

プローブを使用した発振器の出力波形の計測方法

1	はじめに.....	2
2	SiTime 評価基板でのプロービング.....	2
3	システム内プロービング.....	4
3.1	被試験信号へのプローブの影響.....	4
3.1.1	アクティブプローブ.....	4
3.1.2	パッシブプローブ.....	4
3.2	ロングワイヤーおよびアースインダクタンス.....	5
3.3	適正なプロービング例.....	10
3.4	Noise pick-up.....	11
3.5	プロービングを行う際の助言.....	12
4	よくある間違い.....	13
4.1	プローブの帯域幅および入力静電容量が適切でない.....	13
4.2	プロービングに使用するロングワイヤー.....	13
4.3	被試験信号に接続されたスタブ.....	14
4.4	オシロスコープのサンプリングレートが低すぎる.....	14
5	参考資料.....	15

1 はじめに

設計エンジニアは、単純な低速デジタル信号のチェックから正確な波形やジッタの計測にいたるまで、様々な目的によくオシロスコープを使用します。彼らは、直接 PCB の任意信号にアクセスするためにプローブを使用する必要があります。但し、プローブ自身が信号に過剰な負荷をかけたり、スコープ上に表示される波形を歪めたりする可能性があります。したがって、プローブを使用した計測は慎重に行う必要があります。

本アプリケーションノートは、発振器出力の効果的にプローブを使用するための実用的な指針や、よくある間違いを示し、潜在的な問題をどのように特定・回避するかを説明します。

2 SiTime 評価基板でのプロービング

評価基板は、発振器の性能を試験するための素晴らしいツールです。入念に設計され、試験され、計測用のテストピンがあります。しかし、プローブの使用技術や計測技術が不適切であれば評価結果が不正確になることがあります。

SiTime 評価基板にハンダ付けした SiT8208 10MHz MEMS 発振器の波形計測結果を図 2.1 に示します。2つのアース接続オプションを使用し、1.5GHz 帯域幅で静電容量が 1pF 未満のアクティブプローブのある理想計測値と、10M Ω の入力インピーダンスで静電容量が 16pF のパッシブプローブでの計測値を比較しています。パッシブプローブで計測した立ち上がり時間は、アクティブプローブで計測したものよりも大きいことが分かります。

また、パッシブプローブのアースがリングング、オーバーシュートおよびアンダーシュートをもたらし、さらに立ち上がり時間を増加させていることも分かります。

パッシブプローブの回路(図 2.2)を使って、計測結果を説明します。グラウンドループの自己インダクタンス (L) はループ面積に依存します(例では 200nH です)。16pF の入力静電容量および 25 Ω の発振器出力抵抗 (R_s) と共に、約 90MHz において 13dB の共振ループを形成します。共振は、速い立ち上がり/立ち下がリエッジの後に過度のリングングをもたらします。

アースを取り除き、probe collar で SMA に触れると、アースループ面積の減少により L が減少し、結果としてリングングが除去されます。

プローブ入力モデルの周波数応答には、共振周波数後に -40dB/dec のロールオフがあるので、グラウンドループの自己インダクタンスの増加はプローブ帯域幅を制限します。信号の立ち上がり時間の計測値が次式で計算されるため、これは不可欠です。

$$T_{Rise} = \sqrt{T_{Scope}^2 + T_{Probe}^2 + T_{Signal}^2} \quad (1)$$

これにより、低帯域幅のパッシブプローブで計測した立ち上がり時間が何故 1.5GHz のアクティブプローブで計測したものよりも高いかがわかります。

アクティブプローブは、パッシブプローブで経験する多くの問題を解決します。アクティブプローブは高帯域幅であり、通常 1pF 未満の入力静電容量があります。高度な接地用アクセサリは、グラウンドループの大きさを最小限にするのに役立つアクティブプローブ用に設計されています。また、アクティブプローブの入力静電容量は通常パッシブプローブの入力静電容量よりもかなり低いいため、同じグラウンドループの大きさに対して共振が少なくなります。

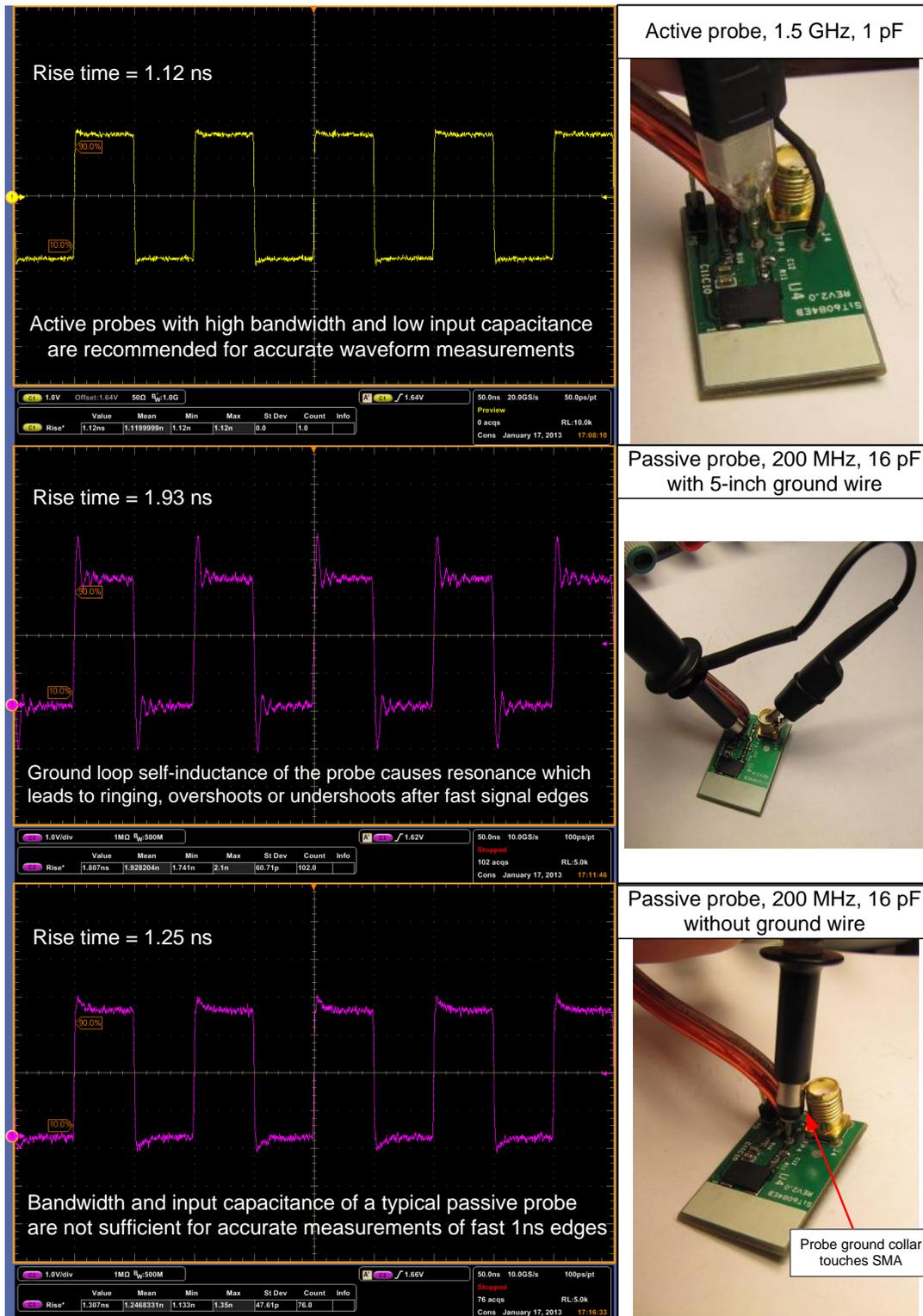


Figure 2.1: Probing on an evaluation board: Tektronix DPO7104 1-GHz oscilloscope using active probe, passive probe with ground loop, and passive probe without ground loop

