

Technical Note

ELSENA

ALTERA デバイスのメタスタビリティ

文書管理番号: ELS0320_S000_10

2006年3月

株式会社エルセナ

ALTERA デバイスのメタスタビリティ

目次

1 はじめに.....	3
2 メタスタビリティとは	3
3 メタスタビリティの動作	3
4 メタスタビリティの解析	5
5 ALTERAデバイスのメタスタビリティ特性	7
6 メタスタビリティの計算例	7
7 メタスタビリティの回避策	7
7-1 同期用フリップ・フロップの使用	7
7-2 FIFOバッファの使用.....	8
7-3 同期化によるレイテンシの増加を克服.....	9
8 メタスタビリティのシステムへの影響	9
9 おわりに.....	9
改版履歴.....	10
参考文献.....	10

1 はじめに

デジタル・システム機器間において、異なる時間領域(周波数領域)で信号の授受を行う場合、相互に信号の同期を取る必要があります。フリップ・フロップ(レジスタ)を含まない回路系では信号間の相互ディレイを考慮することによって、ハザードに対するシステムの信頼性の低下を防ぐことができます。一方、トリガ(クロック)信号を基準にしたフリップ・フロップでは、入力信号に対し、ローカルのクロック系統(自システム内のクロック系)と同期をとる必要があります。この同期化対策がなされないシステム間では、ある確率でシステムの誤動作を招く原因となります。

この資料ではメタスタビリティについて解説し、メタスタビリティの定量化方法とこの影響を最小にする方法を説明します。この資料には ALTERA デバイスで非同期のデータを同期化させた時のシステムの MTBF(Mean Time Between Failures)を推定する為のメタスタビリティのデータが APEX / FLEX ファミリーおよび MAX ファミリーに対して提供されています。

2 メタスタビリティとは

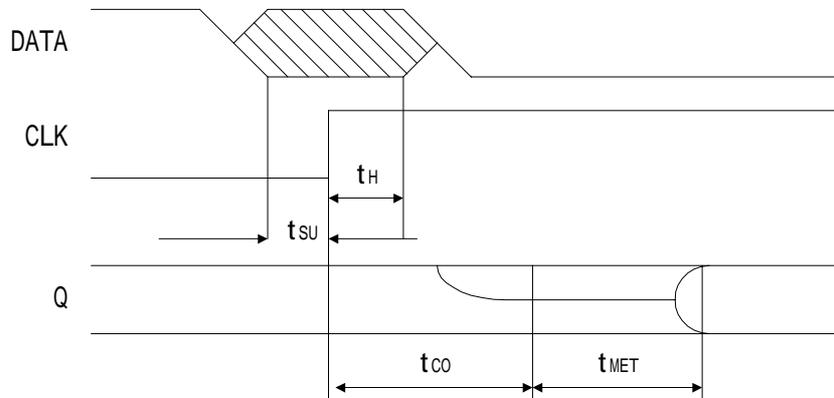
エッジ・トリガ・タイプのフリップ・フロップは、HighとLowの確定した出力を持ちます。信頼性の高い動作を確保するためには、デザインが規定されているフリップ・フロップのタイミングに適合していなければなりません。フリップ・フロップに対する入力は、クロック・エッジの前の最小期間(レジスタのセットアップ・タイム t_{su})とクロック・エッジ後の最小期間(レジスタのホールド・タイム t_H)に安定している必要があります。 t_{su} と t_H の値は各デバイス・ファミリのデータ・シートの中で規定されており、デザイン内のこれらの値は MAX+plus II および Quartus II のタイミング・アナライザを使用して得ることができます。

同期化がはかられていないシステムにおいて、非同期の入力信号がフリップ・フロップのタイミング要求に違反している場合、フリップ・フロップの出力がメタステーブルの状態となります。メタステーブルの出力は発振したり、ある一定の時間に High と Low の間をふらつく状態となり、システムの故障の原因となります。この為、クロック非同期のデザインでは、デバイスのメタスタビリティ特性を解析し、回路の信頼性を判断する必要があります。同期化が実現されているシステムでは、フリップ・フロップへの入力信号が常に規定されたタイミング規格に適合する為、メタスタビリティの状態は発生しません。

