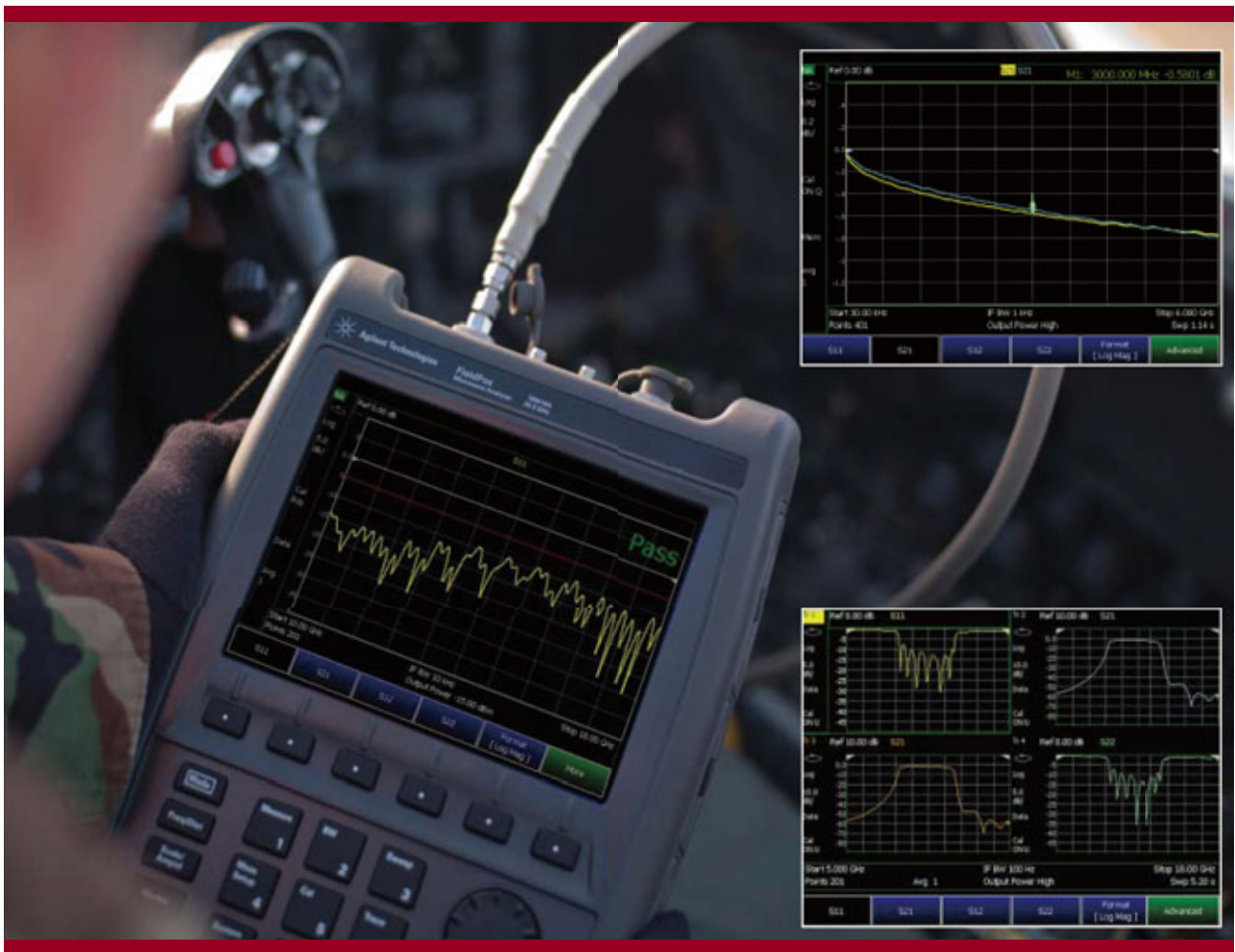




在外场执行精密测量校准的技巧

使用 FieldFox 手持式分析仪

应用指南



这篇指南主要应用于电缆、天线和矢量网络分析，探讨了矢量网络分析仪校准的最新进展，对比了使用不同方法对各种射频与微波器件(包括电缆、滤波器和放大器)进行校准后的测量结果。FieldFox手持式分析仪用于执行各种测量，还能在外场执行精密的测量与分析。

随时随地进行精确测量。



简介

射频与微波系统及元器件的安装、故障诊断和运营维护，要求在不同的室内室外的环境和条件下，对它的反射和传输特征进行测量。通常使用具有用户外场校准功能的手持式矢量网络分析仪 (VNA) 执行此类测量。由于测试通常是在恶劣的外部条件下进行，例如高海拔(例如野外塔或柱的安装) 或封闭空间(轮船、飞机和地面车辆)，测量精度、校准便利性、扫描速度和分析仪便携性都是非常重要的因素。利用具有简单自定义校准和快速测量扫描功能的 VNA (FieldFox 手持式分析仪可提供)，即可轻松完成这类测量。

使用 VNA 时，测量精度直接与用户端的校准类型和相关测试配置有关。测试配置包括用于连接和被测器件 (DUT) 与 VNA 的测试电缆和适配器。FieldFox 的校准类型包括内置校准 CalReady (仪器启用时即可使用) 和较为复杂的自定义校准，后者要求使用一组高质量校准件进行测量。

校准类型 (cal type) 的选择往往是测量精度、速度和校准过程复杂度的一种权衡。例如，图 1 是使用 FieldFox 两种不同的校准类型对一小段同轴电缆进行插入损耗测量的比较。黄色轨迹表示使用 QuickCal 进行电缆测量，蓝色轨迹表示使用了传统的全双端口机械校准。全双端口校准过程要求用户对各个高质量校准件建立七次连接，而 QuickCal 无需使用任何校准件。如图所示，两

种测量结果几乎没有差别。然而，QuickCal 的校准过程相当简单，外场操作非常便利。一般情况下，每种测试配置都要求在 FieldFox 和被测器件之间使用适配器和测试电缆，因而有必要了解 FieldFox 每种校准类型的应用与限制。本应用指南将会探讨 VNA 校准的最新进展，对比使用不同方法对各种射频与微波器件(包括电缆、滤波器和放大器) 进行校准后的测量结果。