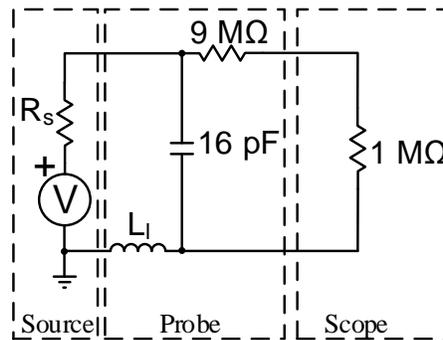


Figure 2.2: Model of a typical passive probe

3 システム内プローピング

デバッグおよび性能検証は、製品設計における共通段階であり、システムでの様々な信号の計測にかかわり、正確なオシロスコープの計測値を必要とするため、プローブ技術には細心の注意を払う必要があります。

3.1 被試験信号へのプローブの影響

すべてのプローブは、テストポイントに接続した外部回路として機能します。それ自体に入力静電容量および抵抗があるため、回路に追加の負荷をかけます。したがって、アクティブおよびパッシブプローブの被試験信号への影響を考慮することが重要です。

3.1.1 アクティブプローブ

アクティブプローブは通常高帯域幅であり、入力静電容量が低く、クロック信号の計測には望ましい選択です。アクティブプローブの入力静電容量は 0.3pF から 8pF までです。通常の発振器には、15pF の出力負荷定格があるため、1pF 以下のアクティブプローブを選択することを推奨します。

アクティブプローブの入力抵抗は、プローブモデルによって 30kΩ から 10MΩ まで変動します。SiTime 発振器には非常に低い出力インピーダンスがあるため、このプローブ抵抗でも出力波形の計測が可能ですが、入力抵抗は高インピーダンスソースをプローブする場合の重要ファクターになる可能性があります。

3.1.2 パッシブプローブ

100~300MHz の帯域幅および 10~17pF の入力静電容量のパッシブプローブが最も一般的です。当該プローブは、発振器出力に過剰な負荷をかけます。例を挙げると、発振器出力のシステム内負荷が 12pF の場合、12pF の入力静電容量のパッシブプローブを使用すれば負荷が倍増します。このように 24pF の負荷は 15pF の発振器負荷定格を超えています。当該プローブで計測した出力パラメータ（特に立ち上がり時間）は、データシートの仕様を満たさない可能性があります。発振器出力信号が 16pF のパッシブプローブを使用することによってどのような影響を受けるかを図 3.1 に示します。

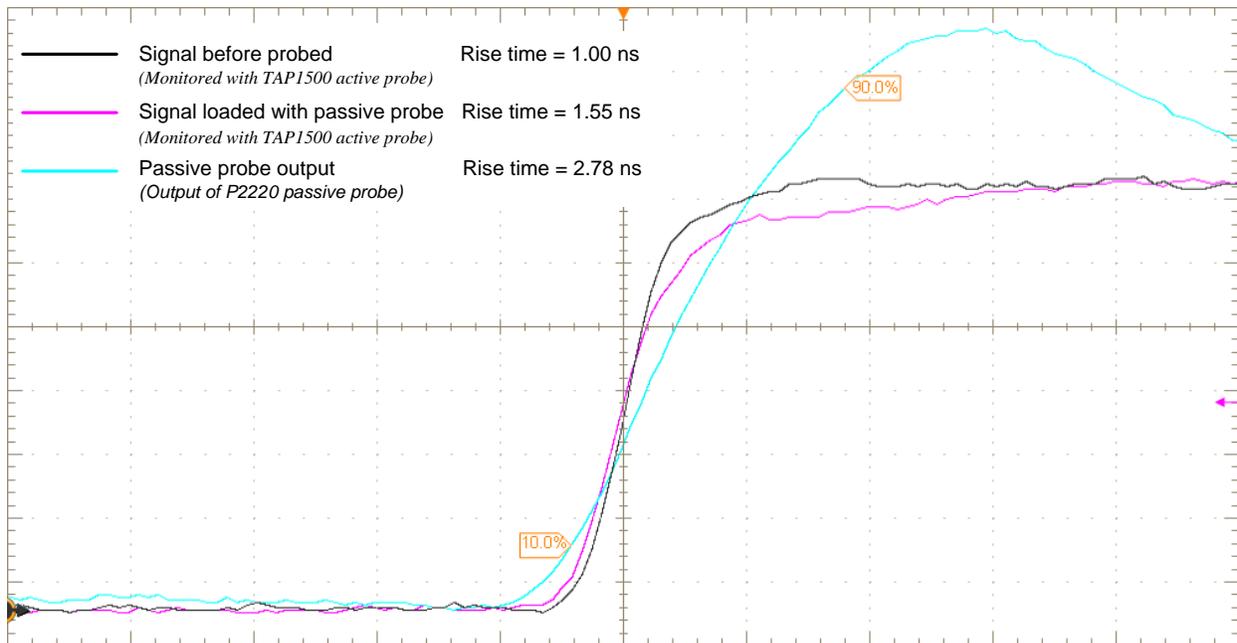


Figure 3.1: Impact of 16 pF passive probe input capacitance on the signal under test. Test signal is monitored with a high performance active probe before and after connecting a passive probe. Captures made with Tektronix DPO7104 1-GHz oscilloscope.

最もよく見られるパッシブプローブは、データシートに定められている $1\text{M}\Omega$ または $10\text{M}\Omega$ の入力抵抗があります。これらのパッシブプローブは、 $1\text{M}\Omega$ の入力スコープで使用されることを想定されており、 $1\text{M}\Omega$ の終端抵抗が考慮されています。これは、図 2.1 に示すように、 $10\text{M}\Omega$ のプローブ抵抗が $9\text{M}\Omega$ であることを意味しています。 $1\text{M}\Omega$ の入力スコープに接続している場合、ループの全抵抗は $10\text{M}\Omega$ であり、結果として生じる分圧比は 10:1 です。

$10\text{M}\Omega$ のプローブを 50Ω の入力スコープに接続している場合、スコープ上で信号は目視できません。 50Ω のスコープ終端と $9\text{M}\Omega$ のプローブ抵抗は、計測可能範囲を超えてスコープアンプへの入力を減衰させる分圧器を形成します。

