

デジタル信号の性質と高速伝送技術

第2回 光速で進む信号は導体の中を通らない

志田 晟
Akira Shida

今回は、まず、線路の一方にスイッチをつないだ回路を使って、スイッチ ON 時に生じるばたつき波形を観測し、その原因を探ります。その原因を考察することで、高速伝送技術、高周波領域に欠かせない概念である**特性インピーダンス**の深意を明らかにしていきます。

線路端のスイッチによるばたつき波形の原因と対策

● スイッチによる誤動作の原因はスイッチだけではなかった

スイッチの ON/OFF 時に生じる機械的振動は**チャタリング**と呼ばれ、電子回路の誤動作の一因とされて

います。では、誤動作の原因はスイッチだけでしょうか？この現象を詳しく調べてみましょう。

実験に使用した回路を図 2-1 に示します。スイッチ S_1 と回路基板の間は、1 m のビニル電線をツイストした線をつないでいます。検出回路側では $10\text{ k}\Omega$ で 5 V にプルアップしています。図 2-1 の実際の接続状態を写真 2-1 に示します。

スイッチ S_1 を ON したときの回路入力部①点の波形をオシロスコープで観測しました。図 2-2(a) はスイッチ ON 直後の数ミリ秒程度の時間を、図 2-2(b) は数マイクロ秒程度の時間を観測したものです。図 2-2(a) から、スイッチ ON 直後 1 ms 程度の間、接点が機械的に ON/OFF を繰り返していることが分かり

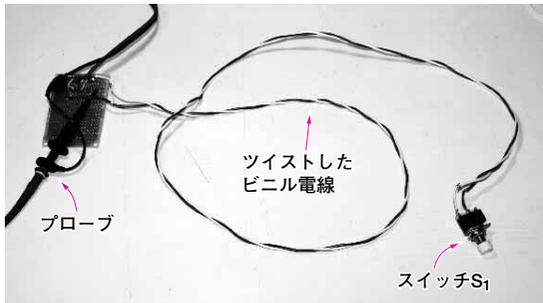


写真 2-1 実験の様子(スイッチと 1 m のツイスト・ペア・ケーブル)

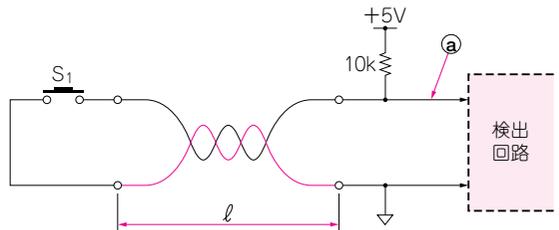
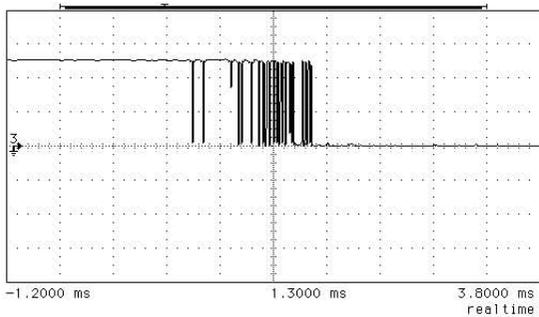
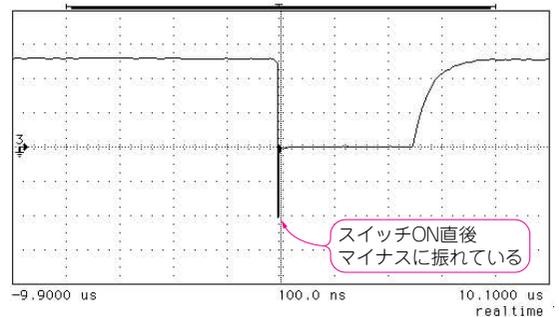


図 2-1 スイッチ ON 時のばたつき波形を調べる実験回路(①点で波形観測)



(a) 2 V/div, 500 μs /div



(b) 2 V/div, 2 μs /div

図 2-2 図 2-1 のスイッチ S_1 を ON したときの①点の波形

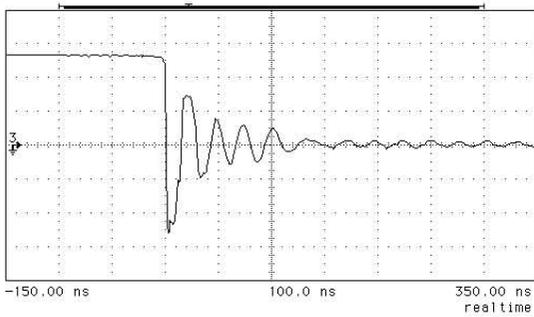


図2-3 ケーブル長1mのときの@点の波形(ばたつき部の拡大。約25 nsの繰り返しが見られる。2 V/div, 50 ns/div)