图 1. 使用 FieldFox 矢量网络分析仪提供的传统全双端口校准 (蓝色) 和快速 QuickCal (黄色) 对同轴电缆进行测量的结果。

分析仪硬件配置

本节将会介绍分别用于测量单端口和双端口设备的不同FieldFox硬件配置。FieldFox手持式分析仪分为矢量网络分析仪(VNA)、电缆和天线测试(CAT)分析仪、频谱分析仪、组合分析仪(集VNA、CAT和频谱分析仪功能于一身)几个系列。FieldFox是一款专为外场测量做好准备的精密型仪器，符合美国军方MILPRF-28800F Class 2和MIL-STD-810G, M.511.5, P.1等标准，可在爆炸性环境中作业(通过典型测试)。Class 2类设备专为最恶劣的环境而设计，包括未受保护和不受控制的环境条件。作为VNA使用，FieldFox能够测量复杂的设备参数，如，单端口和双端口被测器件的反射和传输特征的幅度和相位。复杂的测量参数也被称为散射参数(S参数)，稍后再进行讨论。作为CAT分析仪使用，FieldFox可以测量被测器件的反射和传输特征，但只会报告幅度特征。VNA和CAT模式均包含创新的QuickCal，可消除连接到仪器上的任何测试电缆和适配器的效应，校正由于温度变化而产生的漂移误差。作为频谱分析仪使用，FieldFox是一款高性能接收机，能够测量已知和未知信号的频率分量(受到干扰和/或噪声的影响)。FieldFox频谱分析仪不仅具备台式频谱分析仪的功能，还提供独特的InstAlign特性，可在整个射频与微波频率范围内、-10°C至+55°C之间提供优化的幅度精度。本应用指南将继续重点介绍FieldFox的VNA测量和校准功能，CAT和频谱分析仪模式的有关信息可参见安捷伦应用指南[1]和[2]。



图2. 当使用带有(a)传输/反射(T/R)硬件和(b)全双端口硬件的分析仪对被测器件(DUT)进行测量时，网络分析仪的信号路径

网络分析仪硬件可以决定被测器件的测量方式: 使用传输/反射(T/R)硬件配置正向测量，或使用全双端口配置正向和反向测量。图2a显示了采用T/R硬件配置的FieldFox VNA的信号路径。使用T/R配置时，测试信号从分析仪的端口1发出，并且仅执行正向测量，作为输入端至被测器件的反射信号或通过被测器件的传输信号。在该配置中，反射信号在分析仪的端口1测量，正向信号传输在分析仪的端口2测量。使用T/R配置时，反向测量要求先断开被测器件，调转方向并重新连接。相比之下，图2b显示了采用全双端口硬件配置的VNA。此时，被测器件参数可正向和反向测量，无需旋转。分析仪中的开关矩阵可在端口1和2之间路由入射测试信号。除了提供双向测试的便利性以外，全双端口配置能够对测试系统的大部分系

统误差进行表征和消除，以获得最高的测量精度。

系统误差的表征是在自定义校准过程中完成，全双端口校准是最精确的VNA校准之一。本应用指南将会讨论和比较几种校准类型，包括全双端口校准、增强响应校准、响应(归一化)校准(精度略低，操作十分简单)。采用全双端口硬件的FieldFox VNA能够执行全部校准类型。采用T/R硬件的FieldFox仅能执行增强响应校准和响应(归一化)校准。

系统误差

系统误差是由测试电缆、适配器、分析仪元件的频率响应造成的，泄漏路径通常是在分析仪内部，被测器件和分析仪之间存在多次反射。作为自定义校准的一部分，系统误差可通过测量进行表征和消除。有些自定义校准仅能校正部分误差，由此导致被测器件的测量精度下降。图3对比了采用全双端口校准(黄色)和增强响应校准(蓝色)对同轴电缆的传输响应特性(S21)进行校准。全双端口校准能够对测试系统中的大部分系统误差进行校正，实现最高的测量精度。使用全双端口校准消除全部系统误差，要求在校准和被测器件测量过程中进

行正向和反向扫描。使用增强响应校准时，校准和被测器件测量仅需求单向扫描(正向或反向)，测量速度更快。增强响应校准无法校正所有的系统误差，因而精度逊于全双端口校准。如图3所示，使用增强响应校准会遗漏部分系统误差，测量频率范围会出现纹波。图3中的两种测量均采用FieldFox分析仪的创新型CalReady校准。CalReady是内置校准，无需用户手动校准。本应用指南将会讨论CalReady及其它FieldFox VNA校准类型，在精度、速度和校准复杂程度之间权衡。系统误差和VNA基础校准理论可参见安捷伦应用指南《网络分析仪基础知识》[3]。



图3. 使用FieldFox CalReady双端口校准和CalReady增强响应校准对同轴电缆进行测量的结果比较。

S 参数测量和显示格式

如前所示，VNA 能够测量和显示被测器件的反射和传输属性，也称为分布参数(S 参数)。S 参数是被测信号与入射信号的简单比值。FieldFox VNA 内含所有用于测量和计算信号比值的适用硬件，操作人员只需熟悉 S 参数定义以及参数与特定器件技术指标的关系即可。图 4 显示了双端口被测器件的 S 参数定义。单端口器件只有一个 S 参数，而双端口器件有四个 S 参数。用户可以决定哪个被测器件端口是端口 1 或 2，通常也要考虑被测器件的既定操作。例如，放大器的输入端可定义为端口 1，输出端定义为端口 2。由此，放大器的正向传输参数就是从端口 1 向端口 2 转化的增益。在图 4 中，S11 参数定义为被测器件端口 1 的反射系数。S22 参数定义为被测器件端口 2 的反射系数。S21 是从端口 1 至端口 2 的正向传输参数，S12 是反向传输参数。

对于大多数无源器件(同轴电缆、滤波器、波导元件、耦合器和功分器等)，正向传输参数 S21 等同于反向传输参数 S12，即， $S21 = S12$ 。这类被测器件被称为“双向”。放大器、循环器以及大部分有源器件(包括半导体和铁氧体)都是“单向”。单向器件的正向传输(例如放大器增益)不等同于反向传输(例如放大器的反向隔离)，即， $S21 \neq S12$ 。在选择增强响应校准时——本应用指南稍后介绍——了解器件属于双向还是单向十分重要。对于全部的器件类型，正向反射系数 S11 和反向反射系数 S22 一般不相等。图 5 显示了 FieldFox VNA 采用全双端口配置对 13-GHz 带通滤波器的 4 个 S 参数进行测量。如前所述，全双端口配置允许通过分析仪的单次