3.2 ロングワイヤーおよびアースインダクタンス

計測点に近いアース接続点を見つけることは難しい場合があるので、最も便利なアース端子に届くようにロングワイヤーを時々使用します。これは、第 2 項で述べたように、速い信号エッジの後にリングング、オーバーシュートおよびアンダーシュートをもたらす大きなグラウンドループを生じさせます。図 3.2 では、波形計測へのアースの長さの影響を示すためにパッシブプローブを使用しています。より低い入力静電容量のプローブを使用することにより、共振を低減させます。 1pF のアクティブプローブと共に使用する同じ長さのアースの波形への影響がかなり少ないことを図 3.3 に示します。

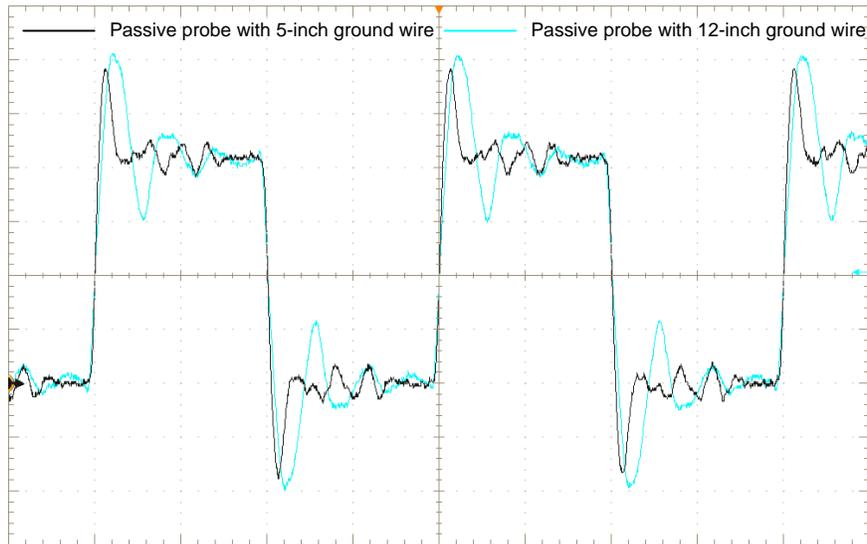


Figure 3.2: Ground wire length impact on the waveform measurements with passive probe. Longer ground wire increases ringing after fast signal edges. Oscilloscope: Tektronix DPO7104. Passive probe: Tektronix P2220 in 10 MΩ mode connected to 1 MΩ input.

高温および低温試験の間、エクステンションワイヤーを使用してプローブに接続することが便利です。しかし、このアプローチには、隣接回路からのノイズピックアップ（第 3.4 項参照）や、帯域幅の低減、リングング、オーバーシュートおよびアンダーシュートをもたらすループの大きな自己インダクタンスを含む、いくつかの欠点があります。ワイヤーを移動させる時にループ面積が変わり、波形が変わります。2 つの異なるワイヤー位置のある 22 インチのワイヤーを使用することで発生した、大きなオーバーシュート/アンダーシュートを示す波形を図 3.4 に示します。信号周波数がワイヤー/プローブ共振周波数に近い場合、給電レールを超えた振幅の正弦波として波形が現れる場合があります。

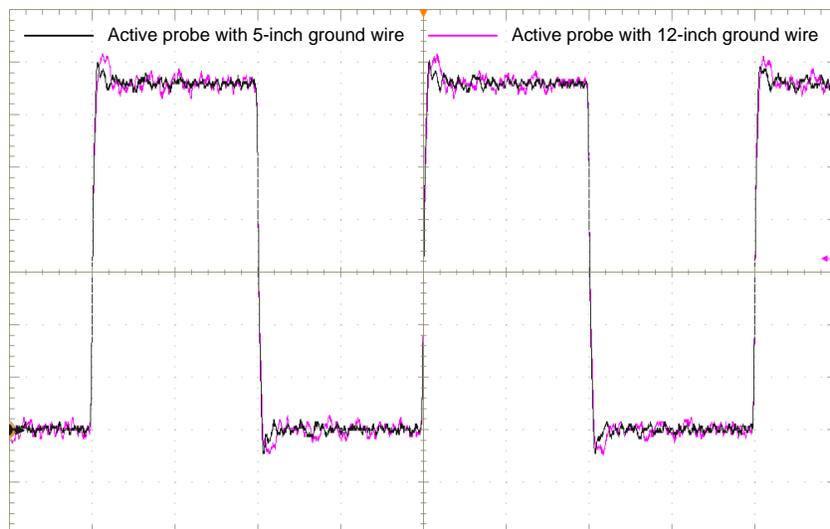


Figure 3.3: Ground wire length impact on the waveform measurement with 1-pF active probe. Low capacitance active probe is less sensitive to ground wire length. Oscilloscope: Tektronix DPO7104. Active probe: Tektronix TAP1500.

