

振荡器频率测量指南

目录

1 引言.....	1
2 常见频率测量问题.....	2
2.1 使用不同频率计数器进行测量，所得结果不吻合.....	2
2.2 频率计数器显示的频率明显高于预期.....	2
2.3 频率计数器用不同门控时间设置进行测量，所得结果不同.....	3
2.4 示波器频率测量显示巨大的差异.....	3
3 频率基准的选择.....	3
4 使用频率计数器进行测量.....	4
5 使用数字示波器进行测量.....	7
5.1 示波器采样时间戳精度及量化噪声.....	7
5.2 单周期测量.....	7
5.3 门控时间与时钟基准的限制.....	8
6 针测信号.....	8
7 参考资料.....	11
附录 A：数字门控频率测量法.....	12

1 引言

振荡器广泛应用于各种数字电子设备，提供参考时钟。验证高性能设备的频率特性需要精确的频率测量。本文包含对几种频率测量方法及测量仪器的概论介绍，旨在帮助使用 SiTime MEMS 振荡器的用户进行准确的频率测量。

2 常见频率测量问题

2.1 使用不同频率计数器进行测量，所得结果不吻合

使用不同频率计数器进行测量，所得到的结果不一致，这可能是由下列一个或多个原因导致。

1. **两台仪器的频率基准有差别。** 频率计数器的基本配置，基于成本考虑，通常采用低成本 的温补晶振 (TCXO) 作参考时钟，频率稳定度为 1 至 5 ppm，老化率为每年几个 ppm。频率计数器参考时钟的误差会增加频率测量的误差。即使是同一个频率计数器使用内置TCXO 或外接高精度铷钟 (Rubidium) 频率基准所得的测量结果也可能有差异，如图 1例。请参阅第3节频率基准选择指南。

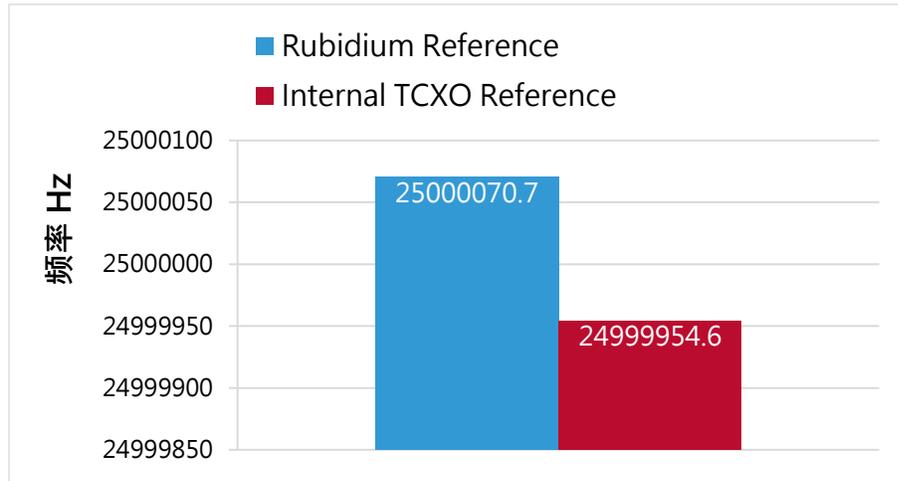


图 1：SiT8208 25MHz 振荡器的测量结果，安捷伦 53132A 频率计数器分别使用内置 TCXO 和外接铷钟作为参考时钟，门控时间为 1s，测量结果的差异为 4.6 ppm

2. **门控时间设置或计数器电路性能规格不同。** 即便仪器使用相同的频率基准，如果门控时间 (Gate time) 设置不同，也可能会出现不同的测量结果。此外，如果用相同的门控时间和频率基准，但频率计数器电路分辨率不同，在低门控时间设置情况下，测量结果也可能有差异。请参阅第 4 节了解详细介绍。

2.2 频率计数器显示的频率明显高于预期

信号完整性不良造成的时钟波形畸变可能会无意中造成频率计数器测量的频率偏高，甚至比实际频率增加一倍。在通过信号探头将振荡器时钟输出信号接到频率测量仪器的方案中，当仪器的输入阻抗配置为高阻抗模式 (例如 1 MΩ等)，经常会遇到这种情况。第 6 节讨论了信号完整性对频率测量的影响，并提出了建议如何正确连接信号探头。