连接测量全部 4 个 S 参数。S11 和 S22 反射参数在 5 至 18 GHz 频率范围内的响应略有不同。双向器件(例如无源滤波器)的 S21 和 S12 具有同等响应。在图 5 的测量中，使用最精确的全双端口校准对 FieldFox 进行校准。4 个 S 参数测量结果均采用典型

的“LogMag”格式显示，Y 轴是分贝(dB)。使用 VNA 测得的 S 参数是复值，可转换为多种显示格式，其中包括线性幅度、VSWR、史密斯图、极性、相位、群时延、实部和虚部。FieldFox 能够管理所有必要的计算结果并恰当地显示指定格式。

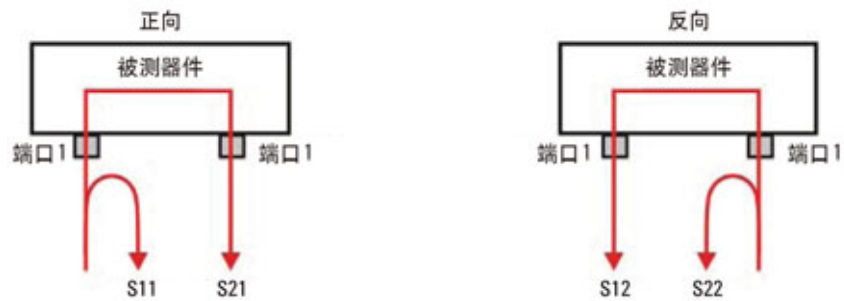


图 4. 被测双端口器件(DUT)的 S 参数定义

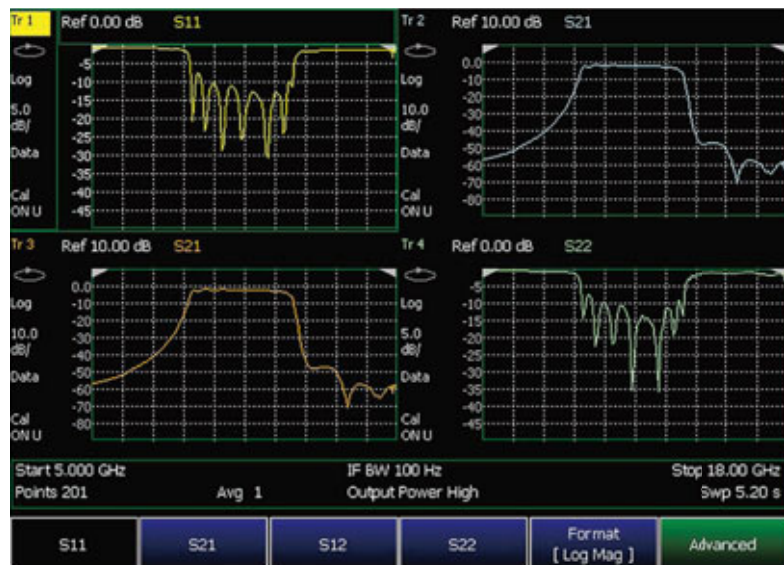


图 5. 13-GHz 带通滤波器的 S 参数

S 参数测量和显示格式

S 参数是相对测量，理论上与功率电平无关。例如在测量一条理想的短路传输线的 S11 参数时，反射信号与入射信号的比值具有 1 或 0 dB 的线性幅度 ($=20\text{LOG}(|S_{11}|)$)。入射信号的功率为 1 皮瓦或 100 W 时，短路线的 S11 测量值是相同的。这一点适用于无源器件的 S 参数测量。在放大器测量中，如果放大器开始进入饱和状态，那么 S 参数取决于入射功率。在本应用指南中，假设放大器是在小信号或非饱和模式中工作，增益在一定的入射功率范围内保持不变。

在测量放大器和其它对输入功率电平敏感的器件时，FieldFox 测试端口功率经过调整后可以优化测量精度，避免有源器件和分析仪中出现过载。FieldFox VNA 的入射功率(测试端口)电平有三种模式——高输出功率、低输出功率和手动设置功率。FieldFox 的默认设置是高输出功率，它将实现最高的测量精度和动态范围，而低功率或手动设置适用于测量高增益放大器或任何对驱动功率敏感的器件。图 6 显示了测试端口功率与显示动态范围的关系。该图对比了使用高输出功率设置(黄色轨迹)和低输出功率设置(蓝色轨迹)对 13-GHz 带通滤波器的 S21 进行测量。在滤波器的中心通带内，S21

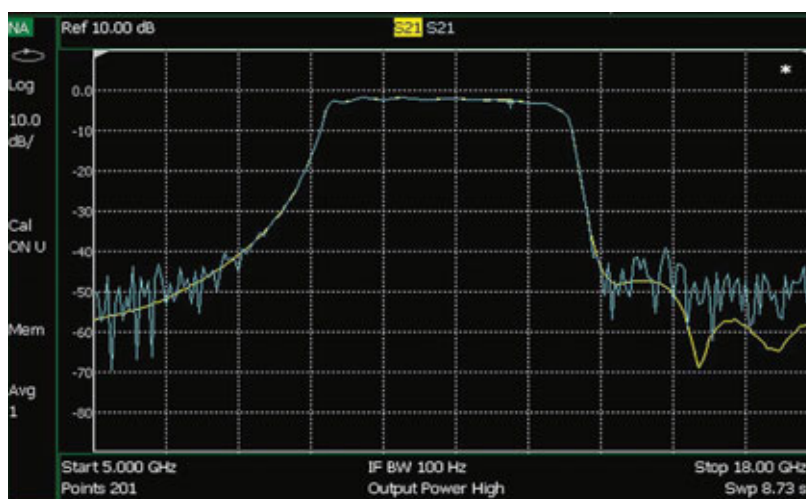


图 6. 采用 FieldFox 高输出功率设置(黄色)和低输出功率设置(蓝色)对 13-GHz 带通滤波器响应进行测量的比较。

测量是相同的，但在使用低功率设置时，噪声明显高于阻带。FieldFox 接收端的低信噪比会导致本底噪声增加，滤波器降低了阻带的信号电平。在低 SNR 条件下，FieldFox 的中频带宽可以降低，以改进分析仪的本底噪声。中频带宽在 10 Hz 至 100 kHz 之间调节。高输出功率设置可实现最高的动态范围和精度，以及最低的中频带宽设置值。测试端口功率和中频带宽的优化，请参见 FieldFox 用户指南。S 参数和网络分析仪理论的其它信息，请参见以下安捷伦参考资料[3]。