3 メタスタビリティの動作

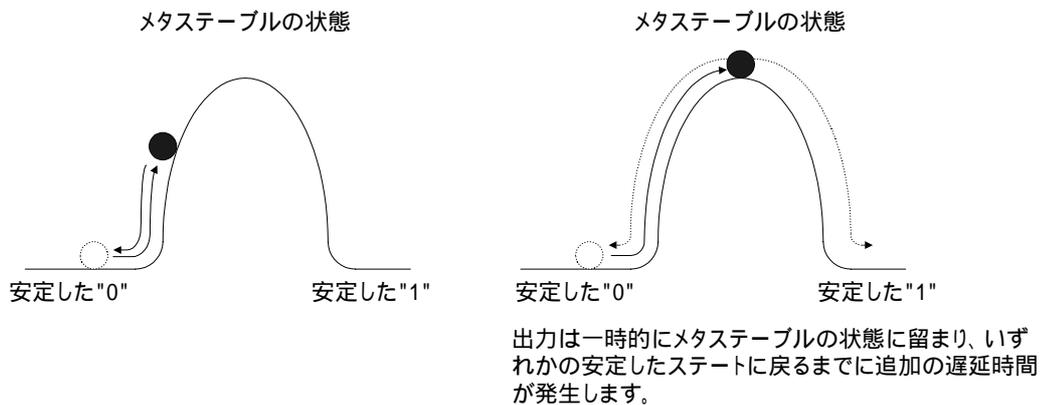
フリップ・フロップのセットアップ・タイムまたはホールド・タイムが規定値を満たしていないと、出力がメタステーブルになります。フリップ・フロップがメタステーブル(中間の値)になると、出力が High と Low の間の電圧レベルをふらつく状態となり、規定された「clock-to-output」遅延時間(t_{co})後にも出力の値が不安定になります。メタステーブルが解消され、出力が安定した状態になるまでの t_{co} 後に追加される遅延時間はセッティング・タイム(t_{MET})と呼ばれています。セットアップ・タイムまたはホールド・タイムの違反があるすべての遷移がメタステーブルになるとは限りません。フリップ・フロップがメタステーブルになり、安定した状態に戻るまでに必要となる時間は、デバイスの製造プロセス・テクノロジーと周囲条件によって異なります。一般的に、フリップ・フロップは短時間で安定したステートに戻ります。図 1 を参照してください。

図 1:メタスタビリティのタイミング・パラメータ



レジスタの動作は図 2 に示すように、ボールが摩擦の無いひとつの山を移動する状態に例えて表現することができます。この山の両側は安定した状態(HighまたはLow)を表しており、山の頂上がメタステーブルの状態を表すこととなります。フリップ・フロップへの入力が規定のセットアップ・タイム(t_{SU})とホールド・タイム(t_{H})の最小値を満足している場合は、出力が一方の安定したステートからもう一方の安定したステートに(HighからLow、又はLowからHighに)追加遅延無しで変化します。これは、ボールを押す為に十分な力が与えられると、ボールは規定時間以内にこの山を乗り越えることができると説明できます。

図 2: t_{SU} と t_{H} の違反による影響を示すモデル



一方、フリップ・フロップへのデータ入力が規定されているセットアップ・タイムまたはホールド・タイムの規定に違反している場合、フリップ・フロップが完全な形でトリガされず、出力が規定された時間内で2つの安定したステートのいずれかにすぐに遷移しなくなる可能性があります。この不適切なトリガは出力にグリッチを発生させたり、一時的に出力が High と Low の間のメタステーブル状態になり、出力が安定したステートに戻るまでの時間が長くなる原因になり、いずれの条件でもクロックの遷移から出力が安定するまでの時間が増加することになります。

メタスタビリティは、必ずしもシステムの性能の予測を不可能にする要因とはなりません。フリップ・フロップが安定した状態に戻るまでの待ち時間を十分に許容できるようになっていれば、システム性能に影響を及ぼすことはなく、フリップ・フロップの出力が一時的に不定となった場合でも、この信号は実際に使用される前に安定した状態に戻ることができます。この為、信号があらかじめ規定された値にセットリングするまでの追加時間(t_{MET})を許容させることによって、規定されていない値の信号がシステムの他の部分に伝播することを避けることができます。

4 メタスタビリティの解析

メタスタビリティがデザインに与える影響の度合いを定量的に示す値としては MTBF が使用されます。この MTBF は、2 回のメタステーブル状態が発生する可能性のある時間間隔を推定した値になります。同期化されたフリップ・フロップの MTBF は、下記の式で推定できます。

$$MTBF = \left[f_{CLOCK} \times f_{DATA} \times C1 \times e^{(-C2 \times t_{MET})} \right]^{-1}$$