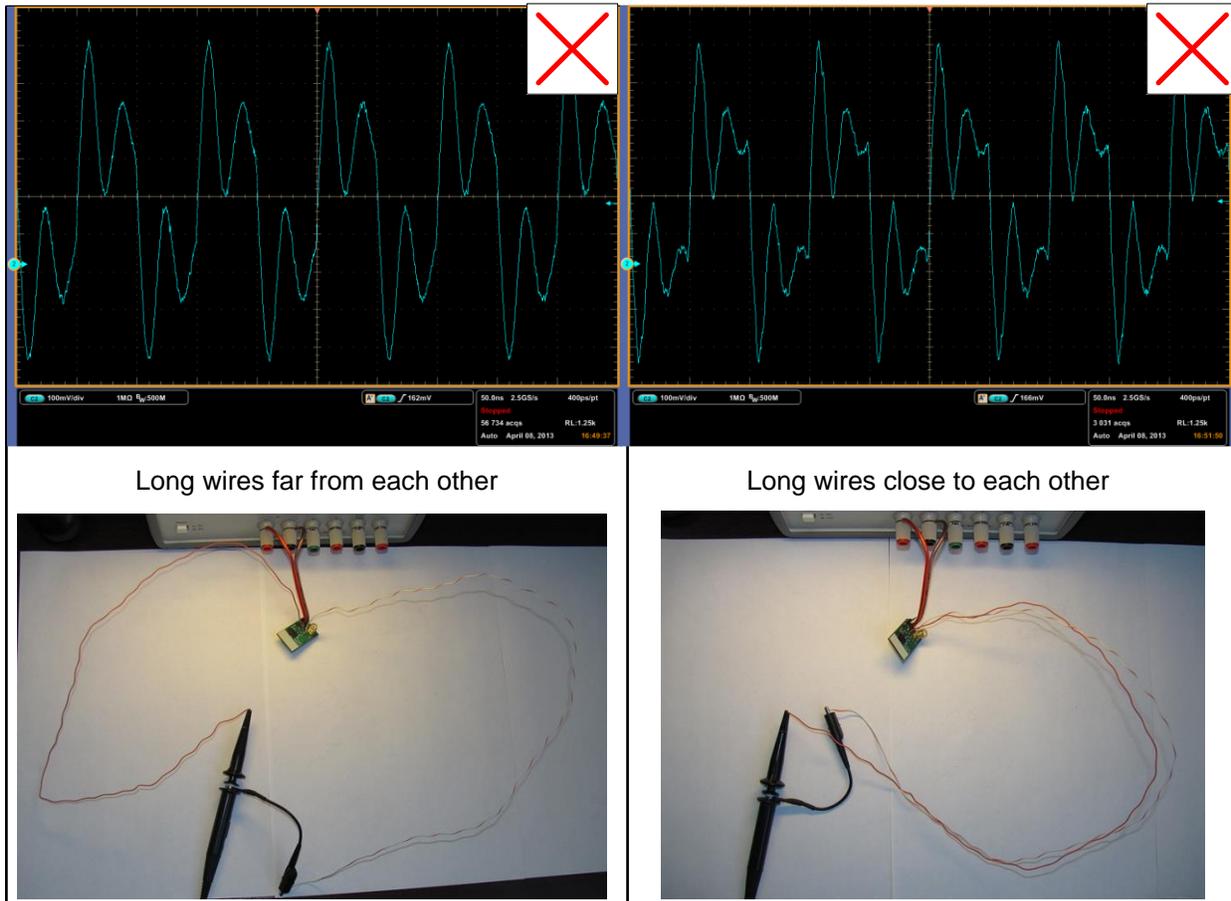


Figure 3.4: Probing 10 MHz signal under test with 22-inch wires and Tektronix P2220 passive probe in 10 MΩ mode connected to 1 MΩ Tektronix DPO7104 oscilloscope input.

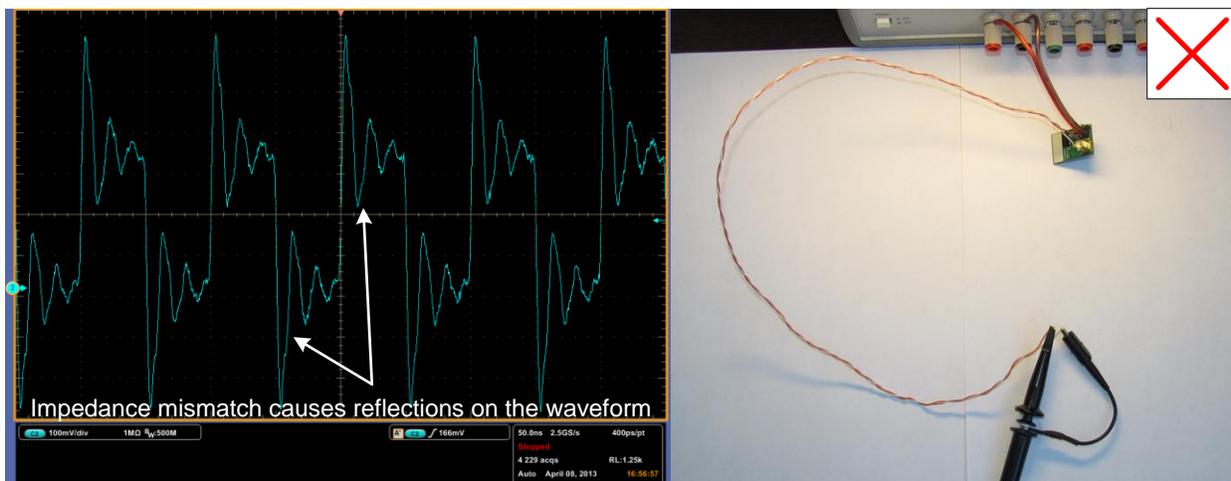


Figure 3.5: Probing 10 MHz signal under test with 22-inch twisted pair and Tektronix P2220 passive probe in 10 MΩ mode connected to 1 MΩ Tektronix DPO7104 oscilloscope input.

ワイヤーの自己インダクタンスは、例えば図 3.5 に示すようなツイストペア線等の伝送路構造を使用することによって、最小限にすることができます。そのような手作りの伝送路のインピーダンスは予測しにくく、伝送路によって変動するため、インピーダンスの不整合をもたらします。

伝送路を通じて伝わる信号は、プローブ接続点をはじめとするインピーダンス変化のすべての点から反射します。反射は信号と重畳し、計測波形を歪めます。反射を低減させるため、プローブとワイヤー間の接続点の負荷終端として、信号とアースとの間に 50Ω の抵抗を用いることができます（図 3.6）。ソースインピーダンス整合をより良くし出力電流を低減させるには、DUT 出力に直列接続した別の 20Ω の抵抗を用いることもできます。ツイストペア伝送路アプローチにおける信号品位問題は非常に排除しにくいので、この方法は推奨しません。

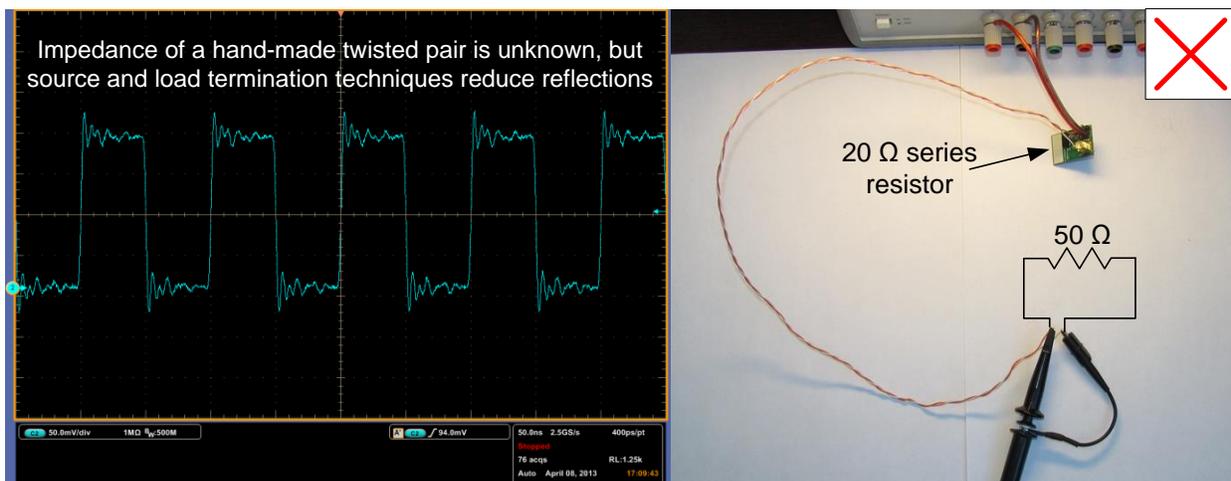


Figure 3.6: Probing 10 MHz signal under test with 22-inch twisted pair and Tektronix P2220 passive probe in 10 MΩ mode connected to 1 MΩ Tektronix DPO7104 oscilloscope input. Source and load termination techniques used to reduce reflections.

