高速デジタル信号の高精度測定のための オシロスコーププローブの使い方

岡崎 淳起*

Oscilloscope Probes for High-Integrity Measurement of High Speed Digital Signal

Atsuki OKAZAKI*

*アジレント・テクノロジー株式会社アプリケーション・エンジニアリング部 (〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1 八王子事業所)

*Application Engineering Organization, Agilent Technologies (Hachioji Site, 9-1 Takakura-cho, Hachioji-shi, Tokyo 192-8510)

1. 高速デジタル信号の高精度測定のカギ「プローブ」

入出力インターフェイスのシリアル化に伴い、信号の伝送速度は高速化の一途をたどっている。デジタル信号が高速化すればするほど、信号品質に対する要求は厳しいものとなり、不適切な基板実装や配線の1つが、信号を大きく歪ませてしまう原因となる。このことは、測定についても同じことが言える。信号に含まれる周波数成分が1GHzを超えるような高速デジタル信号の測定では、不適切な測定1つが観測信号を大きく歪ませてしまい、誤った測定の原因となる。デジタル信号の信号品質を評価する際、オシロスコープを使って評価することになるが、そこで特に注意が必要となるのが、オシロスコープのプローブの選択と使い方である。

不適切なプローブの選択や使い方は、本来の波形を歪ませ、オシロスコープに表示させてしまう。問題はそれだけではなく、プローブが被測定回路に対して、大きな負荷となることで、回路動作に影響を与えてしまうことがある。例えば、プローブを接続すると、回路が誤動作・停止する現象が生じる。本稿では、オシロスコープのプローブを使った信号品質評価において、不適切なプローブの選択と使い方が与える影響と原因について論じ、その解決策を述べる。

2. プローブの理想と現実

オシロスコープのプローブを使って測定をする際、プローブは被測定波形・回路に、多かれ少なかれ、何らかの影響を及ぼす。「波形を全く歪ませないこと」や、「被測定回路への負荷が0であること」は、理想であって、現実ではありえない。実際には、プローブの特性を理解し、所望の測定に対して、プローブの影響を十分に小さくすることが重要になってくる。

プローブ測定における注意点を把握するため、「プローブの理想と現実」を以下に記した。

理想①「測定した信号を歪ませることなく、忠実にオシロスコープに入力すること」

これを言い換えるならば、「プローブの伝送特性が、信号の周波数帯域においてフラットであること」である。しかし、現実には、プローブには周波数帯域があり、帯域不足のプローブを選択した場合、帯域外の高周波数成分は減衰する。信号をできるだけ忠実にオシロスコープに入力するには、測定信号がもつ周波数成分に対して、十分に広くフラットな帯域をもつプローブを選択する必要がある。1GHz以上の周波数成分をもつ高速デジタル信号の測定においては、広帯域プローブの選択が必要不可欠で、一般的にはアクティブプローブ¹⁾が使用される。例えば、立ち上がり時間の測定誤差を3%以内に抑えるような高精度測定には、プローブの周波数応答特性にも依存するが、信号に含まれる最大周波数に対して、1.4倍以上の帯域をもつアクティブプローブが望ましい。

理想②「プローブの接続が被測定回路に影響を与えないこと」

これを言い換えるならば、「プローブの入力インピーダンスが信号の周波数帯域において無限大であること」である。しかし、現実には、プローブの入力インピーダンスは有限で、必ず被測定回路の負荷となる。信号の周波数帯域において、プローブの入力インピーダンスが、被測定回路の信号源インピーダンスに対して十分高ければ、負荷の影響は小さく無視できる。しかし、プローブの入力インピーダンスが、被測定回路に対して近い場合、プローブは大きな負荷となる。インピーダンスが近いことで、被測定回路に流れていた信号の一部がプローブ側に流れこみ、本来の被測定回路に流れていた信号は減衰する。この影響が大きくなると、プローブを接続したことによって、回路が誤動作したり、停止したりすることがある。プローブの入力インピーダンス特性を把握し、被測定回路に対して、常に十分高いインピーダンスを保つことが重要である。例えば、プローブ接続の負荷による信号振幅への影響を10%以内に抑