Where; f_{CLOCK} = クロック周波数

f_{DATA} = データが変化する速度 (周波数)

C1 = セットアップ・タイム違反時間におけるメタスタビリティ発生率を表す定数

C2 = メタステーブル状態が解除されるスピードを表す定数

注 この公式は過去 20 年以上使用されておりその信憑性が実証されています。

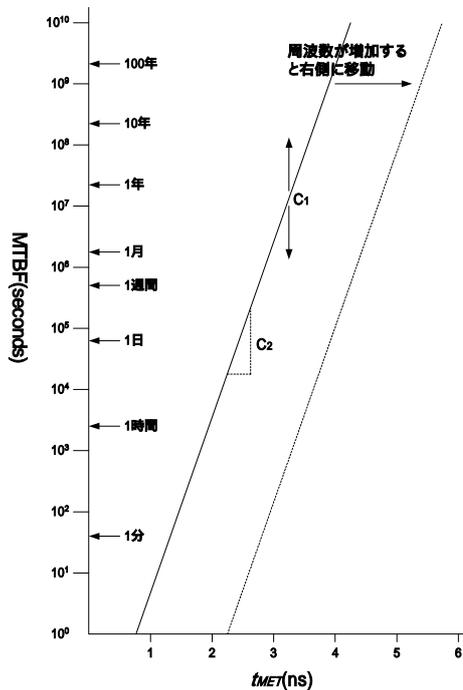
ここで、 t_{MET} のパラメータは、システムで許容されるフリップ・フロップを安定した状態にセットリングさせる為の追加時間です。C1 と C2 の定数はデバイスの製造プロセス・テクノロジーによって異なります。同じプロセスの製造に使用されたデバイスであればタイプが異なっても C1 と C2 の値はほぼ同じような値になります。

C1 と C2 の値は、 t_{MET} に対する MTBF の値を自然対数でプロットし、データの線形回帰解析を行うことによって得ることができます。この結果から得られた直線の傾きと y 軸の切片の値によって、C1 と C2 の値が決定されます。C1 と C2 の定数の値を算出する式は、下記のようになります。

$$C1 = \frac{e^{(-C2 \times t_{MET})}}{MTBF \times f_{CLOCK} \times f_{DATA}} \quad C2 = \frac{\Delta \ln(MTBF)}{\Delta t_{MET}}$$

図 3 に MTBF と t_{MET} の関係と、各パラメータがシステムに与える影響を示しています。

図 3: MTBFと t_{MET} の関係



C1 の値はMTBFの計算式に対してリニアな変化を与え、全体のカーブを上下に変化させます。一方、C2 の値は t_{MET} に対するMTBFのカーブの傾きに影響を与えます。動作周波数を上げることによって、全体のカーブは右側にシフトし一定のセットリング・タイムにおけるMTBFが低下します。

特定のデバイスのC1 とC2 の値が決定されていれば、MTBFの計算式から、ある一定のセットリング・タイム(t_{MET})を持ったシステムのMTBFが計算できます。 t_{MET} はフリップ・フロップが安定した状態に戻るまでに必要となる遅延時間であるため、システムの最小クロック期間と実際のクロックの期間は異なることとなります。また、あるMTBFの値を確保する為に必要となる t_{MET} の算出には下記の式が使用できます。

$$t_{MET} = \frac{\ln(MTBF \times f_{CLOCK} \times f_{DATA} \times C1)}{C2}$$

5 ALTERA デバイスのメタスタビリティ特性

ALTERAデバイスの t_{MET} の計算に使われるパラメータを表1に示します。

表1 メタスタビリティの計算式に使用される定数の値		
デバイス名	C1	C2
FLEX10K	1.01×10^{-13}	1.268×10^{10}
FLEX8000	1.01×10^{-13}	1.268×10^{10}
FLEX6000	1.01×10^{-13}	1.268×10^{10}
MAX9000	2.98×10^{-17}	5.023×10^9
MAX7000	2.98×10^{-17}	5.023×10^9

6 メタスタビリティの計算例

表1に示されているC1とC2の値を使用して、一定のセットリング・タイムに対するMTBFに対する最小のセットリング・タイムを計算することができます。例えば、下記の式は2MHzのデータ周波数、10MHzのクロック周波数で動作するEPF8452Aに対して1年のMTBF(約 3×10^7 秒)を確保するために必要な t_{MET} を計算したものです。

$$t_{MET} = \frac{\ln(3 \times 10^7) + \ln[(10 \times 10^6)(2 \times 10^6)(1.01 \times 10^{-13})]}{1.268 \times 10^{10}} = 1.41 \text{ ns}$$