FieldFox 测试端口的校准

FieldFox 提供自定义校准，消除了位于 VNA 和被测器件之间的测试电缆和适配器的效应。如前所示，自定义校准也能校正 VNA 中的系统误差。操作人员定期执行此类自定义校准，与常规性年度仪器校准无关。仪器年度校准是一种可追溯的过程，通常是由安捷伦等经过认证的测试实验室执行，确认该仪器操作符合规定的技术指标。仪器年度校准通过 NIST、NPL 或 BIPM 等国家计量院追溯至国际单位制 (SI)。借助可完全追溯到某标准的仪器校准，FieldFox 能够在测试端口上执行极其精确的测量。实际上，不同的测试要求可能导致各种测试电缆和适配器与 FieldFox 连接。一般来说，测量最好不要涉及电缆和适配器的效应。在这种情况下，FieldFox 支持(使用或不使用校准套件)自定义校准，以便在测试电缆和适配器的远端建立校准面。熟悉 VNA 的操作人员对上述自定义校准类型较为了解。下面章节将会回顾 FieldFox 的不同校准类型。

几种自定义校准都能精确地测量元器件和系统的 S 参数。前文主要介绍了 CalReady、QuickCal 和机械校准。机械校准是传统的 VNA 校准方法，需要使用高质量的校准套件。创新的 CalReady 和 QuickCal 不需要这种套件。对于所有的校准类型，任意额外的测试电缆和适配器都应该相位稳定、质量可靠，且能保持很好的工作状态，以便提高测量数据的精度和可重复性。

CalReady

FieldFox 的最简单校准是 CalReady。CalReady 校准无需任何用户操作，在仪器接通电源或重置时即可执行。工厂在 FieldFox 的完整频率范围内执行内置校准，并对其测试端口进行内置校准，如图 7a 所示。当被测器件直接与 FieldFox 的测试端口连接时，CalReady 具有最高的测量精度。如图 7b 所示，当同轴电缆在 FieldFox 的端口 1 和 2 之间直接连接时，CalReady 非常适合测量电缆的性能。值得注意的是：FieldFox 测

试端口均配备 N 型阴头连接器或 3.5 mm 阳头连接器 (用于 26.5 GHz 微波型号)，因此，电缆和 FieldFox 之间连接的任意适配器的电气特征也是测量的一部分。图 7c 显示了双端口被测器件的典型测试配置，它要求使用一条短的测试电缆和两个适配器，以连接 FieldFox。由于校准面位于 FieldFox 的测试端口上，测试电缆和适配器可作为 S 参数测量的一部分。其它的校准类型 (QuickCal 和机械校准) 能够消除测试元件的效应。本应用指南将会稍后介绍。



图 7. FieldFox CalReady 的校准和测试配置

FieldFox 测试端口的校准

CalReady

CalReady 可配置为全双端口校准或增强响应校准。如图 3 所示，CalReady 和其它全双端口校准通过正向和反向测量被测器件，移除 S 参数中的所有系统误差，即可实现最高的测量精度。采用增强响应校准的 CalReady 仅要求单次测量扫描(正向或反向)，从而改进整体测量时间(与全双端口校准相比)。增强响应校准的缺点是精度较低，只有一部分系统误差经过了校正。当 FieldFox 接通电源或预置时，默认是增强响应校准类型。

在特定环境中，当被测器件是双向器件，且 FieldFox 配置为双向增强响应校准类型时，可以提高增强响应校准的测量精度。如前所述，双向被测器件的正向和反向传输参数是相等的(即， $S_{21} = S_{12}$)。这一点适用于所有的无源器件，例如电缆、适配器、耦合器和滤波器等。图 8 对比了采用增强响应校准和全双端口校准的 CalReady 的测量结果。被测器件是一条短的同轴电缆，直接连接至 FieldFox 测试端口，测量参数为 S11。上方的黄色轨迹显示了使用增强响应校准时的响应，被测器件是单向的。下方的黄色轨迹显示了使用增强响应校准时的测量结果，被测器件是双向的。下方的蓝色轨迹显示了使用全双端口校准时的测量结果。从图中可以看出，采用双向定义的增强响应校准与全双端口校准几乎等同。采用单向定义的增强响应并非如此精确。值得注

意的是：如果单向的被测器件(放大器)采用双向定义，那么测量结果可能不正确。相比之下，为双向被测器件选择单向定义能够生成正确的测量结果，只是精度略低(如图 8 所示)。如有疑问，可将默认设置设为单向，测量结果会十分可靠。总之，CalReady 增强响应和 CalReady 全

双端口的校准术语会在工厂中进行表征，并保存到 FieldFox 的内部。单向和双向定义都属于数学方法，用于处理仪器中的系统误差校正过程。表 1 对比了增强响应校准和全双端口校准的相对精度和测量时间。本表格适用于采用增强响应和全双端口校准的 CalReady 及其它机械校准类型。

