

2009年5月25日

オシロスコープ トリガ回路部の技術

小林謙介氏は 岩崎通信機、LeCroy Corp.等で長年サンプリング・オシロスコープの開発に従事され、現在はマレーシアのペナンにお住いである。同氏には 共同研究等で一緒に仕事をさせていただき、回路システムの考え方を教えていただいた。また何件か共同で論文も発表させていただいている。今回、エレクトロニクス誌に「非同期回路のメタスタビリティ問題」に関するコラムを執筆する際に、オシロスコープのトリガ回路部の技術の内容確認の連絡をさしあげ、基本的なことから丁寧に解説をしていただいた。同氏の技術の伝承のため、HPでその内容を公開いたします。

(質問) トリガ回路部、ジッタレス・トリガ回路の技術をご教授ください。

(謙介氏解説)

オシロスコープのトリガ回路は、波形ディスプレイ時の時間軸（時刻のレファレンス）を定める（トリガ）信号入力を「認識」する回路です。

なお、トリガ入力を認識した後の動作は、リアルタイムオシロ、デジタルオシロ、サンプリングオシロで異なります。

トリガ認識は、それまで「L」である信号レベルを「H」とすることで行われますので、現在では DFF が使われます。

基本回路は図 1 で、

1. D 入力「L」状態で一旦 DFF をリセットします。このリセット以降トリガが CK 端子に入力しても、DFF は出力状態をかえません。つまりトリガ入力を無視しています (NB1)。
2. トリガを待ち受ける状態にする為、オシロは D 入力を「H」とします。
3. 以降初めて入力するトリガで DFF は出力を「H」とし、トリガが入力したことを認識します。

NB1: トリガを無視する状態を作っていることをホールドオフと呼び、この間はオシロスコープが CRT を掃引したり（リアルタイム）、ADC データをメモリに書き込んだり（デジタル）といった情報取得や処理といった一連の動作をしています。また一連の動作後も暫くはホールドオフを続け、十分に安定した初期状態を作ります。

単純トリガ回路の問題点

しかし、ホールドオフ解除時にトリガが入力すると、メタスタビリティが発生し、図2の状況に陥ります。

この場合、トリガ入力認識する DFF の出力が「H」となる時点は実際のトリガ入力より遅れますが、このことをシステムでは認識できず、DFF の Q が「H」になった時点トリガ入力時点と捉えてしまいます。

ご存知のように、メタスタビリティは Q 出力が L と H の中間レベルをとり、その後時間経過とともに、H か L へ収束します。中間値を取り続ける期間は指数的に減少しますが、ECLinPS クラスでも数 ns は目に見える程度に続きますので、セットアップ、ホールドタイムが 100ps 程度以下であることを考えると、大変長い時間です。

中間レベルから H へ移行した Q 出力を次段の回路が何時 H とみなすかは定かではありませんが、少なくともトリガ入力時点よりは遅く、また中間レベルが長く続くほど、遅れた時点で H とみなすであろうと想定できます。また中間レベルから L へ移行した場合、もし次段が L とのみ認識していれば、図2に示すトリガ#2の入力でトリガ入力認識しますので問題はおきません。しかし中間レベルの持続期間を H と認識していると何らかの影響はでます（例えば掃引信号のランプを短期間発生させてしまうといったような）。