2.3 频率计数器用不同门控时间设置进行测量，所得结果不同

频率计数器的频率测量误差与门控时间成反比。如图 4 所示，门控时间越短，误差就越大。请参阅第 4 节了解有关频率计数器的详细介绍。

2.4 示波器频率测量显示巨大的差异

示波器可以对输入时钟信号的每一个周期进行频率测量。由于示波器的设置和具体测量方式的不同，测量结果既可能是多组波形纪录信号周期的平均值，也可能是一组波形纪录中所有信号周期的平均值。根据第 5 节的介绍，单个信号周期的频率测量可以被信号本身的周期抖动及示波器内部噪声严重影响，从而使结果出现高达数千 ppm 的误差。采集数千个时钟周期样本并取平均值，可显著降低示波器频率测量的误差。但这种方法仍然不及频率计数器简捷，精度也远达不到频率计数器能很容易达到的ppm级别。图 2 是使用高性能示波器进行频率测量的例子。

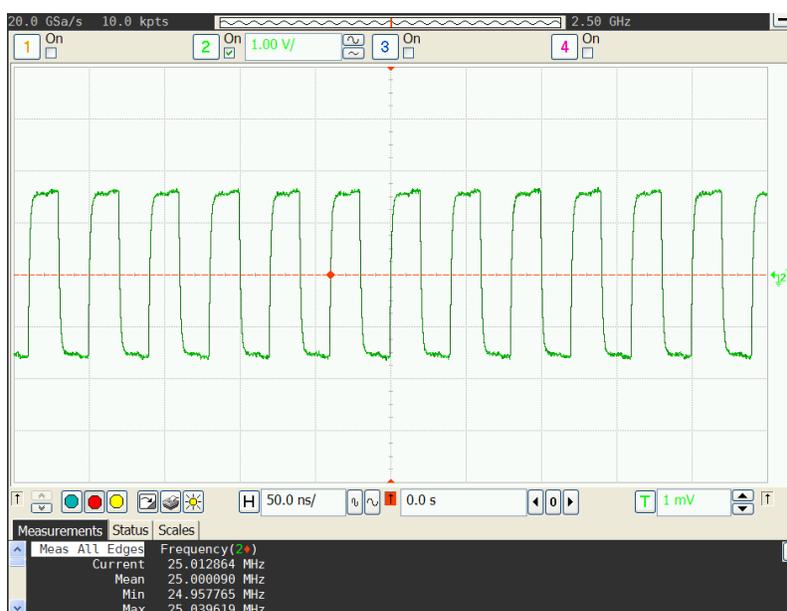


图 2：使用安捷伦 DSA90604A 示波器进行频率测量的例子

3 频率基准的选择

任何测量都是一个将未知量与已知参考量进行比较的过程。在频率测量过程中，将该参考信号源称为时钟基准。时钟基准不精确，会增加测量的系统误差。频率测量系统的误差是时钟基准精确度 (δf_{TB}) 与计数器电路测量误差 (δf_{Meas}) 之和，因此 $\delta f = \delta f_{TB} + \delta f_{Meas}$ 。选择稳定和精确的时钟基准是开始频率测量之前的必要步骤 [1]。表 1 列出了典型时钟基准及其稳定性。

表 1：典型时钟基准选项

时钟基准类型	时钟基准稳定性	是否需要校准
温补晶振 (TCXO)	超过 1 ppm	是
恒温晶振 (OCXO)	0.1 至 1 ppm	是
高级恒温晶振 (OCXO)	0.01 至 0.1 ppm	是
铷钟	1 ppb	是
锁定 GPS	0.01 ppb	否

与其它时钟基准相比，锁定GPS的时钟基准有以下优点：

- 确保所有位于不同地点的仪器能使用相同的参考源，测量结果相关性更好；
- 无需校准。

要实现最准确的频率测量及结果的关联性，建议使用锁定GPS的时钟基准。此外，铷钟也是在大多数情况下都可以接受的时钟基准。除锁定GPS的时钟基准外，所有时钟基准都需要定期校准。

4 使用频率计数器进行测量

频率计数器是专门设计用于精确频率测量仪器的首选。最初的、采用数字门控方法的频率计数器电路相当容易实现，但这种方法的测量误差和输入频率有关（参阅附录 A）。

现代频率计数器使用倒数计数方法 [2]。这一方法让门控时间与输入信号同步，通过计数输入信号周期内的参考时钟脉冲数量，然后计算输入信号频率。因此，测量误差取决于参考时钟脉冲的周期。实用上，参考时钟可以倍频至相当高的频率以获得更高的分辨率。这种方法的主要优势是分辨率与输入信号频率无关。