別の可能な解決策として、50Ω の計測器入力に直接接続した 50Ω の同軸ケーブルを使用する方法があります。直列終端抵抗器は、インピーダンス整合のために発振器出力の近くに置く必要があります。また、直列終端抵抗器は、発振器出力ドライバから同軸ケーブル静電容量を分離させます。標準的な SiTime シングルエンド発振器の典型的な出力インピーダンスは、2.5、2.8、3.0、3.3V の供給電圧に対して約 20~30Ω であり、1.8V の発振器に対しては 25~35Ω です。

したがって、図 3.7 に示すように 20~30Ω の直列終端抵抗を推奨します。ソースインピーダンス (Z_s) と負荷終端 (Z_L) が比率 $(Z_s + Z_L)/Z_L:1$ の分圧器を形成します。発振器の出力インピーダンスは出力ドライバ特性に依存しており、温度等の外部条件によっても変動します。したがって、分圧器比は正確ではなく、電圧測定にこのアプローチを使用すべきではありません。オシロスコープ、周波数カウンタ（図 3.8 参照）またはその他の機器による周波数試験には適しています。機器の選択にかかわらず、外部または内蔵の 50Ω の終端器が機器側に必要です。また、この方法が追加の 70Ω の負荷抵抗を発振器出力にかけることに留意してください。

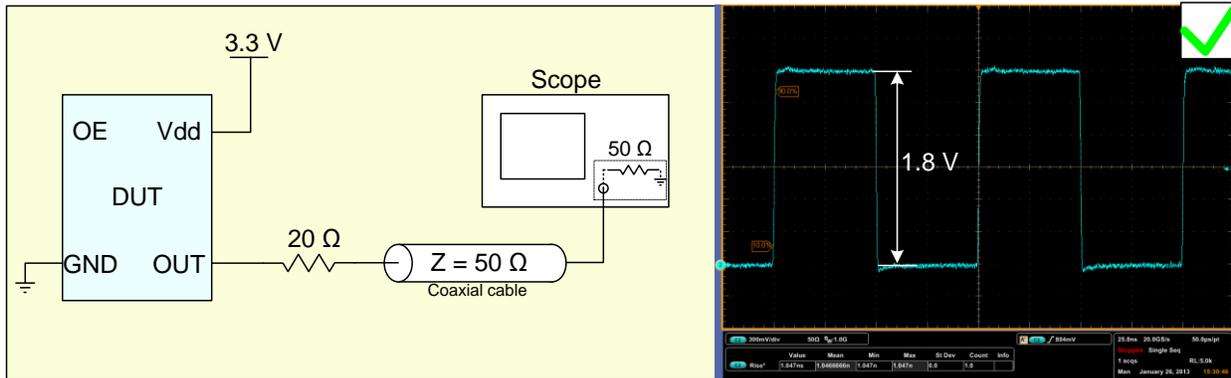


Figure 3.7: Probing oscillator output with 50-Ω coaxial cable (approximately 2:1 divide ratio)

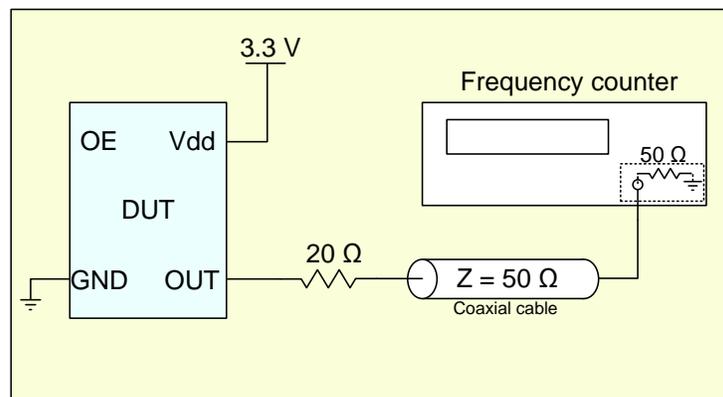


Figure 3.8: Connecting frequency counter using 50-Ω coaxial cable

同軸ケーブルと共に使用できる別のプローブ配列を図 3.9 に示します。より高い入力インピーダンスがあり、分割比は約 21:1 で、1kΩ の抵抗により同軸ケーブルから発振器出力を分離します。スコープ終端抵抗が非常に正確かつ発振器出カインピーダンスがかなり低いため、分割比の精度は 1kΩ の抵抗にほぼ依存しています。この方法の欠点は、入力スコープ増幅器に追加の要求をする高い減衰率です。

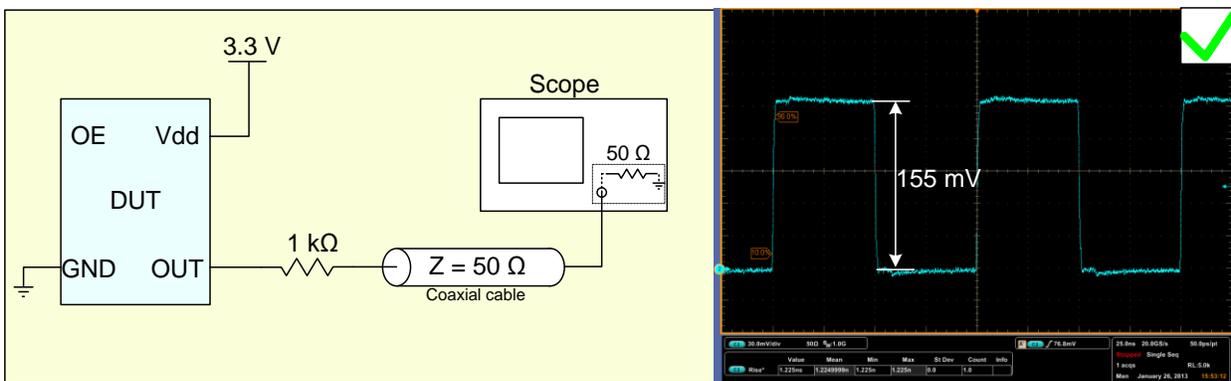


Figure 3.9: Probing oscillator output with 50-Ω coaxial cable (21:1 divide ratio)

3.3 適正なプロービング例

最高の波形計測を行うには、高帯域幅のあるアクティブプローブ、1pF 未満の静電容量および最小限のグラウンドループを使用する必要があります。スコープおよびプロービングで推奨される最小限の帯域幅は、 $BW_{MIN} = 1/T_{Rise2080}$ です（この時、 $T_{Rise2080}$ は予想される信号エッジの 20~80%の立ち上がり時間）。また、 $BW_{MIN} = 1.25/T_{Rise1090}$ として推定することもできます（この時、 $T_{Rise1090}$ は予想される信号エッジの 10~90%の立ち上がり時間）。

推奨される最小限のスコープサンプリングレートは、 $SR_{MIN} = 6/T_{Rise}$ です。例えば、予想される被試験信号の 20~80%の立ち上がり時間が 1ns の場合、 $BW_{MIN} = 1GHz$ および $SR_{MIN} = 6Gsps$ です。

結果として生じるスコープおよびプローブの立ち上がり時間は、[1] $T_{Rise} = \sqrt{T_{Scope}^2 + T_{Probe}^2}$ です（この時、 T_{Scope} および T_{Probe} は、それぞれスコープおよびプローブの立ち上がり時間）、1GHz のスコープと組み合わせた 1GHz のプローブの帯域幅は、1 GHz 未満です。

波形計測の適正な実施は、スコープの帯域幅とサンプリング周波数をできるだけ高く設定することです。スコープの帯域幅が不十分であれば、計測される信号の立ち上がり時間は予想よりも高くなります。