図1. リード線を付加してのプローブ接続の例

図2-a. プローブの等価回路

図2-b. 入力インピーダンスの周波数特性

えるという意味では、プローブのインピーダンスを、被測定回路に対して、10倍以上に保つ必要がある。

理想③「どんな場所でもプロービングできること」

プローブの形状など物理的制限から、被測定回路にプロービングできない問題がある。その場合、プローブに付属するアクセサリを使って、もしくは、プローブの先端にリード線を信号線として付加して、プロービングを行うことがある。(図1は、リード線を付加して、接続を行っている一例である。)しかし、それらの接続方法が、観測に大きな影響を及ぼす可能性がある。接続部に付加されたアクセサリやリード線は、余分なインダクタ成分を付加し、高周波数領域でプローブの帯域やインピーダンス特性を劣化させてしまう。高速デジタル信号の測定では、高い周波数成分を含むために、その影響を特に受けやすくなる。接続部を含めたプローブの特性を理解し、所望の測定にとって、十分な特性かどうかを見極める必要がある。

3. プローブの入力インピーダンス¹⁾

プローブの特性を理解するため、プローブの入力インピーダンスについて議論する。図2-aはプローブの代表的な等価回路モデルである。この図のように、プローブには抵抗、容量、インダクタ成分が存在する。図2-bは、プローブの入力インピーダンスの周波数特性を示している。周波数が低い領域では、抵抗成分の影響が支配的であり、プローブの入力インピーダンスは大きい。パッシブプローブ⁺を例にとると、抵抗成分は1MΩ~10MΩ程度である。被測定回路の信号源インピーダンスがこの値より十分に低ければ、低周波数領域におけるプローブの影響は、ほとんどないことが期待できる。ところが、信号周波数が高くなるにつれ、容量成分の影響が顕著になり、プローブの入力インピーダンスは低下し始める。この領域では、信号の立ち上がり時間や伝播時間が長くなる現象が起こる。1GHzを超えるような高周波数領域においても、高いインピーダンスを保ち続け、プローブが低負荷であるためには、容量の小さいプローブであるアクティブプローブを選択する必要がある。さらに高い周波数領域になると容量成分に加えて、インダクタ成分の影響が顕著に現れる。この領域では、容量成分とインダクタ成分によって、共振現象⁺が起こり、

共振周波数の近傍では、プローブの入力インピーダンスが極端に低下する。共振周波数付近では、プローブの入力インピーダンスが被測定回路に対して、十分に高い値を保てないため、プローブは大きな負荷となり、測定に大きな影響を及ぼすことになるので、共振現象には特に注意が必要になる。

4. プローブの接続部の問題と帯域内における共振現象²⁾

プローブの共振点は、通常、プローブの帯域外に存在する。よって、測定信号に対して十分に広い帯域をもつプローブであれば、共振現象の影響は受けず、それによる問題は生じることはない。しかし、プローブの接続部にアクセサリやリード線を付加する(図1参照)と、帯域外に存在していたはずの共振現象が帯域内で現れ、被測定回路や測定に大きな影響を与えることがある。

図3-aは、帯域2.5GHzのアクティブプローブの先に、5cmのリード線を付加したプローブの入力インピーダンスの周波数特性を示している。この図から、帯域内である750MHz付近で、インピーダンスが約15Ωまで落ち込む共振現象が確認できる。これは、5cmのリード線を付加したことによって、プローブに余分なインダクタ成分が加わり、2.5GHzの外に存在していた共振点が、低周波数の750MHzに寄ってしまったからである。このプローブを使用した場合、750MHz付近の信号には、プローブは15Ω程度の低いインピーダンスにみえ、信号の一部がプローブに流れ込む。このことで、本来回路に流れていた信号は減衰する。同時に、共振周波数付近の信号がプローブ側に流れ込むことに

図3-a. リード線を付加したプローブのインピーダンスの周波数特性

図4-a. ダンピング抵抗を付加したプローブのインピーダンスの周波数特性

図3-b. リード線を付加したプローブの伝送特性

図4-b. ダンピング抵抗を付加したプローブの伝送特性

より、その信号の振幅が強調されてオシロスコープに出力される。特定の周波数のみが強調されることにより、オシロスコープではオーバーシュート成分として観測されてしまう。

図3-bは、このプローブの入力／出力電圧の伝送特性を示している。入力電圧の伝送特性（プローブを接続したときの被測定回路に流れる信号の伝送特性）から、750 MHz付近で、約9 dBの減衰が起きていることがわかる。一方、出力電圧の伝送特性（プローブを通過し、オシロスコープの入力チャンネルに出力される信号の伝送特性）から、750 MHz付近の信号が約15 dB、強調されていることがわかる。