进一步提高测量分辨率的方法，需要对输入信号边沿进行时间戳采集，用来判断输入信号周期开始和结束事件发生在参考时钟周期中的时间点（图 3）。现代频率计数器能实现 20 ps 或者更高的分辨率 [3]。

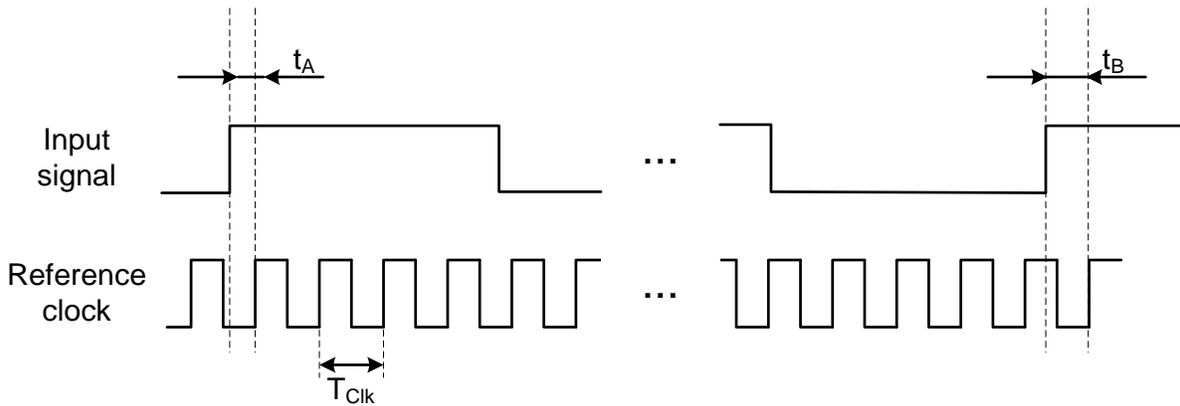


图 3：使用时戳采集功能实现倒数计数频率测量

相对频率测量误差 $\delta f = \Delta f / f$ 可以表达为 $\delta f = \delta f_{TB} + \Delta T_{Int} / T_{Gate}$ ，其中 δf_{TB} 是时钟基准精确度， ΔT_{Int} 是对输入信号周期开始及结束事件的时间戳采集的时间间隔误差。 $\Delta T_{Int} / T_{Gate}$ 代表时间戳采集不准确所导致的相对误差。该误差在不同的输入频率范围内保持不变，但会随门控时间的缩短而增加 [1]。图 4 是两款不同时间间隔测量精度的频率计数器，其相对频率测量误差与门控时间的关系。如果计入时钟基准误差，图 4 曲线会向上平移。

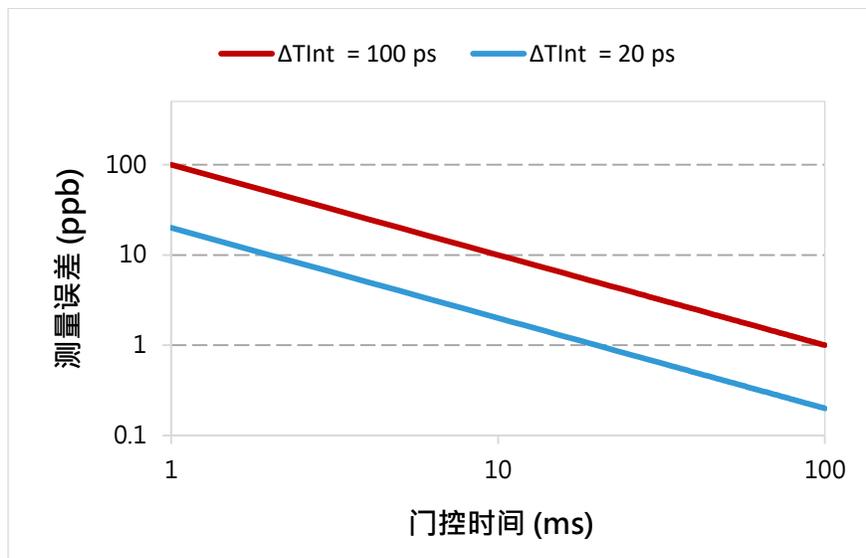


图 4：相对频率测量误差 (ppb)