一年のMTBFが要求される場合は、同期をとるフリップ・フロップの「clock-to-output」遅延(t_{CO})に1.41nsを加える必要があります。 t_{MET} とMTBFの関係は指数関数となっているため、 t_{MET} の小さな変化がMTBFに大きく影響することになります。上記の例で、MTBFの要求が1年から10年に増大した場合、 t_{MET} は1.59ns増加します。

7 メタスタビリティの回避策

7-1 同期用フリップ・フロップの使用

単一信号を同期化するには、非同期入力信号とシステム・クロックとを同期化するために、その信号と後段ロジックとの間に同期化フリップ・フロップを複数挿入します。挿入されるフリップ・フロップの数によってシステムの信頼性は格段に向上しますが、挿入したフリップ・フロップの段数分だけシステムのレイテンシが増しますので、全体システムでのパフォーマンスの低下を引起します。

非同期入力信号の繰り返し周波数とシステム・クロックの周波数との差が無視できる程にある場合は1段程度で十分ですが、2つの周波数が隣接している場合は数段入れる場合もあります。図4に例を示します。

図 4: 1 段のフリップ・フロップを使用したメタステーブル回避回路

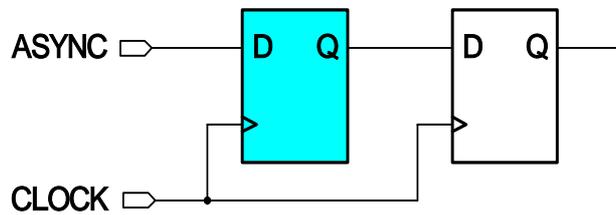


図 4 において、同期化フリップ・フロップ(前段のフリップ・フロップ)がメタステーブル出力を生成しても、その後、メタステーブル信号は 2 番目のフリップ・フロップがトリガされる前に安定する可能性が出てきます。この方法は、2 番目のフリップ・フロップが不安定出力をトリガしないという保証は有りませんが、そのデータが回路の他の部分に到達する前に有効な状態になる確率は向上します。このようにして、システムに要求される信頼性から挿入するフリップ・フロップの段数を決定して行きます。

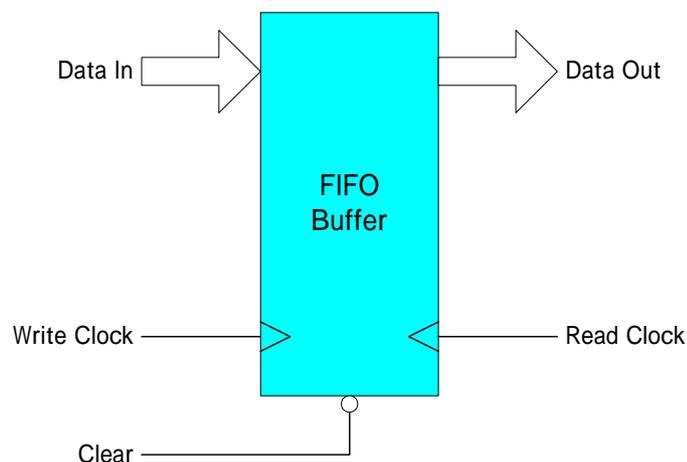
また、計算された t_{MET} 時間より大きい時間を使うことにより、メタスタビリティの影響を減じることができます。

1 本の非同期入力、複数のフリップ・フロップに供給しないでください。1 本の非同期入力を複数のフリップ・フロップに供給すると、メタステーブルの状態によるシステム・エラーの確率が増加します。これは、非同期入力信号が複数のフリップ・フロップに入力された場合、接続されたフリップ・フロップ毎に異なる状態になる可能性があり、システム上一義的な状態定義ができなくなります。このような場合は、同期化フリップ・フロップを入れ、システム上一義的な状態定義をした後の出力を後段フリップ・フロップやロジックに供給してください。

7-2 FIFO バッファの使用

データ・バスなどの複数ビットの入力を同時に同期化するためには、FIFO(First-In First-Out)バッファを使用します。図 5 にその概略図を示します。