スコープ垂直増幅器の利得は、画面に収まる範囲内で可能な限り入力信号を引き伸ばすものを推奨します。これにより、スコープ ADC の最高分解能が波形変換に利用され、量子化ノイズが最小限になります。通常、スコープの自動設定機能は波形捕捉に最適な垂直解像度を選択します。75MHz の発振器出力の良いプローブの実例を図 3.10 に示します。

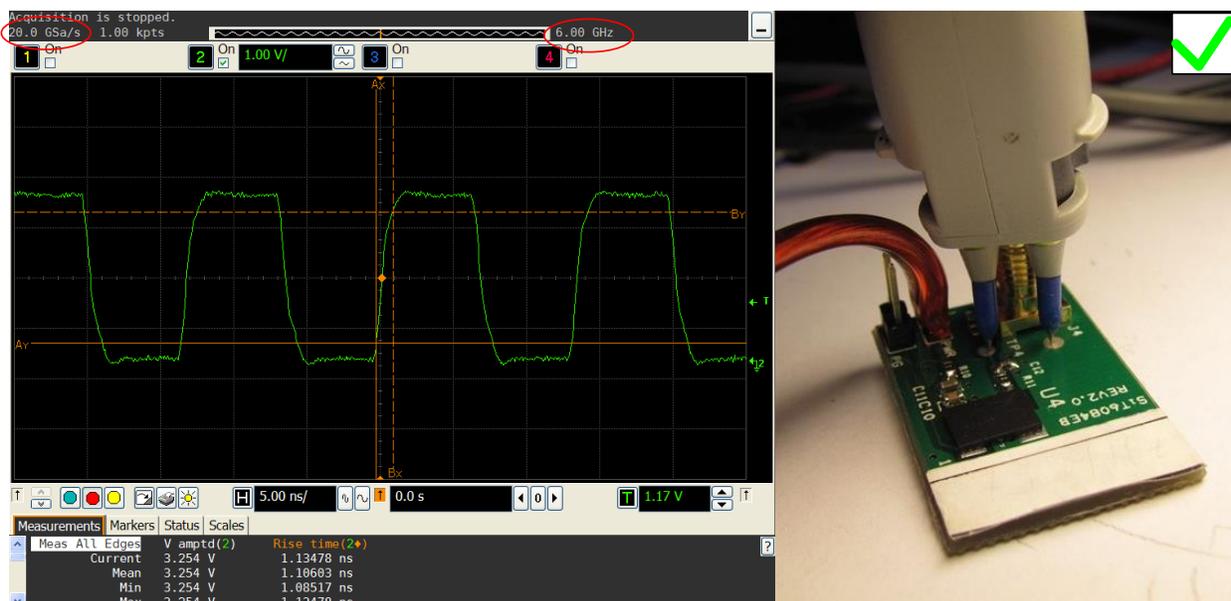


Figure 3.10: Probing example. Signal source: 75-MHz SiT8208 MEMS oscillator on SiTime evaluation board. Oscilloscope: Agilent DSA90604A (6 GHz). Active probe: Agilent 1134A (7 GHz) with E2675A differential browser probe head.

動作温度範囲がかなり狭いため、アクティブプローブを温度室内に置くことができません。例えば、アジレント社製 1169A アクティブプローブは、5~40°Cで動作します。エクステンションケーブルによる標準的な設定を図 3.11 に示します。

これらのアクセサリを利用できない場合、第 3.2 項で述べたように、同軸ケーブルを周波数試験等のいくつかの計測に使用できます。同軸ケーブルを使用した標準的な計測配置を図 3.12 に示します。

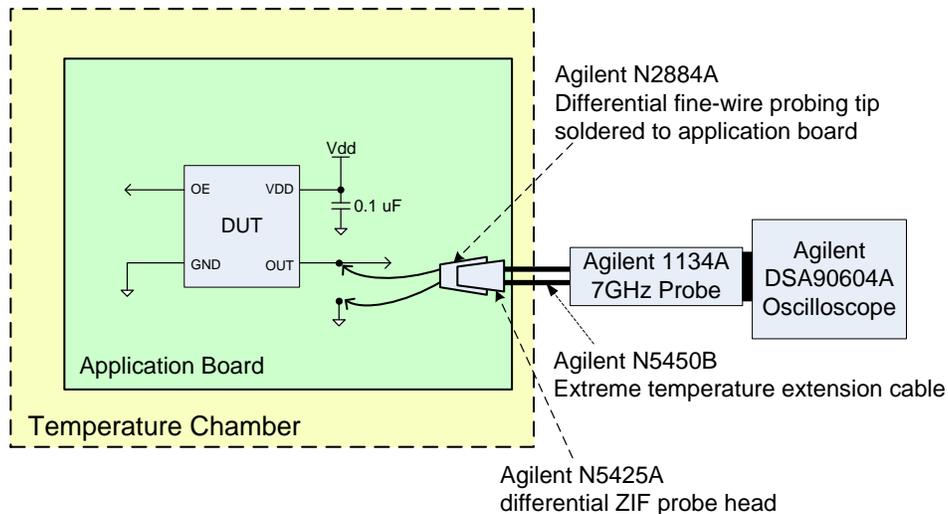


Figure 3.11: Example of a temperature testing setup that utilizes Agilent temperature extension cable

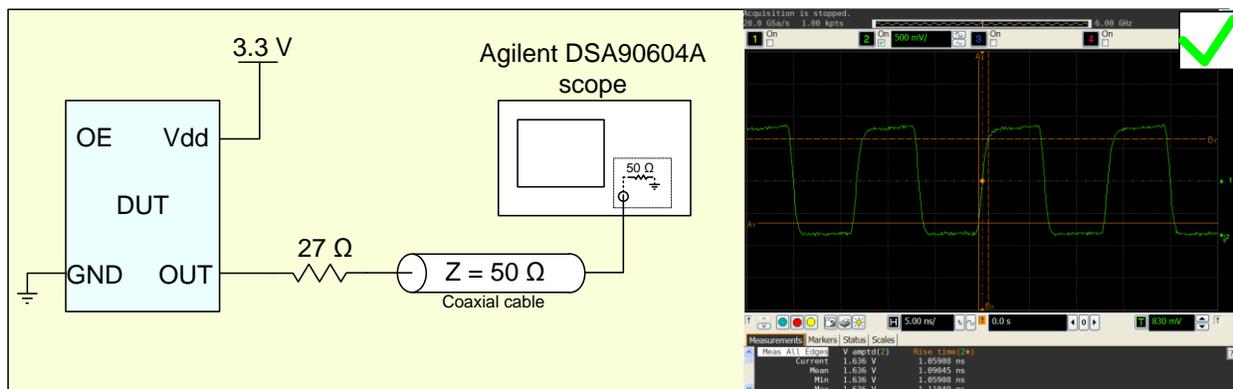


Figure 3.12: Probing with Agilent DSA90604A scope using coaxial cable

3.4 Noise pick-up

プローブグラウンドループは、アプリケーションボードの様々なソースからノイズを拾います。この結合ノイズは、被試験信号に自然に存在しているかのように波形上に現れます。ノイズが発振器と同期したソースから来る場合、自然な信号ノイズと分離することは困難です。プローブグラウンドループとのノイズ結合のメカニズムを図 3.13 に示します。