与门控时间的关系。两种时间间隔测量精度代表不同的频率计数器，并假定没有时钟基准误差

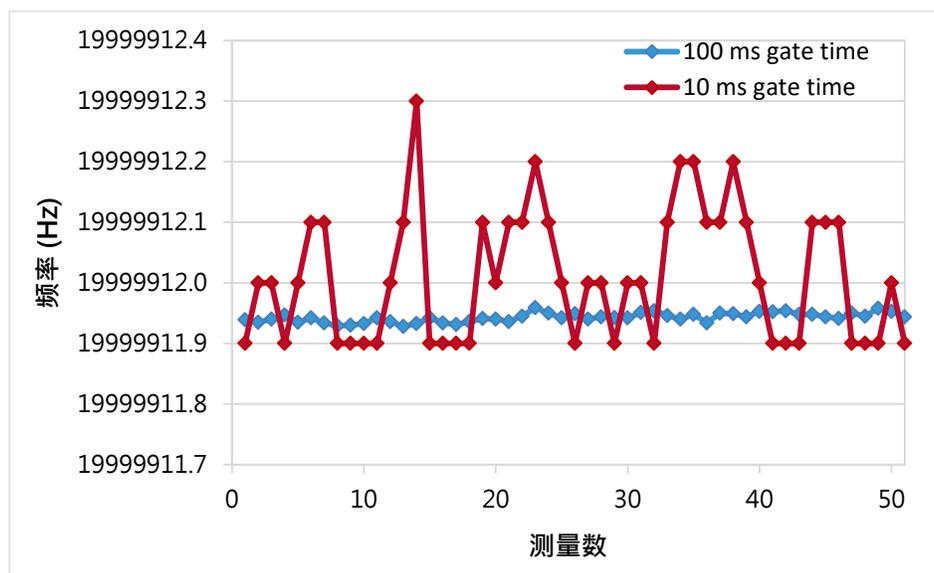


图 5：不同门控时间设置下同一信号的频率测量结果；同一门控时间设置下采集 50 个频率测量数据。输入信号是来自安捷伦 33250A 函数发生器的 20-MHz 正弦波；频率计数器是外接铷钟基准的安捷伦 53132A

图 5 的两组测量数据显示，如果将门控时间从 100ms 降到 10ms，同样的 20-MHz 输入信号的频率测量分辨率会被限制在大约在 5 ppb (0.1Hz)。

说明：某些频率计数器可能会在门控时间内进行更多的测量，并且使用该信息来提高测量精度。这样的频率计数器，例如安捷伦 53132A 和 53230A。因此对于有些计数器而言，用 $\Delta T_{Int} / T_{Gate}$ 来表达测量误差与门控时间的关系可能不完全准确。

相对频率测量误差有两大主要因素：

1. 时钟基准精确度和稳定性；
2. 频率计数器时间间隔测量误差与门控时间的比率。

如果使用准确的时钟基准，选择更高分辨率的频率计数器并增加门控时间，就可提高测量精度。SiTime 建议使用至少 100 ms 的门控时间以及锁定 GPS 的时钟基准或铷钟基准。请查阅仪器手册，了解有关频率计数器准确度和分辨率的详细信息。

说明：参阅 www.sitime.com 上的常见问题解答部分，了解相关 32 kHz 振荡器频率测量技巧的更多建议。

5 使用数字示波器进行测量

示波器广泛用于测量时钟信号的各种参数，但不是最有效率的频率测量仪器。本节将探讨用数字示波器测量频率的限制。

5.1 示波器采样时间戳精度及量化噪声

数字示波器可将模拟输入信号用模数转换器转换成一系列在相同时间间隔采样的数字信号。为测量频率，示波器需要检测信号周期的开始和结束，而这通常以信号幅值的 50% 为门限值。示波器软件利用门限值附近的两个数字信号点进行内插计算，得到信号经过门限值的时间点信息。以上升沿为例，其中一个点位于信号超过该门限值之前，而另一个点则位于信号超过该门限值之后（参见图 6）。这一门限时间点计算的准确度取决于示波器采样时间戳的精度以及量化噪声转换为时域抖动的数量。采样时间戳的准确度决定了 t_1 和 t_2 的误差，而量化噪声则决定 V_1 和 V_2 的幅值。关于示波器量化噪声对时域抖动测量的影响，请参阅 SiTime 应用手册 AN1007《时钟抖动与测量》[4] 的第 4 节。