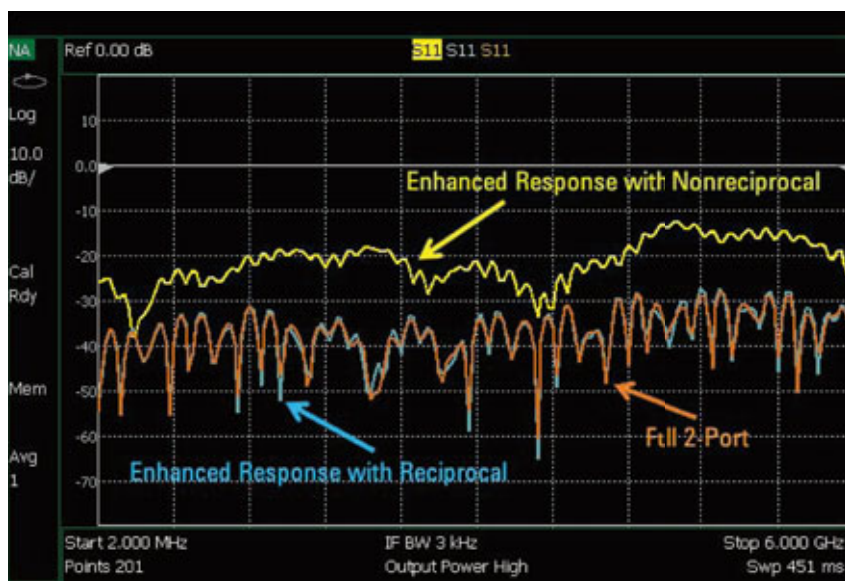


图 8. 使用全双端口校准和增强响应校准对同轴电缆进行测量的结果比较(被测器件采用双向和单向定义)。

表 1: CalReady 增强响应校准和 CalReady 全双端口校准的相对精度和测量时间比较。

CalReady 校准类型	精度	测量时间
增强响应 — 单向	好	最佳
增强响应 — 双向 (要求被测器件的 $S_{21}=S_{12}$)	更好	最佳
全双端口	最佳	好

FieldFox 测试端口的校准

QuickCal

测试配置一般要求使用额外的测试电缆和适配器，将 VNA 连接到被测器件，类似于图 7c 中的配置。为了移除测试电缆和适配器的效应，FieldFox 必须接受自定义校准，在远离 VNA 的位置建立校准面，且与被测器件连接。自定义校准通常需要使用一套包含高品质同轴或波导标准件的“校准套件”，VNA 在校准过程中对其进行测量。FieldFox 提供创新的自定义校准技术 QuickCal，无需使用校准套件。QuickCal 引用内置 CalReady 校准术语，提供精确的 S 参数测量，以消除测试电缆和适配器(连接到 FieldFox 测试端口)产生的系统误差。QuickCal 还能校正由于仪器、测试电缆和适配器的温度变化而产生的漂移误差。测量有可能在室内或室外进行，环境也随之快速变化。因而，温度变化校正在外场操作中非常重要。QuickCal 不支持(仪器测试端口和校准面之间)信号路径中的衰减器和单向器件。

QuickCal 分为简单的两步，需要分别对开放式测试电缆或适配器以及 THRU 连接进行测量扫描。它适用于双端口测量。单端口测量仅需进行开放式扫描。QuickCal 不必使用任何的校准件。图 9a 显示了在 FieldFox 中执行两步骤的 QuickCal。如图所示，第一步是打开适配器和/或测试电缆。无需使用机械校准中的 OPEN 校准件。第二步是直接连接两个测试端口，THRU 连接可能需要也可能

不需要使用适配器。适配器不一定属于校准的一部分，有时候也可作为被测器件。有关“未知直通”的更多要求，请参见本应用指南的下一章节。值得注意的是：测试电缆和适配器必须保持高度的相位稳定性，否则校准就会不精确和/或不稳定。

一旦 QuickCal 的两个步骤结束，被测器件测量不包括测试电缆和适配器的效应。图 9b 是双端口被测器

件测试的典型连接图。校准面现在向被测器件平面移动，测试电缆和适配器离开 S 参数测量。应当注意的是：如果被测器件的 S11 或 S22 低于 -15 dB，通过测量可选的 LOAD 标准，可以改善被测器件的测量精度。理想情况下，LOAD 标准与被测器件采用相同的连接器类型，不是“校准套件”。LOAD 具有合理的回波损耗，可以改进测量精度。

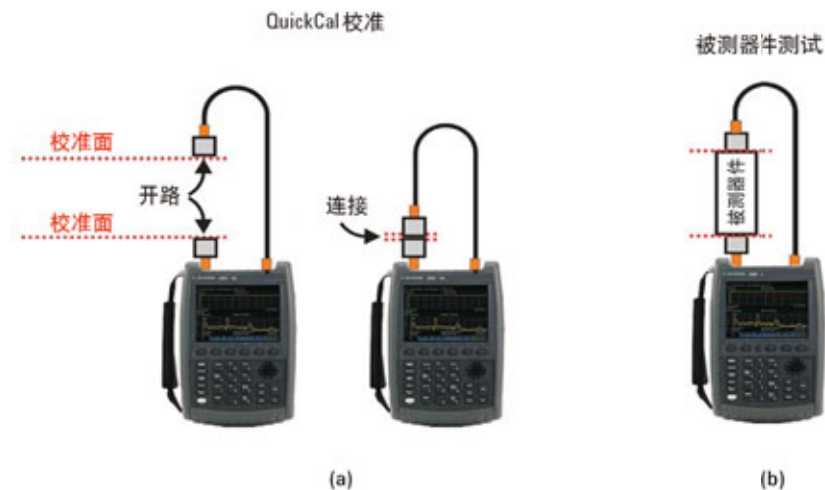


图 9. 测试配置适用于 (a) QuickCal 对 FieldFox VNA 和相关测试电缆和适配器进行快速校准，(b) 在 QuickCal 校准面上进行测量时所需的被测器件连接

FieldFox 测试端口的校准

QuickCal

使用单端口和双端口被测器件进行 QuickCal 校准。单端口被测器件要求校准和测量 S11 或 S22。对于单端口器件，QuickCal 只需执行开放式测量扫描，可选的 LOAD 实现更高的精度。对于双端口被测器件，QuickCal 遵循先前提到的步骤，但可作为全双端口校准和增强响应校准。推荐使用精度更高的全双端口校准，但当测量速度为优先时，选择增强响应校准。增强响应校准仅需执行正向或反向测量。全双端口校准要求执行正向和反向测量，因而，测量扫描时间略长。

图 10 对比了使用 CalReady 和 QuickCal 校准的带通滤波器的 S21 测量。两种校准均采用全双端口校准类型。由于采用 CalReady 的滤波器测量中包括测试电缆的插入损耗，S21 的数值偏低 (类似于图 7c 的配置)。在本例中，测试电缆的损耗会导致滤波器具有更高的插入损耗。由于采用 QuickCal 的滤波器测量消除了测试电缆的插入损耗，因而能够执行适当的插入损耗测量 (类似于图 9b 的配置)。

可插入器件的校准

双端口被测器件可以归类为“可插入”器件或“不可插入”器件。可插入器件使用同类型的连接器，只是连接器的属性不同，例如，被测器件端口 1 上的 N 型阳头连接器和端口 2 上的 N 型阴头连接器。在本例中，FieldFox 及其测试电缆在测量端口上使用属性相反的连接器的，从而直接将器件连接到 FieldFox，无需任何适配器。该配置还允许在 THRU 中直接连接 FieldFox 测试端口。图 11 显示了采用 N 型