ボードのトレースに沿って移動するスイッチング電流信号は、接地リターン電流によるループを形成し、2つのループの相互インダクタンスを通じてプローブグラウンドループと結合します。結合ノイズの振幅は、妨害電流変化の速度およびループ間の相互インダクタンスに依存します。相互インダクタンスはループ面積に比例し、ループ間距離の三乗に反比例します。ノイズピックアップを最小限にするには、プローブグラウンドループの面積を可能な限り小さく保つことを推奨します。

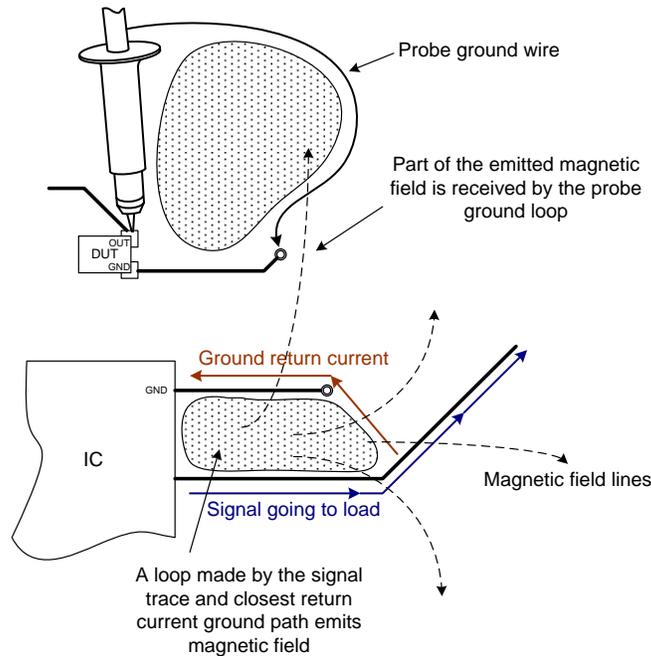


Figure 3.13: Mechanism of noise coupling to the probe ground loop

3.5 プロービングを行う際の助言

上記のように、発振器出力のプロービングにはアクティブプローブを推奨します。但し、特定の状況においてはパッシブプローブも役に立ちます。次の場合はパッシブプローブを推奨します。

- 低速デジタル回路のデバッグ
- 低帯域幅アナログ回路
- 低速高インピーダンスソース
- 直流源のプロービング

また、次の場合はアクティブプローブを推奨します。

- 高速シリアルインタフェースのプロービング
- クロック波形の計測
- 高周波デジタル回路のプロービング

4 よくある間違い

4.1 プローブの帯域幅および入力静電容量が適切でない

図 4.1 は、「1X」モードに切り換えた Tektronix 社製 P2220 パッシブプローブによって計測した 75MHz の波形を示しています。このモードでは、P2220 プローブには、95pF の入力静電容量と、わずか 6MHz の帯域幅しかありません。図 6.1 の波形は、その最大振幅まで到達せず、立ち上がり時間が遅いです。

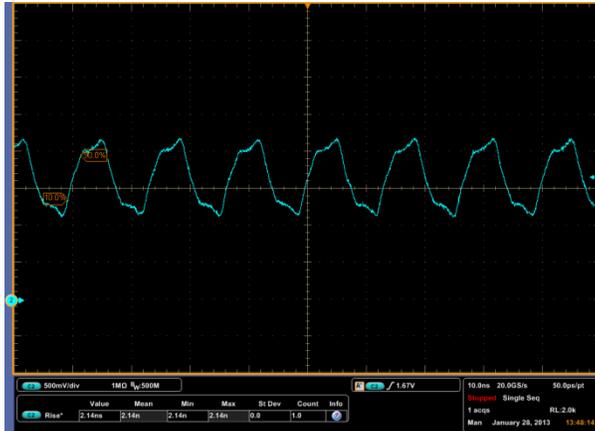


Figure 4.1: 75-MHz oscillator output captured with a Tektronix P2220 passive probe in "1X" mode on Tektronix DPO7104 scope

4.2 プロービングに使用するロングワイヤー

図 4.2 は、22 インチのワイヤーと 10MΩ のパッシブプローブを使用して計測した 75MHz の発振器出力波形を示しています。ロングワイヤーの自己インダクタンスループは、共振および帯域幅の低減をもたらします。

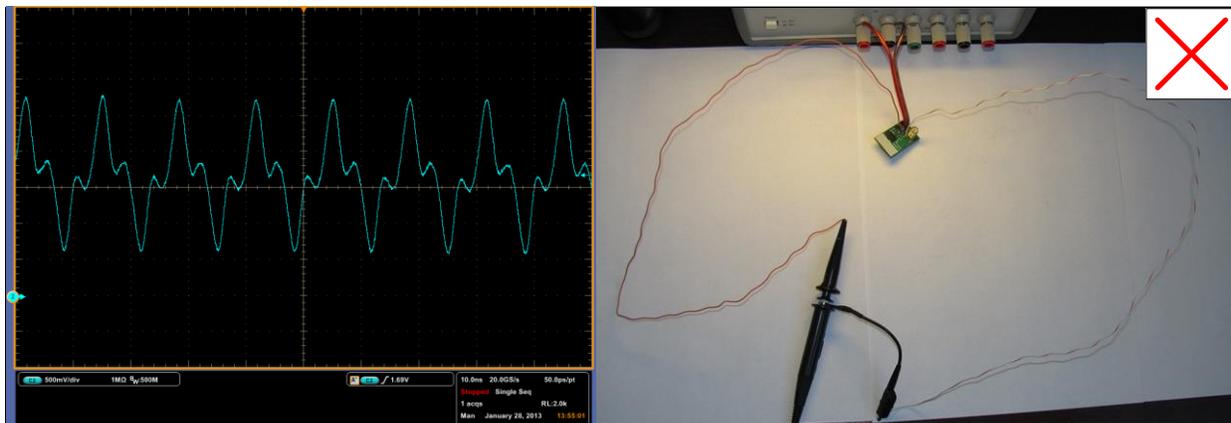


Figure 4.2: Probing using long wires and a Tektronix P2220 10-MΩ passive probe. Screen capture made with Tektronix DPO7104 oscilloscope.