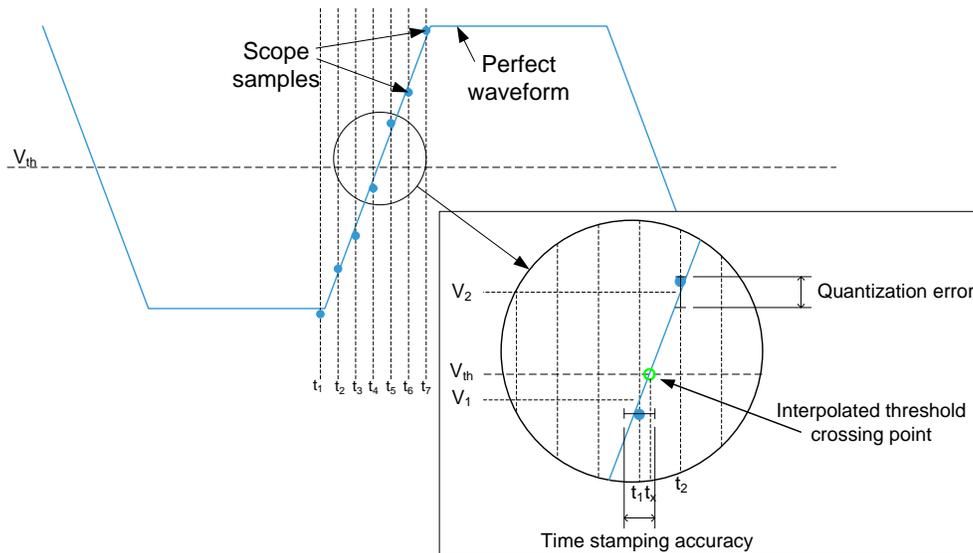


图 6：示波器采样时间戳精度和量化噪声对时域抖动测量的影响

5.2 单周期测量

许多示波器对每次波形纪录只能测量一个时钟周期。这样的测量方式带来较大的相对误差，而且误差会随着输入信号频率相应增加。此外，由信号本身的高频率相位噪声决定的周期抖动也会在单个周期测量中带来明显的误差。进行多次测量并计算出数据平均数，可将误差降低到一定的仪器测量限值。但这样一来测量时间长，而且也不能提供 ppm 级别的精确度。

5.3 门控时间与时钟基准的限制

现代高性能数字示波器能够对每次纪录采集的连续的信号周期运行各种预设的参数测量功能。它们也有良好的采样时间戳精度。但是由于采集纪录数据的内存有限，在最大采样速率下，只能采集非常小范围时间内的信号（通常最大至 1 ms）。这大大限制了频率测量可用的门控时间，并进而限制了测量精度。

示波器时钟基准的主要性能目标是实现低抖动，而未必有最好的频率稳定性。这可使用外部的时钟频率基准来校正。

6 针测信号

信号完整性可能会影响频率测量，即便实际测量是通过多个周期得出的平均值也如此。如果信号完整性问题导致该信号除了上升和下降沿之外，还有部分波形会穿过测量门限值，测到的周期数量就会虚增，如图7。这一现象往往被称为双重触发。当双重触发发生时，测量到的频率就会高于实际信号频率。