连接器的可插入器件的校准和测试配置。图 11a 显示了在使用 FieldFox VNA 和采用 N 型连接器 (属性相反) 的单个测试电缆时，校准面的位置。校准面所处的位置是 QuickCal 需要开放式连接器的位置。选择机械校准时，校准面所处的位置是校准套件标准件连接的位置，通常与 QuickCal 的相同。对于任意一种校准，THRU

连接无需使用适配器，校准面是在被测器件端口上建立。图 11b 显示了可插入被测器件与 FieldFox 测试设置的连接。

在 FieldFox 分析仪中，QSOLT 是用于可插入器件的双端口校准算法。它仅需要 4 次连接 (单端口校准和直通测量)，精度非常高。

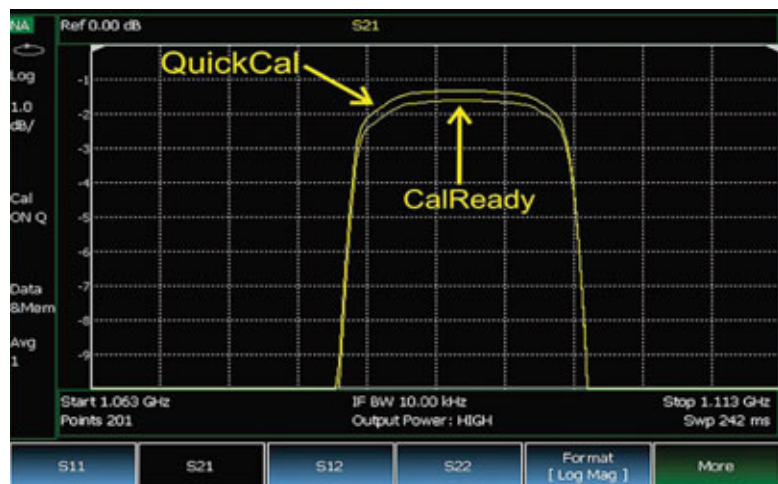


图 10. 使用 CalReady 和 QuickCal 校准的带通滤波器的 S21 测量比较

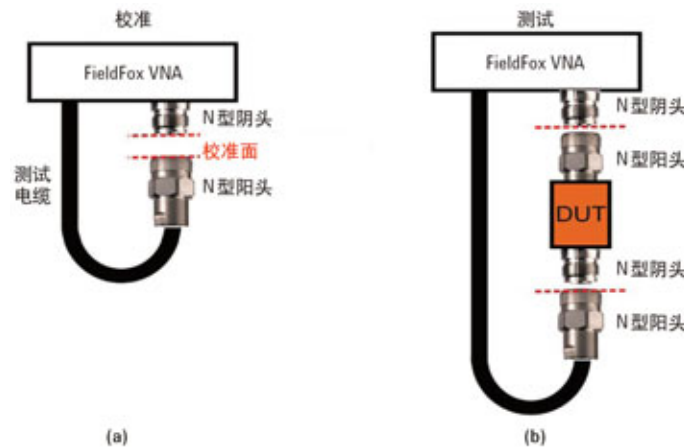


图 11. “可插入”器件的 (a) 校准和 (b) 测量配置

FieldFox 测试端口的校准

使用未知直通技术校准不可插入器件

不可插入器件采用属性相同或不同的连接器类型，例如在一个端口上使用同轴连接器，在另一个端口上使用波导连接器 (QuickCal 不支持波导连接器)。

使用全双端口校准时，不可插入器件在 THRU 步骤中需要使用适配器。理想情况下，适配器采用与被测器件相同的连接器和属性。传统上，使用 VNA 测量不可插入器件时，全双端口校准中的 THRU 适配器的电延迟必须精确定义，或者采用包含多个校准的复杂校准流程 [3]。FieldFox VNA 提供“未知直通”校准技术以及任何用于连接测试端口的电缆或适配器。未知直通适用于任何与被测器件具有相同连接器配置的器件。它的电气长度较长，接近于同轴电缆的长度。如果频率范围内的插入损耗低于 40 dB，且被测器件是双向器件，未知直通可作为被测器件使用。图 12a 显示了在使用未知直通时，FieldFox VNA 的校准配置。在本例中，适配器的两个端口上都采用 N 型阴头连接器，以便匹配不可插入被测器件的连接器。FieldFox 提供 N 型阴头连接器，因而在本例中，测试电缆和适配器必须将 FieldFox 测试端口转换为 N 型阳头连接器。如图所示，校准面位于 N 型阳头连接器的两端，通过 QuickCal 的“开路端”或是机械校准的校准套件标准件。一旦未知直通校准结束，即可精确地测量不可插入被测器件，不必考虑 THRU 适配器的影响。图 13 显示了波导至同轴适配器的 VSWR 测量。如果不可插入被测器件使用不同的连接器类型，采用未知直通技术的全双端口校准将

提供最高的测量精度。在本例中，配有选件 012 X 频段同轴波导适配器的 Agilent X281C (如图所示) 是在 7 至 13.8 GHz 频率范围内接受测量。使用 N 型和波导机械校准件来实施全双端口校准。