ます。図2-2(b)からは、スイッチON直後マイクロ秒以下の部分では、電圧がマイナス電圧側に触れている現象が確認できます。

図2-3はさらにこの部分の時間軸を拡大したものです。何度もプラスとマイナスを繰り返すばたつき波形が観測できます。従来、このような波形も機械的な接触動作の一部として説明されることが多かったようです。

ところが、図2-3の波形の間隔を見てみると、25 nsです。これは、機械的な動作としてはかなり速い周期で、また同じ間隔で繰り返されています。スイッチ動作を何度繰り返してもこの繰り返し波形の時間間隔は同じでした。この繰り返し波形はスイッチが原因ではありません。

では、この繰り返し波形は、何が原因で起きているのでしょうか？

● **ばたつき波形の周期はスイッチではなく線路長に関係する**

原因を探るために、ケーブルの長さを変えて実験してみました。図2-4は、図2-3のケーブルの長さを1 mから2 mに変えた場合の波形です。図2-3と図2-4から、線路の長さを2倍にするとマイクロ秒以下で見られるばたつき波形の周期が約2倍に延びています。

線路の長さとの関係があるということは、線路を伝わる

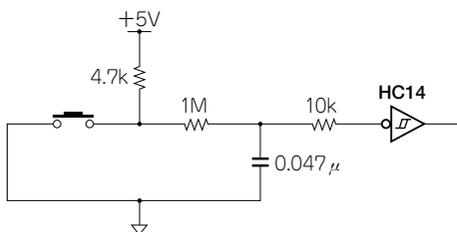


図2-5(2) スイッチON/OFF時のばたつき波形をなまらせるスイッチ入力回路の例

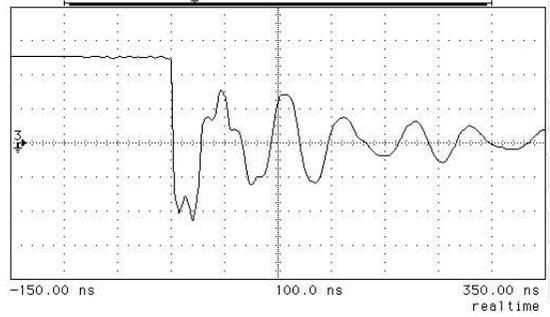


図2-4 ケーブル長2mのときの@点の波形(ばたつき部の拡大。約50 nsの繰り返しが見られる。2 V/div, 50 ns/div)

る信号の時間と関連があると考えられます。そこで、線路を伝わる信号の時間を求めてみましょう。

電気信号の速度 v_s [m/s] は線路の周囲絶縁材の比誘電率を ϵ_r とすると、光の速さを c [m/s] として、

$$v_s = c/\sqrt{\epsilon_r}$$

で表されます。また、電気信号が長さ l [m] の線を1往復する時間 t [ns] は、

$$t = 2l \frac{3.3}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

となります。

図2-1の回路で使用したケーブルはビニル電線で、ビニルの比誘電率は4程度です。比誘電率を4として1 mを1往復する時間を計算すると約13 nsとなります。

図2-3の場合は、プラスあるいはマイナスのピークどうしの間隔は25 nsですが、1往復ごとにプラスとマイナスのピークを繰り返していると解釈できるのです。

● **CR回路による対策と高速伝送への影響**

図2-1のように、スイッチの機械的振動が原因で生じるミリ秒にわたる波形を回路に取り込む場合は、図2-5のように波形を大きくなまらせるCR回路を使って対策することがあります(2)。あるいは、一定の間隔でスイッチが押されていることをサンプリングする方法なども用いられています。

図2-6は、図2-5の回路を通してICから出力した波形を示したのですが、スイッチ部はマイクロ秒以下で動作しているのに出力は数十ミリ秒も遅れています。

ここで注目したいのは、機械的な原因ではない線路の長さによって周期が変化する、マイクロ秒以下の非常に短い時間のばたつきです。繰り返し周期が25 nsということは、その逆数から40 Mbpsの信号伝送に相当します。10 nsであれば100 Mbpsです。高速に電気信号を伝送する場合には、マイクロ秒以下のばたつきを大きな時定数のCRでなまらせるわけにはいきません。

すなわち、**機械的ばたつきと線路長によるばたつき**