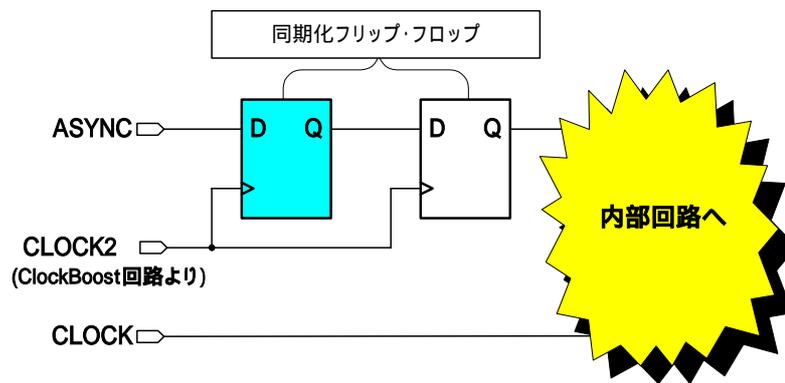
図 5: FIFO バッファを使用したメタステーブル回避回路



7-3 同期化によるレイテンシの増加を克服

メタステーブルを回避するための同期化フリップ・フロップを挿入することによる欠点は、非同期入力の場合に比べてレイテンシが増加することです。この問題を回避する方法として、同期化のためのフリップ・フロップ用クロックとして ClockBoost の出力を 2 倍にして使うことです。この方法により、レイテンシを犠牲にせずに MTBF を改善することが出来ます。

図 6: ClockBoostを使用してレイテンシの増加を抑えた同期化回路例



8 メタスタビリティのシステムへの影響

先にも述べたとおり、非同期入力はシステムに悪影響を及ぼします。基本的に、システム内のフリップ・フロップが一度メタステーブルの状態に陥りますと、単に不安定となるばかりでなく最悪の場合はシステム・ハングアップの状態となります。最早、電源を切る以外に復帰の方法はありません。このように、メタスタビリティの状態は、システム上からは人為的に状態定義ができません。半導体の物性のみが状態を制御できます。“神のみぞ知る”です。

特に陥り易い例は、同一クロック系システムの場合です。例えば、相互の機器が 50MHz のマスタ・オシレータで作動している機器同士での信号の授受です。このように公称同一周波数であっても、2 つのマスタ・オシレータには周波数偏差や温度係数等も異なっており、微妙に周波数は変動します。結果として、信号が相互に非同期となります。ご注意ください。

9 おわりに

システムに非同期の信号が入力されると、メタステーブルと呼ばれるシステム上予測不可能な状態に陥ります。最悪の場合、システムがハングアップし電源を切断しないと復帰しない事態を引起す場合があります。このメタステーブル現象が発生する確率は、デバイスの物性や周囲条件に依存します。

システム全体で同期化されていない機器間での信号の授受の場合には、メタステーブル状態を引起す可能性があります。従って、システム全体の信号系統を精査し、同期化システムを構築し、不安定要素を取り除くことをお勧めします。

改版履歴

Version	改定日	改定内容
1.0	2006年03月	・新規作成

参考文献

- ALTERA Application Note 42 「Metastability in Altera Devices」

免責、及び、ご利用上の注意

弊社より資料を入手されましたお客様におかれましては、下記の使用上の注意を一読いただいた上でご使用ください。

1. 本資料は非売品です。許可無く転売することや無断複製することを禁じます。
2. 本資料は予告なく変更することがあります。
3. 本資料の作成には万全を期していますが、万一ご不審な点や誤り、記載漏れなどお気づきの点がありましたら、弊社までご一報いただければ幸いです。
4. 本資料で取り扱っている回路、技術、プログラムに関して運用した結果の影響については、責任を負いかねますのであらかじめご了承ください。
5. 本資料は製品を利用する際の補助的なものとしてかかれたものです。製品をご使用になる場合は、英語版の資料もあわせてご利用ください。

本社

〒163-0928 東京都新宿区西新宿2丁目3番1号 新宿モリス 28F TEL 03-3345-6205 FAX 03-3345-6209

松本営業所

〒390-0815 長野県松本市深志1-1-15 朝日生命松本深志ビル 1F TEL 0263-39-6134 FAX 0263-39-6135

大阪営業所

〒532-0003 大阪市淀川区宮原3丁目4番30号 ニッセイ新大阪ビル 17F TEL06-6397-1090 FAX06-6397-1091

名古屋営業所

〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅3丁目11番22号 IT名駅ビル 4F TEL 052-566-2513 FAX 052-566-2514