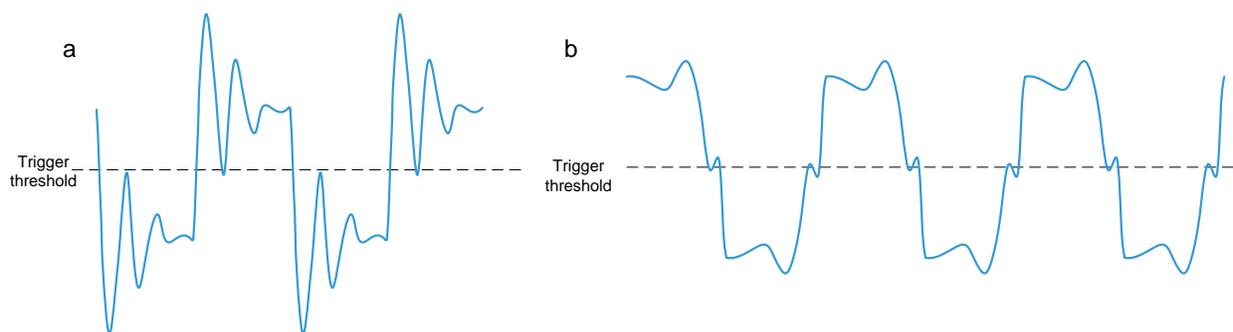


图 7：两种可能会导致双重触发现象的信号完整性问题：

a) 过大的振铃、过冲和下冲；b) 波形上升或下降边沿门限值附近的反射波叠加

图 8 显示的波形是一般的时钟信号通过无阻抗匹配的长线连接到高阻抗的示波器探针，导致的信号完整性问题。屏幕上显示的振铃非常大，足以引起双重触发现象。

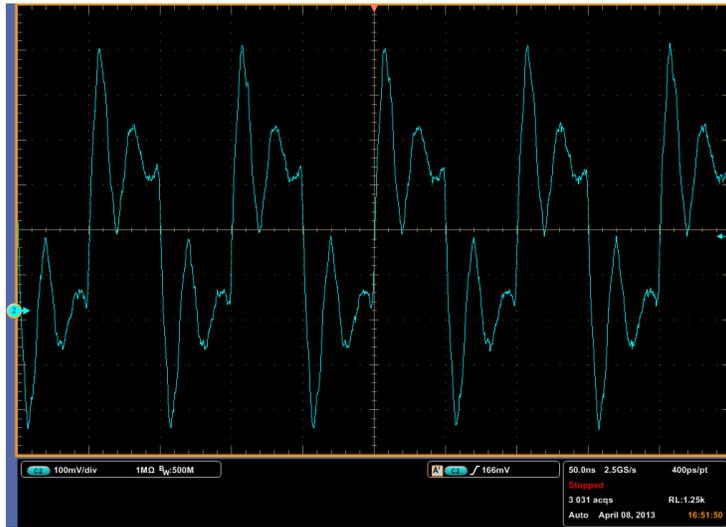


图 8：连接到 10 MΩ 无源探针（用于接入时钟信号）的长电线引起的时钟信号波形。泰克 DPO7104 示波器屏幕截图。

不适当的时钟信号连接方式会影响信号完整性，并可能导致双重触发。该情况会导致仪器测量的频率高于预期，而且各次测量间的变化可能会很大。

为确保良好的信号完整性，信号源、负载和传输线的阻抗应该匹配。为此，可以使用信号源端或负载端的阻抗匹配设计。以下示例说明了使用 50 Ω 同轴电缆和各种端接匹配设计的信号接入方式。

图 9 是使用信号源端串联电阻匹配和 1 MΩ 仪器端输入阻抗设置下的信号波形。在本示例中，被测的时钟振荡器的输出阻抗是 25 到 30 Ω，因此 20 Ω 电阻与输出串联，可以匹配 50 Ω 的线缆阻抗。通过传输线的信号波会被仪器的高阻抗输入端反射。但是信号源端的阻抗匹配可以衰减这部分反射，但波形仍然有过冲和下冲。不建议使用这种方法，因为反射难以完全消除。

