R_1 + Z_0} \left\{ -1 + \frac{2Z_0(R_2 - Z_0)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \right\} V_{CC} \dots\dots\dots (18)$$

となる。さらにこの後は、終端 R_2 の終端電圧が電源に変わるので、この点を通して、傾き $1/Z_0$ の直線と、電源を通る終端との交点を求める。

$$i = \frac{1}{Z_0} \{v - v(0, 2\tau)\} + i(0, 2\tau) \dots\dots\dots (19)$$

$$i = -\frac{v - V_{CC}}{R_2} \dots\dots\dots (20)$$

であるから、その交点 $v(l, 3\tau)$, $i(l, 3\tau)$ は、

$$\begin{pmatrix} 1 & -Z_0 \\ 1 & R_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(0, 2\tau) - Z_0 i(0, 2\tau) \\ V_{CC} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (21)$$

$$v(l, 3\tau) = \frac{Z_0}{R_2 + Z_0} \left[1 + \frac{2R_2}{R_1 + Z_0} \left\{ 1 + \frac{(R_1 - Z_0)(R_2 - Z_0)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \right\} \right] V_{CC} \dots\dots\dots (22)$$

となる。

跳ね返りを抑制するために、式(22)の $v(l, 3\tau)$ が V_{CC} に等しくなる、終端抵抗 R_2 を求める。

式(22)の右辺を V_{CC} において R_2 についての方程式を解く。これは R_2 についての1次方程式なので、簡単に求まる。

$$\frac{Z_0}{R_2 + Z_0} \left[1 + \frac{2R_2}{R_1 + Z_0} \left\{ 1 + \frac{(R_1 - Z_0)(R_2 - Z_0)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \right\} \right] = 1 \dots\dots\dots (23)$$

式(23)を R_2 について解くと、

$$R_2 = \frac{3Z_0 + R_1}{Z_0 - R_1} Z_0 \dots\dots\dots (24)$$

となり、 $R_1 = 11\Omega$, $Z_0 = 50\Omega$ のときに、 $R_2 = 206\Omega$ となる。

図 10 は、 $R_2 = 300\Omega$ で、式(24)は満たしていない。図 11 に、 $R_2 = 206\Omega$ のときのバージェロン図表を示す。 $v(0, 2\tau)$ 以降は、出力電圧は、電源電圧に落ち着いている。

なお、本方式は、終端電圧が、線路の遅延時間 τ の3倍、すなわち 3τ で切り換わることを想定している。遠端の非反転のゲートの入力には、 1τ 遅れた信号が伝わっているので、ゲートの遅延時間は、線路の遅延時間

2τ であることが条件である。

図 12 に、 $R_2 = 206\Omega$ のときの時間応答を示す。終端のゲートの遅延時間は、 $1.5\tau, 2\tau, 2.5\tau$ とした。

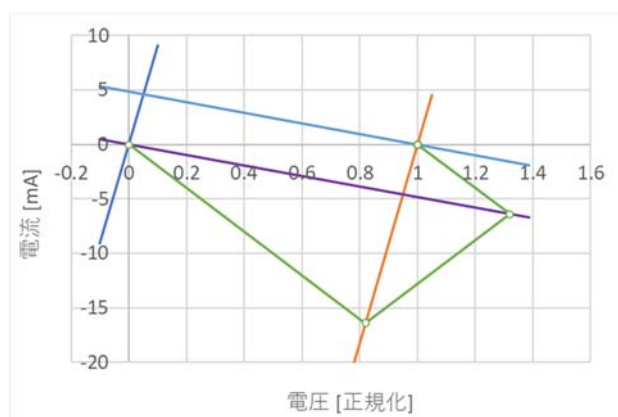


図 11. $R_2=206\Omega$ のときのバージェロン図表

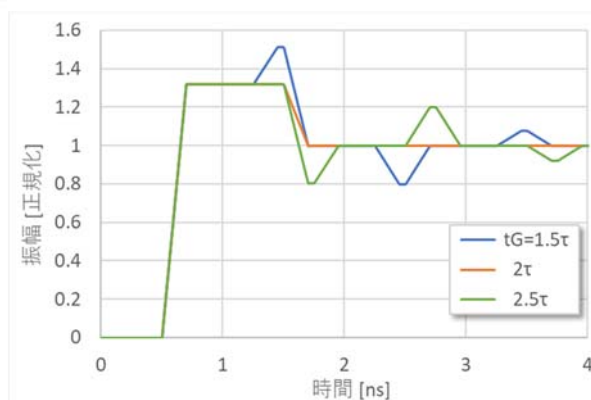


図 12. $R_2=206\Omega$ のときの時間応答

ゲートの遅延時間が 2τ のときは、1.3 付近のオーバシュートの後、その跳ね返りは 1 に固定される。

2τ 以外の遅延時間の場合は、0.8 程度にひげ状の跳ね返りが生じる。振幅は正規化しているため、3.3V ロジックの場合は、跳ね返りの 0.8 は、2.64V である。

なお、本方式は、定常状態では、終端のゲートがラッチとして働き、消費電力はゼロである。

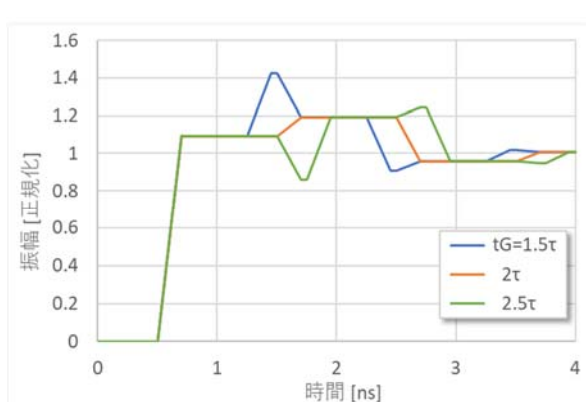


図 13. $R_2=100\Omega$ のときの時間応答

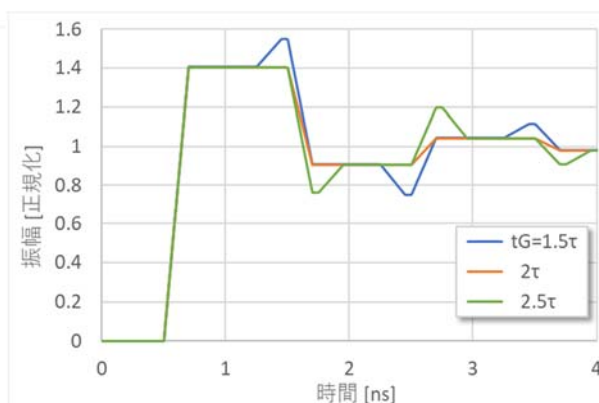


図 14. $R_2=300\Omega$ のときの時間応答

図 13 に、 $R_2 = 100\Omega$ のときの、図 14 に、 $R_2 = 300\Omega$ のときの時間応答を示す。いずれの場合も、ゲートの遅延時間が 2τ のときが最適である。

参考文献

- 1) 碓井有三：ボード設計者のための分布定数回路のすべて(改訂 3 版) 自費出版 (<http://radioy.a.la9.jp/>), pp.65-66, 2016
- 2) 碓井 有三：シグナルインテグリティ講座 「第 2 回 分布定数回路の等価回路と方程式」 エレクトロニクス実装学会誌 21 巻 6 号(2018 年 9 月号) p.603
- 3) ダンピング抵抗の値ってどのように決めるの? <https://www.macnica.co.jp/business/semiconductor/articles/basic/110489/>
- 4) 前掲 1) pp.38-40, 2016