在校准过程中，被测器件作为未知直通插入。FieldFox 支持 X 频段、P 频段和 K 频段校准套件。有关波导频段和镶条的更多信息，请参见参考资料 [4]。

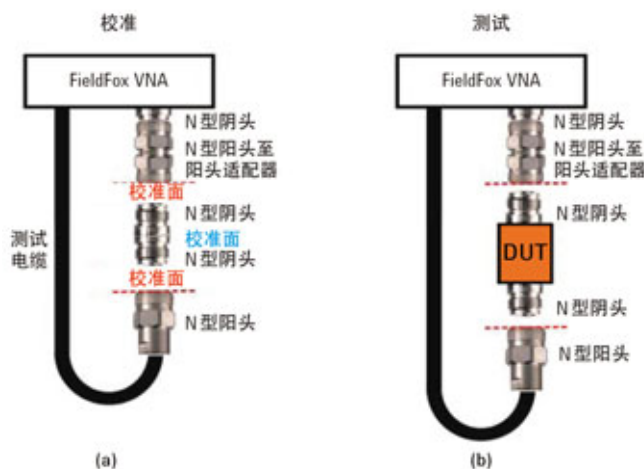


图 12. 使用未知直通技术对分析仪进行校准、测量“不可插入”器件时的测试配置



图 13. 使用未知直通技术对 X 频段同轴波导适配器的 VSWR 进行测量

机械校准

在 FieldFox 上实施校准时，CalReady 和 QuickCal 的主要优势是无需校准套件，从而使仪器外场校准变得相当简单和快速。如需最高的测量精度，推荐选择传统的机械校准。使用在高质量校准套件中的离散校准件进行机械校准。校准套件标准件具有定义明确的特征，标准件的测量允许 VNA 从数学角度上确定测试系统中 (分析仪、测试电缆和适配器) 的系统误差。校准套件适用于安捷伦连接器系列，包括 N 型 (50 Ω 和 75 Ω)、7/16、3.5 mm、F 型、7 mm、TNC，以及几个波导套件 (包括 X 频段、P 频段和 K 频段)。

校准套件中的标准件一般包括开路、短路和负载 (O、S、L)。O、S、L 的定义对于每个连接器和属性都是唯一的。定义内置于 FieldFox 中，在引导式校准过程中，针对每个测试端口选择连接器的类型和属性。根据所选的 S 参数和被测器件连接器配置，FieldFox 推荐使用一种专为速度和精度而优化的校准类型。用户根据自身对于精度和测量时间的偏好，可以更改校准类型。表 2 列出了 FieldFox 的机械校准类型。它总结了每种类型的相对精度和校准速度。有的测量仅需正向或反向扫描 (例如增强响应和归一化)，而有的测量则要求正向和反向扫描 (例如全双端口和 QSOLT)，因而测量速度与校准速度有关。

全双端口校准

全双端口校准是最全面的机械校准。图 14a 显示了使用传统的全双端口校准对 FieldFox 进行校准的步骤，每个测试端口都要连接开路、短路和负载标准件。如图所示，全双端口校准的第一步是建立 6 个连接，每个测试端口上是 3 个连接。对每个标准件执行单次正向或反向扫描。第二步是 THRU，此时，两个测试端口连接在一起。对 THRU 执行正向和反向扫描。在建立了 7 个连接之后，校准完成，校准面设在测试端口的末端。图 14b 是连接至两个测试端口上的被测器件的测量配置。

FieldFox 提供两种创新的技术，以提高机械全双端口校准的精度和校准速度。第一项技术在前文中早已提到，即，在机械校准过程中使用未知直通技术。如前所述，未知直通技术显著降低了不可插入被测器件的校准复杂程度。第二项技术是全双端口 QSOLT。QSOLT 既能维持高精度，也能更快速地执行全双端口校准。QSOLT 无需在测试端口 2 上测量 O/S/L 标准，因而缩减了校准套件标准件的测量步骤。QSOLT 的唯一要求是测试端口电缆必须相互匹配 (不必使用适配器)，或是说，被测器件必须可以插入。

表 2: 使用 FieldFox VNA 的机械校准时的相对精度和校准时间比较

校准类型	精度	校准速度
全双端口	最佳	差
QSOLT 全双端口	最佳	更好
增强响应	好	最佳
响应 (归一化)	差	最佳
单端口 (仅限单端口被测器件)	最佳	更好

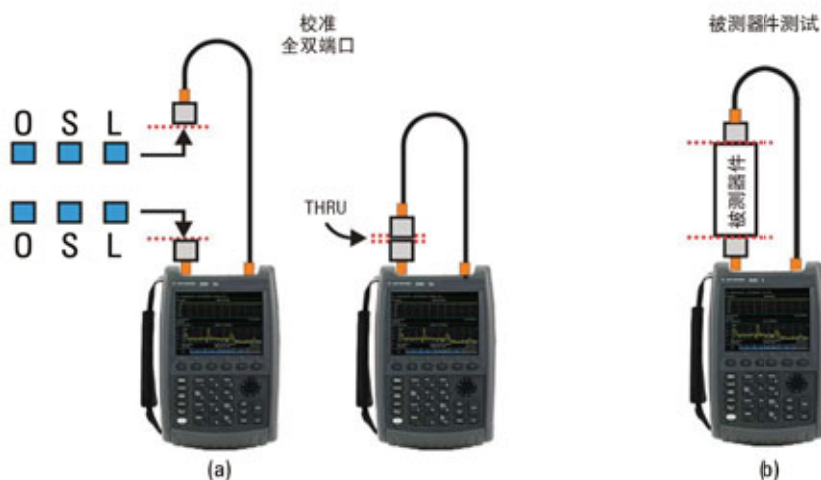


图 14. 测试配置，适合 (a) 要求使用开路、短路和负载 (O、S、L) 校准件的全双端口校准和 (b) 在校准面上进行测量时所需的被测器件连接

机械校准

全双端口校准

图 15a 显示了使用全双端口 QSOLT 校准对 FieldFox 进行校准时的步骤。如图所示，第一步是将开路、短路和负载标准件连接至测试端口 1。对每个标准件执行单次扫描。第二步是 THRU，此时，两个测试端口连接在一起；无需使用适配器。对 THRU 执行正向和反向扫描。测试端口 2 的校准面是在 THRU 完成测量后建立。上述步骤完成后，校准面也已完成，校准面设在测试端口的末端，测量精度与传统的全双端口校准类似。图 15b 是连接至两个测试端口上的被测器件的测量配置。被测器件的测量要求正向和反向扫描，以便彻底消除所有与 S 参数有关的系统误差。

增强响应校准

当用户需要较快的测量速度和较低的测量精度时，增强响应机械校准更适合对正向响应 (S11、S21) 或反向响应 (S12、S22) 进行测量。增强响应机械校准的功能与 CalReady 类似，不同之处是，前者要求对 O/S/L 校准件进行测量。CalReady 将校准面设在 FieldFox 连接器上，而增强响应机械校准把校准面设在被测器件的接口上，由此获得更高的测量精度。增强响应校准过程与图 15a 中的 QSOLT 相同。增强响应校准的主要特点是：仅在单方向上执行校准和测量 (正向或反向)。