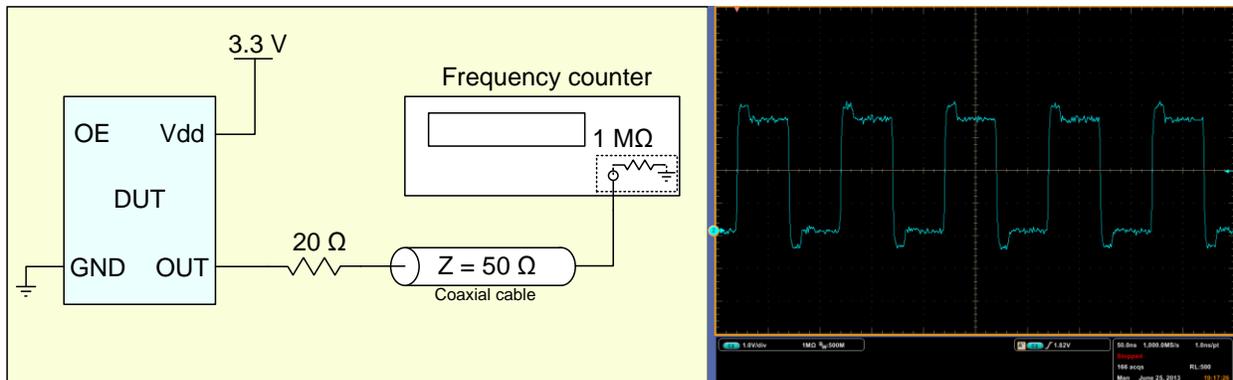


图 9：在同轴电缆连接至 1 MΩ 仪器输入并只使用被测器件端的信号源端匹配时，在仪器端观察到的波形

将被测信号连接至频率计数器的首选方法如图 10 所示。使用 50Ω 端接仪器输入可确保良好的信号完整性，而 $1\text{ k}\Omega$ 电阻则可将被测器件与外部负载隔离。这种针测方案具有 21:1 衰减系数。

敬请参阅 SiTime 应用手册《针测振荡器输出》[5]，了解有关针测技术的更多详情。

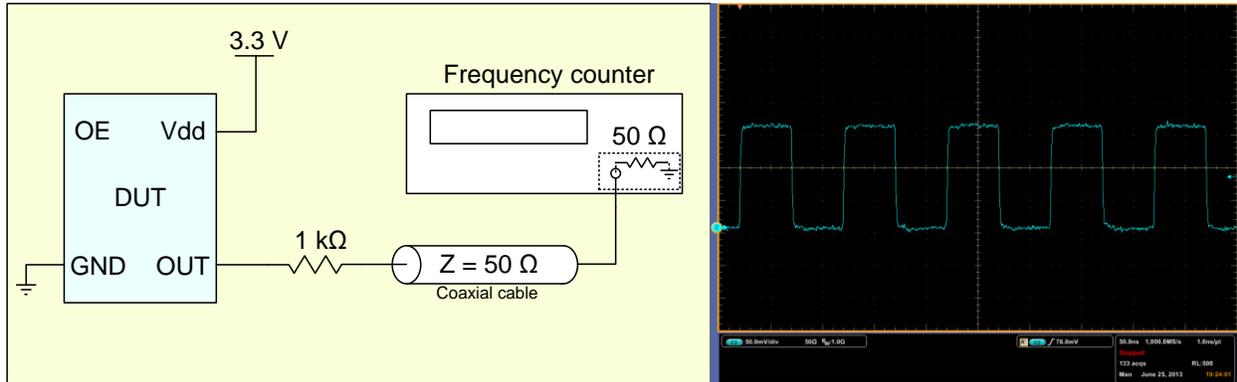


图 10：为确保良好的信号完整性及仅 $1\text{ k}\Omega$ 的被测信号负载而推荐的频率测量针测方案

7 参考资料

- [1] 安捷伦科技。应用手册《让频率计数器发挥最大效用的 10 项建议》
(<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8431EN.pdf>) (2008 年) ;
- [2] 安捷伦科技。应用手册 200《电子计数器基础》
(<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7660E.pdf>) (1997 年) ;
- [3] 安捷伦科技。产品说明书 5990-6283EN《安捷伦 53200A 系列 RF / 通用频率计数器 / 定时器》(<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-6283EN.pdf>) (2013 年) ;
- [4] SiTime 公司应用手册 AN10007《时钟抖动与测量》
(<http://www.sitime.com/support2/documents/AN10007-Jitter-and-measurement.pdf>) (2013 年) ;
- [5] SiTime 公司应用手册 AN10028《针测振荡器输出》
(<http://www.sitime.com/support2/documents/AN10028-Probing-Oscillator-Output-Rev1.0.pdf>) (2013 年) 。

附录 A：数字门控频率测量法

图 A.1 是直接数字门控频率测量法的方框图。经过整形的输入信号应用于数字与门的一个输入端。与门的第二个输入端用来控制数字与门的打开时间。这一门控信号来自时钟基准振荡器输出，经过可配置的分频电路分频得到所需一定持续时间的正脉冲。当门控信号为高电平，输入信号脉冲通过与门，触发计数寄存器。计数寄存器计数其上升边沿的数量，可获得在预知的门控时间 (T_{Gate}) 内通过的输入信号周期数 N 。输入信号频率可计算为 $F = N / T_{Gate}$ 。