このように、共振周波数付近では、インピーダンスを高く保てないため、本来回路に流れていた信号が減衰される現象と、オシロスコープの入力チャンネルへ出力される信号が強調される現象が、同時に起こる。信号が減衰される影響が大きいと、回路の動作に影響する場合がある。また、強調された信号はオーバーシュートとして観測され、歪んだ波形が観測されてしまう。

図3-bの低周波領域での伝送特性を見るとわかるように、低周波領域であれば、信号の減衰・強調は見られない。すなわち、測定信号の周波数成分がこの領域に収まるような、低速信号測定では問題にならないと言える。しかし、高速信号測定では、測定信号に高周波成分が多く含まれるため、共振現象の影響を受けるケースが多くなる。

5. インピーダンスの落ち込みを抑制するダンピング抵抗の直列挿入²⁾

上述のように、プローブの物理的制限でプロービングできないとき、プローブのアクセサリやリード線を付加してプロービングすることがある。しかし、それらは余分なインダクタ成分として付加され、帯域内に共振現象を起こしてしまう可能性がある。そこで、帯域内の共振現象の影響を緩和する方法として、ダンピング抵抗の直列挿入がある。一般的にダンピング抵抗の技術は、終端技術の1つで、回路の波形品質を向上させるための技術である。これをプローブの接続部に応用し、接続部の最先端にダンピング抵抗を直列に挿入する。このことにより、ダンピング抵抗値分のインピーダンスが補償され、共振周波数付近におけるインピーダンスの激しい落ち込みを緩和することができる。

図4-aは先ほどと同じプローブだが、リード線の末端に215 Ωのダンピング抵抗を直列挿入したときの入力インピーダンスの周波数特性を示している。この図から、共振点においても、230 Ωのインピーダンスを保っていることがわかる。図4-bは、その伝送特性だが、共振周波数付近においても、入力電圧の伝送特性がほぼフラットとなっており、さきほどの図3-bと比較して、本来回路に流れていた信号の減衰が抑制されていることがわかる。出力電圧の伝送特性からも、オシロスコープに出力される信号が共振点付近においても、強調を受けていないことがわかる。

このように、ダンピング抵抗の挿入によって、帯域内の共振周波数付近における著しいインピーダンス低下を緩和することができる。ダンピング抵抗の最適値は、一般的には80~250 Ω 程度で、プローブ本体と接続部を含めた等価回路モデルから算出される。しかし、プローブの等価回路モデルが公開されているケースは少なく、またアクセサリやリード線の部分を等価回路化することは困難であるため、算出は難しい。そこで、次節で示すプローブ特性の評価方法で、80~250 Ω で適当な値を試しながら、最適化する方法がある。

また、最近のプローブの中には、あらかじめ最適化されたダンピング抵抗が実装され、接続部を含めた帯域を明示しているプローブもある³⁾。しかし、プローブの接続部を含めた帯域の仕様を明示していない場合がほとんどで、これらのプローブを使用する際は、接続部を含めたプローブの性能をユーザ自身が特性を評価し、把握する必要がある。(プローブの実力を評価する方法については、次節で説明する。)

また、帯域内の共振現象の問題は、そもそもプローブの物理的制限によってプロービングができない問題が発端になっている。最近のプローブでは、物理的にプロービングできない問題を解決するため、接続性に富んだデザインが施されたプローブ⁴⁾もあり、そのようなプローブを使用することも、接続部の問題の解決策の1つといえる。

6. プローブの性能の評価方法⁵⁾

アクセサリやリード線を付加したプローブを使用する際、接続部であるアクセサリやリード線を含めたプローブの特性を把握する必要があることは述べた。ここでは、プローブの特性を評価する方法について説明する。

必要なものは、オシロスコープ、プローブと信号源、特性インピーダンス50 Ω ケーブルとマイクロストリップライン基板である。より実測環境に近い条件での評価をするため、信号源は実回路に流れている信号に近いもの、特に周波数と立ち上がり/下がり時間が同程度の信号を出せる信号源が望ましい。それが用意できない場合、高速信号としてオシロスコープのプローブ校正信号の立ち上がりエッジも代用できる。一般的に、オシロスコープのプローブ校正信号の立ち上がりエッジは、そのオシロスコープの仕様にて観測できる範囲の十分に早い立ち上がりをもち、高周波数成分を含む。すなわち高速な信号とみなすことができる。