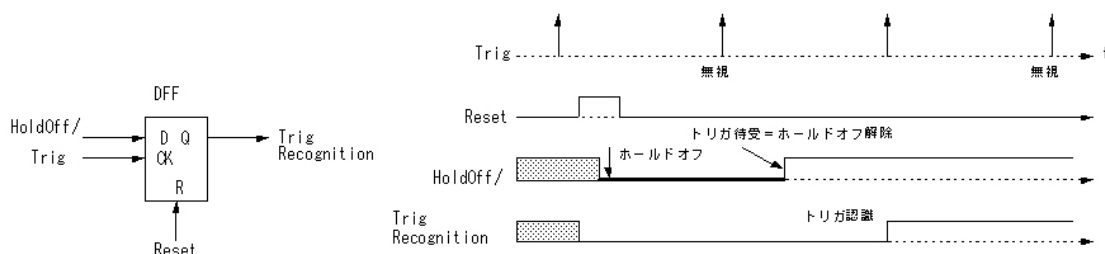


図1 トリガ回路

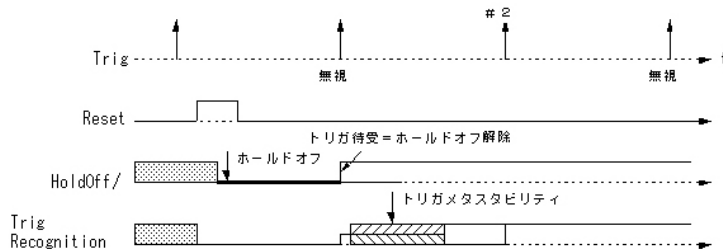


図2 トリガ回路のメタスタビリティ

このメタスタビリティの発生確率を低く抑える回路構成が jitterless 回路ですが、今では再同期回路として多くの高速デジタル回路で採用されています。オシロでは 1960 年代(?)頃のトンネルダイオード時代から使われていました。構成は図 3 に示す DFF の 2 段縦属接続です。DFF1 の Q 出力を DFF2 の D 入力に繋ぎ、Trig1 に対し Trig2 に遅延 T_d をかけます。

この構成にすると、DFF1 の Q 出力(すなわち基本回路図 1 の TrigRecognition)が Trig2 入力までに、中間値レベルではなく「H」もしくは「L」に収束していれば、DFF2 でのメタスタビリティ発生は防げます。中間値レベルの持続確率は指数的に減少しますので、 T_d を大きくすればするほど、メタスタビリティ発生確率は低下します。図 3 からお分かりのように、DFF1 のメタスタビリティ状態が、中間レベルから H へ変化した場合は「トリガ認識 H」の時点で、また中間レベルから L へ変化した場合は「トリガ認識 L」の時点で Trig2 入力を認識します。もし DFF1 の Q がメタスタビリティ状態時に Trig2 が入力すれば、図 3 においても TrigRecognition 出力はメタスタビリティを発生します。Trig 周波数が高く大きな T_d が取れない場合は、DFF3 段の構成も考慮されます。

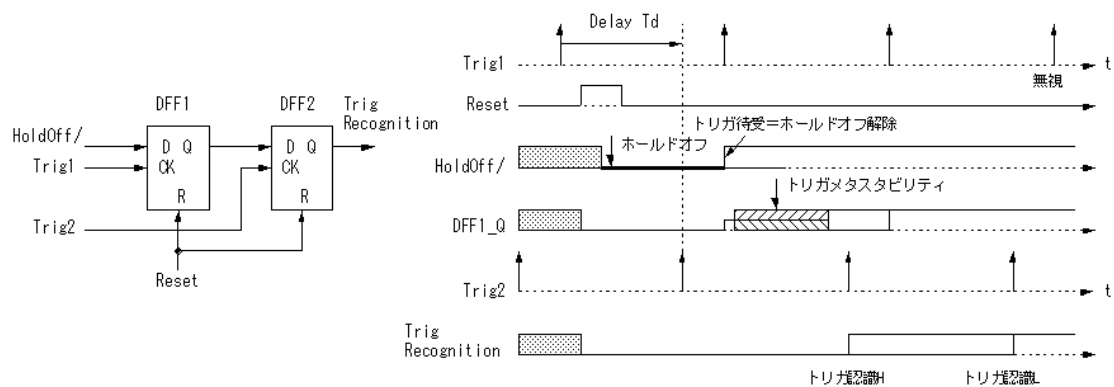


図3 jitterless回路

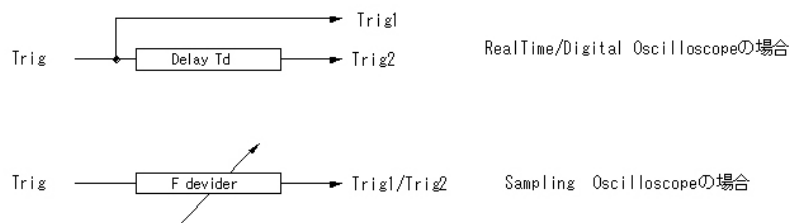


図4 二つのトリガ信号の発生方法

但し；

1. $T_d < T_{trig}$ の条件が付加されますので、トリガ入力の繰り返しが高い場合、 T_d を大きくとれません。
2. 低ジッタを狙う場合、 T_d は受動遅延線で発生させます。それでも遅延線のロスで高域が低下しトリガ波形の立ち上がりが劣化しますので、ジッタは増加します。

リアルタイムやデジタルオシロの場合、信号（＝トリガ信号）は単発に近い場合があるので（本当の単発はオシロでは見れないし、また一回しか生起しないならモニタしても意味ないですね）、Trig1 と Trig2 は遅延素子を用いて一つの信号から作り出すことが必須です。