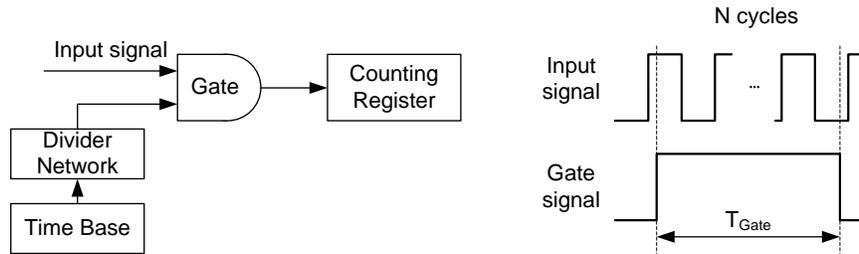


图 A.1：直接数字门控频率计数器的简化方框图

由于门控时间与输入信号是异步的，门控信号的开启和关闭可能发生在输入信号周期中的任意位置。因为输入信号周期计数 N 只能取整数，这种频率测量方法的绝对误差是门控时间的倒数 $\Delta F = \pm 1 / T_{Gate}$ 。以 ppm 为单位的相对频率测量误差是 $\delta F = \Delta F / F \cdot 1e6$ ，其中 F 是实际输入信号频率。图 A.2 说明在不同门控时间下，直接频率测量方法的分辨率和输入信号频率的关系。

例如，我们可在时钟基准稳定性为 0.1 ppm，门控时间为 100 ms 的情况下，计算使用数字门控方法测量 25 MHz 输入信号的频率测量误差。这种方法的频率测量误差为 $\Delta F = 1 / T_{Gate} = 1 / 0.1 = 10 \text{ Hz}$ ，该误差以 ppm 为单位，可表达为 $\delta F = 10 / 25e6 \cdot 1e6 = 0.4 \text{ ppm}$ 。总体测量误差为时钟基准误差和方法误差之和，即等于 $0.1 \text{ ppm} + 0.4 \text{ ppm} = 0.5 \text{ ppm}$ 。

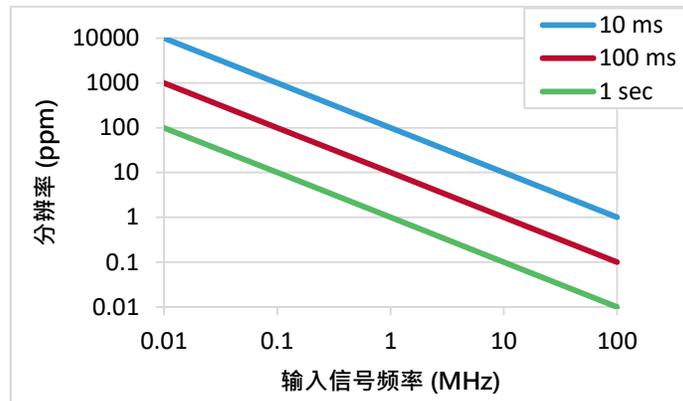


图 A.2：不同门控时间下，直接数字门控频率测量分辨率和输入信号频率的关系

表 2: 修订记录

Version	Release Date	Change Summary
1.0	09/14/2018	Original doc

SiTime Corporation, 5451 Patrick Henry Drive, Santa Clara, CA 95054, USA | 电话: +1-408-328-4400 | 传真: +1-408-328-4439

© SiTime 公司 2008 年 - 2018 年版权所有。SiTime 对本文所含信息保留随时更改的权力，恕不另行通知。对于因如下情形而给产品造成任何部分或全部损失、损坏或缺陷的情况，SiTime 概不承担任何责任或义务：(i) 使用非 SiTime 产品所包含的任何电路系统；(ii) 对产品的误用或滥用，其中包括静电放电、疏忽或事故；(iii) 对产品在装配时已经焊接或变更的部位进行未经授权的修改或修理，而且 SiTime 无法在正常测试条件下对相关修改或修理进行测试；或 (iv) 错误的安装、存储、处理、仓储或运输，或 (v) 将产品置于非正常的物理、热力或电气应力环境下。

免责声明：SiTime 不做与本材料相关的任何明示或暗示的保证。具体而言，SiTime 对本材料、任何 SiTime 产品及任何产品文档概不做实际或法律、法规或其它方面任何明示或暗示的保证，其中包括对使用或特定目的的适销性及适用性的暗示性保证，以及因任何交易过程或商业惯例所产生的，以及任何与准确性或忽略过失相关的普通法律义务而产生的暗示性担保。SiTime 出售的产品既不适用于也无意应用于如下方面：生命支持应用或作为生命支持组件、核设施运行，或其他可能涉及或危及人类生命安全的任务关键型应用领域。