材料内の有効立ち上がりエッジ長さの 6 分の 1 よりも長い信号経路のワイヤーや PCB トレースは、分布定数伝送路として扱われ、インピーダンス整合を必要とします。立ち上がり時間が 1ns の信号について

は、この閾値は約 1 インチです。結果として、非終端伝送路またはロングワイヤーを 10M Ω のパッシブプローブに接続する時に著しい反射があります。図 4.2 に示す伝送路を通して移動する信号は、プローブの高インピーダンス入力から反射し、適切なソース終端が無いため、反射波はソースに到達して反射します。

4.3 被試験信号に接続されたスタブ

被試験信号に接続された長いスタブは反射をもたらします。図 4.3 は、6GHz のアクティブプローブ（信号トレースに接続された 4 フィートの同軸ケーブル）を使用して評価基板で計測した波形を示しています。50 Ω の同軸ケーブルの另一端が浮いているため、インピーダンス不整合が反射をもたらしています。

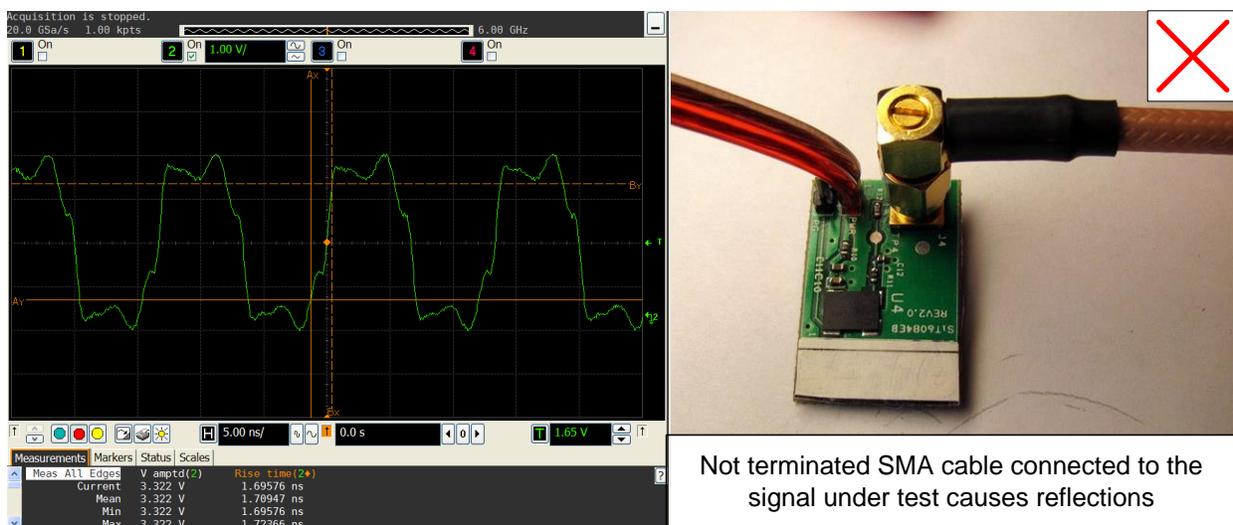


Figure 4.3: Waveform captured on evaluation board with an active probe while a non-terminated coaxial cable is connected to the oscillator output. Oscilloscope: Agilent DSA90604A (6 GHz); active probe: Agilent 1134A (7 GHz) with E2675A differential browser probe head.

4.4 オシロスコープのサンプリングレートが低すぎる

不適切なサンプリングレートを選択することで、予想外の波形となる可能性があり、プローブの問題と間違えられる可能性があります。基本成分（150MHz）のナイキスト周波数よりも低い 2 つのサンプリングレート（25Msps および 50Msps）を用いて計測した 75MHz の信号を図 4.5 に示します。

このような状況は、信号のかなり大きなタイムフレームを計測したい時に最もよく発生し、限られたメモリの中、オシロスコープがサンプリングレートを自動的に低下させます。その結果、サンプリングされた信号にアライアスが現れ、高周波成分を低周波成分のようになります。この低いサンプリングレートにより計測した波形は、75MHz のクロック信号のようにも見えませんが、スコープ上に表示された波形は、超低周波信号のように見えたり、波形内にギャップが現れたりすることがあります。これは発振器が適切に機能していないという（不正確である）と思い込んでしまう可能性があります。

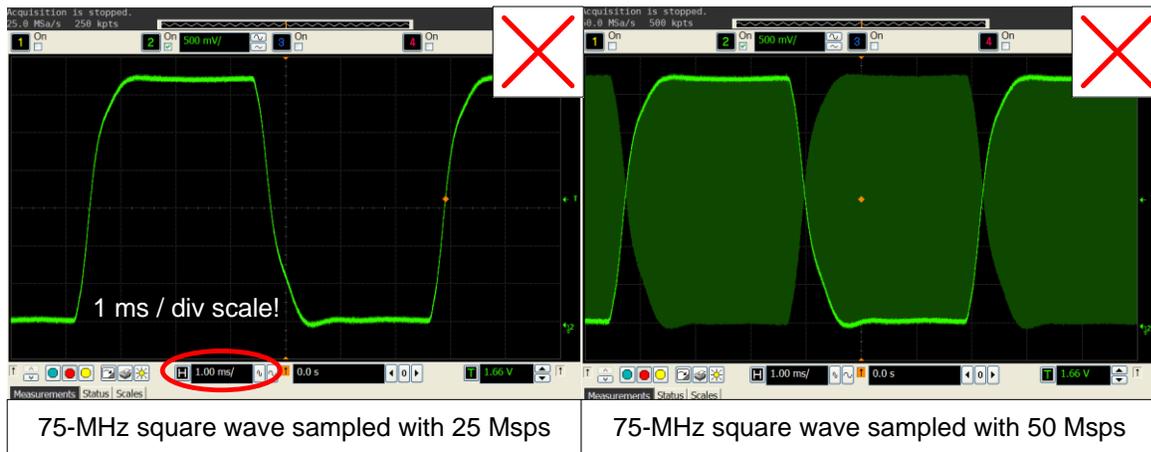


Figure 4.5: 75-MHz signal under test captured with Agilent DSA90604A scope using the sampling rates below the Nyquist frequency.

5 参考資料

- [1] Howard W. Johnson, Martin Graham. High-speed digital design: a handbook of black magic. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1993, pp. 83-101
- [2] Agilent technologies. Application note 1603, "Eight hints for better scope probing" (<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7894EN.pdf>) (2011).
- [3] Tektronix. Primer, "ABCs of Probes" (<http://www.tek.com/document/primer/abcs-probes>)
- [4] LeCroy. Application note 016, "Probing tutorial" (http://cdn.teledynelecroy.com/files/appnotes/lecroy_probing_tutorial_appnote016.pdf)

SiTime Corporation
990 Almanor Avenue
Sunnyvale, CA 94085
USA
Phone: 408-328-4400
<http://www.sitime.com>

© SiTime Corporation, 2008-2013. The information contained herein is subject to change at any time without notice. SiTime assumes no responsibility or liability for any loss, damage or defect of a Product which is caused in whole or in part by (i) use of any circuitry other than circuitry embodied in a SiTime product, (ii) misuse or abuse including static discharge, neglect or accident, (iii) unauthorized modification or repairs which have been soldered or altered during assembly and are not capable of being tested by SiTime under its normal test conditions, or (iv) improper installation, storage, handling, warehousing or transportation, or (v) being subjected to unusual physical, thermal, or electrical stress.

Disclaimer: SiTime makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this material, and specifically disclaims any and all express or implied warranties, either in fact or by operation of law, statutory or otherwise, including the implied warranties of merchantability and fitness for use or a particular purpose, and any implied warranty arising from course of dealing or usage of trade, as well as any common-law duties relating to accuracy or lack of negligence, with respect to this material, any SiTime product and any product documentation. Products sold by SiTime are not suitable or intended to be used in a life support application or component, to operate nuclear facilities, or in other mission critical applications where human life may be involved or at stake.