接続図を図5-aに示す。オシロスコープのチャンネル1に、信号源(プローブ校正信号)、50 Ω マイクロストリップライン基板、50 Ω ケーブルの順で接続する。マイクロストリップライン基板に、評価したいプローブを接触させ、そのプローブの特性を評価することになる。まず、プローブを接続する前のチャンネル1を観測することで、「①プローブの影響のない本来の信号」が観測される。これは、

図5-a. プローブの実力評価の測定系

図5-b. 50 Ω マイクロストリップラインとプローブの接続

実際の測定環境では観測できない回路に流れる本来の信号となる。次に、別のチャンネルに(図ではチャンネル2)評価したいプローブを接続し、マイクロストリップライン基板にプローブを接触させる。このとき、チャンネル1で観測される信号は「②プローブが接触したことで影響を受けた回路に流れる信号」になる。これを、①の波形と比較することで、プローブの接続で、本来の信号がどのような影響を受けたかを検証できる。最後に、プローブを接続したチャンネルを表示させ、「③プローブを通過した信号」を観測する。これを②と比較することで、プローブに入力された波形が、プローブ通過後、どれほど変形をされたかを検証できる。

理想的な状態は、①と②と③の波形は完全に一致することである。つまり、プローブを信号線に接触させても本来の信号に影響を与えず(①と②の信号波形が一致)、かつプローブが入力波形を変形させない(②と③の信号波形が一致)ことである。しかし、現実の測定においては、プローブのインピーダンスが有限で、周波数帯域をもつために、①、②、③の波形が完全には一致しない。実際には、①と②、②と③の波形比較から、所望の測定に対して、十分に波形が一致しているかどうかを評価することになる。

評価の一例として、先ほどの5 cmのリード線を付加した2.5 GHzのアクティブプローブを評価した。信号源としては、立ち上がり250 psで周期66 MHzのクリーンなクロック信号を使用した。この信号は、周期は66 MHzとそれほど高速ではないが、250 psの立ち上がり時間をもち、高い周波数成分をもつ信号となり、高速信号である。図6は測定

図6-a. ダンピング抵抗なしのプロープの実力評価結果

図6-b. ダンピング抵抗有りのプロープの実力評価結果

結果を示しており、リード線の先にダンピング抵抗を付加したプロープとダンピング抵抗がないプロープの各波形を示している。ダンピング抵抗がないプロープでは、②において、立ち上がり/下がりエッジ付近で減衰がみられ、③において、オーバーシュートが大きく起きていることがわかる。これでは、立ち上がり時間が250psで66MHzクロック信号に対して、十分な性能をもっているとは言いがたいことがわかる。ダンピング抵抗が付加されたプロープでは、②、③ともに波形が良く一致し、立ち上がり時間が250psで66MHzクロック信号には十分な特性であることが確認できる。

7. まとめ

オシロスコープのプロープを使用する測定において、プ

ロープを適切に選択・使用することは、被測定回路に対して影響させず、波形を忠実に測定するうえで重要なカギとなる。高い周波数成分を含む高速信号の測定では、接続部におけるアクセサリやリード線の付加による、帯域内での共振現象が問題になるケースが多いので、特に注意が必要である。接続部を含めたプロープの特性を把握し、プロープがどれほど回路に影響し、どれほど忠実に変形させることなく測定しているかを把握することが重要である。

(2006.6.1-受理)

参考資料 (アジレント・テクノロジーのwebページよりダウンロード可)

- 1) Optimizing Oscilloscope Measurement Accuracy on High-Performance Systems with Agilent Active Probes (Application Note 1385)
- 2) 広帯域プロープのシグナル・インテグリティに関する真実 (Application Note 1404)
- 3) Time-Domain Response of Agilent InfiniiMax Probes and 54850 Series Infiniium Oscilloscopes (Application Note 1461)
- 4) Infiniium 80000B シリーズ・オシロスコープ InfiniiMax シリーズ・プロープ (Data Sheet)
- 5) 高速信号を正確に測定するためのプロープ性能の検証方法 (Application Note 1419-01)

＋用語解説

アクティブプロープとパッシブプロープ：アクティブプロープは、増幅器を内蔵しており、電源を必要とするプロープ。入力容量が小さく、広い周波数帯域を備えており、高速信号測定に広く使われる。パッシブプロープは、電源を必要としない受動型のプロープ。安価で丈夫であるため、汎用性に優れているが、アクティブプロープに比べて、入力容量が大きく、周波数帯域も狭い。

共振現象：インダクタ成分とキャパシタ成分が存在する回路において、特定の周波数において、両者のインピーダンス値が相殺される現象。