しかしサンプリングオシロの場合は繰り返し信号の入力が前提であり、且つサンプリングレートも通常では 100KHz と大変低いので、高周波のトリガ信号を分周して最大でも 10-100MHz 程度とすると、Trig1 と Trig2 に同じ信号が使えます。但し DFF 1 の CK から Q への伝播遅延時間が、DFF 2 のセットアップタイムより大きいことが前提で（小さい場合は短い遅延素子必要）、且つ一つのサンプリングパルスが発生させるのに最低 2 つのトリガ信号が必要になります。この方式は遅延方式の場合の $T_d=10-100\text{ns}$ に相当し、メタステーブル発生確率は遅延方式に比べ無視できます（ $\exp[-100]$ 以下？）。

（質問） オシロのトリガ回路でメタスタビリティの確率が高いとどういう不都合が生じますか。

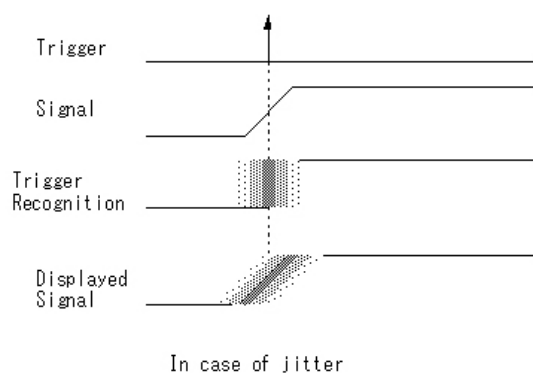
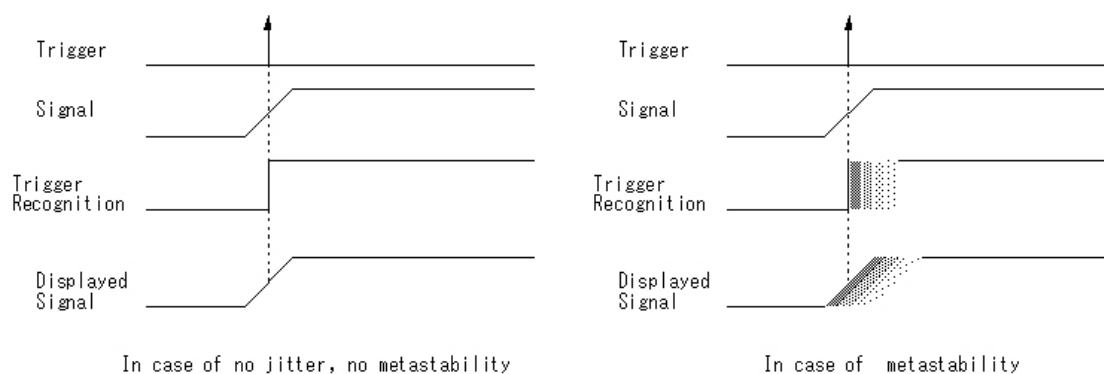
（謙介氏解説）

トリガ入力時点をレファレンスにして

1. 昔のリアルタイムオシロスコープでは CRT の輝点を右から左へ掃引（スイープ）します。
2. デジタルオシロでは、AD 変換されメモリ（レジスタ）に蓄えられたデータの時間位置を決定します。
3. サンプリングオシロでは、トリガ時点以降の信号波形の瞬時値を、時間を変えながら順次サンプリングしていきます。

いずれのオシロスコープでも（測定する信号を同一波形として）繰り返して測定すると、理想的な場合は常に同じ波形を描きますが、トリガノイズやトリガメタスタビリティがあると、波形のランジッション部が太くなります。添付図を参照下さい。

ノイズジッタの場合は、波形のランジッション部の分布が対称（正規分布）ですが、メタスタビリティジッタの場合は、理想的な場合より右側、即ち遅れた時間位置にランジッション部が Exponential で分布します。またメタスタビリティによるジッタ分布は、通常ノイズによるジッタより数倍から数十倍に広がります。



(質問) コラムに書こうとしている「筆者は電子計測技術の研究所で仕事をしていたことがあるが、そこでベテラン研究者が、オシロスコープのトリガ回路でもメタスタビリティ問題が存在するのでその問題に挑戦していた。その結論は発生確率を小さくすることはできるが、完全にゼロにできる回路システムは実現できないということであった」という記述は正しいですか。

A. テラテックでの内容、結論（「完全なメタスタビリティ対策はできない」）に関しては間違いないです。

オシロスコープのトリガ回路は、ホールドオフ解除（通常 D 信号変化）とトリガ信号入力（通常クロック入力）間に同期関係が無く、当にメタスタビリティ問題です。このため所謂ジッターフリーと呼ばれる DFF の縦続構成を 2 段から 3 段にして発生確率を抑えています。

尚テクトロニクス社が 1992 年に

"Method and electrical circuit for eliminating time jitter caused by metastable conditions in asynchronous logic circuits"

(US patent 5122694) という特許を取得しています。

(群馬大学 小林春夫)