增强响应校准会加快测量速度，但单向测量会产生不正确的系统误差，从而降低总体测量精度。

在使用正向增强响应或反向增强响应时，选择增强响应校准。顾名思义，正向校准仅提供 S11 和 S21 测量，反向校准仅提供 S12 和 S22 测量。值得注意的是：用于单向和双向器件的选项仍旧有效。本应用指南在之前的 CalReady 章节中已经介绍过这些选项。

图 16 对比了使用 QSOLT 校准 (上方的黄色轨迹) 和正向增强响应校准 (下方的蓝色轨迹) 对 2 至 18 GHz 低噪声放大器进行增益测量。尽管这两种机械校准类型几乎完全相同，但使用增强响应校准得到的增益响应有着更多的纹波，这是由不正确的系统误差造成的。图 16 中，由于被测器件是一个放大器，增强响应校准有关的测量需要使用单向选项。在放大器测试中，测试端口输出功率通过手动调节可降低至 -35 dBm，防止放大器达到饱和。

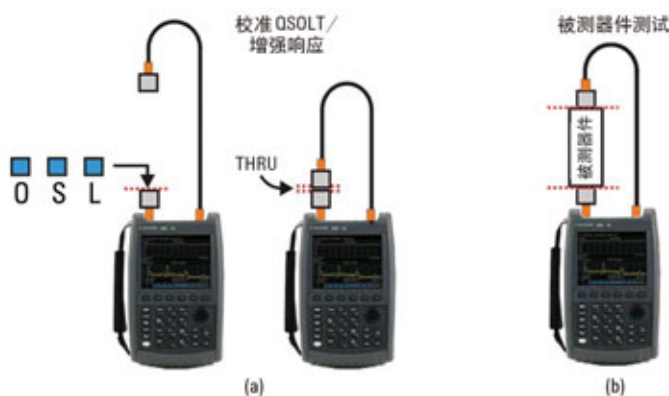


图 15. 测试配置，适合 (a) 要求使用开路、短路和负载 (O、S、L) 校准件的全双端口 QSOLT 校准和正向增强响应校准 (b) 在校准面上进行测量时所需的被测器件连接

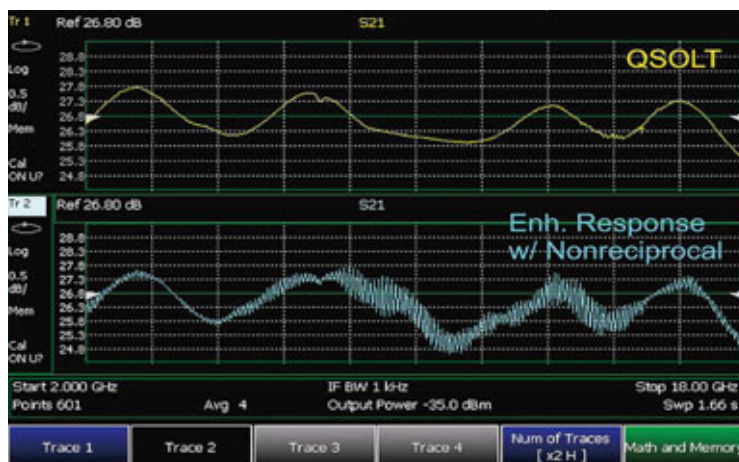


图 16. 对比了使用全双端口 QSOLT 校准 (上方轨迹) 和采用单向定义的增强响应校准 (下方轨迹) 对 2 至 18 GHz 低噪声放大器进行增益测量

机械校准

单端口 OSL 和响应 (归一化) 校准

单端口 OSL 适用于单端口被测器件的反射测量。例如，单端口被测器件可以是天线、端子或检测器。单端口 OSL 校准可用于 VNA 的测试端口 1 或 2，具备最高的测量精度。单端口 OSL 机械校准过程要求对测试端口上的开路、短路和负载标准件进行测量。

响应或归一化校准非常简单，但只能校正很小一部分系统误差，因而精度很低。响应校准本质上属于归一化测量，其中，参考轨迹保存在存储器中，后续的测量数据被这条存储器轨迹分隔开。这种校准适合快速检查被测器件的操作，不考虑测量精度。在大多数情况下，内置 CalReady 校准是更好的选择。

校准向导

FieldFox 是功能强大的微波 VNA，当采用 CalReady 和 QuickCal 校准时可提供精确的自定义校准，无需使用校准套件。当外场使用校准套件时，FieldFox 还可提供机械校准。无论是使用 QuickCal 还是机械校准，FieldFox 提供自定义校准的逐步指导，内置了引导式校准(称为“校准向导”)。校准向导显示了标准类型和每一步骤的相应端口连接。例如，使用 QuickCal 对 FieldFox 进行校准时，第一步是打开端口 1，第二步是连接负载(可选)。在每个步骤中，用户都应按下“测量”按键，以执行测量扫描。一旦所有的标准均已测量，校准向导会应用误差校正，并把仪器显示屏切换为测量屏幕。

根据所选的 S 参数和被测器件连接器类型，校准向导会推荐一种校准类型，提供快速校准和高精度测量。如果 FieldFox 测量的是单个 S 参数(例如 S11)，且选择了机械校准，校准向导就会推荐单端口 OSL 校准，并引导用户将开路、短路和负载校准套件标准件连接至 VNA 的端口 1。也可选择其它的校准类型。经验丰富的用户可能不会使用推荐校准类型，而是根据特定的测量需求和精度来选择。图 17a 显示了在选择机械校准类型时的校准向导显示屏。尽管校准向导推荐的是全双端口校准，但用户可以选择其它任意的校准类型，包括增强响应和 QSOLT。

自定义校准需要注意的一点是：在测试配置中，必须正确地输入被测器件的连接器类型。通过输入被测器件的连接器及其属性，校准向导能够推荐最佳的校准类型，确保 VNA 能够在误差校正过程中使用适当的连接器型号。图 17b 显示了正在输入连接器类型及其属性。在本例中，被测器件是采用 3.5 mm 阳头连接器的单端口器件。根据校准向导的指示选择校准套件的型号。

校准向导提供详细的指导、连接图和灵活性操作，改善分析仪校准的精度和速度，因而是新老用户的最佳选择。校准向导是 VNA 和 CAT 测量模式的一部分，适用于 FieldFox 所有的射频与微波型号。



图 17. FieldFox 校准向导显示屏显示了 (a) 选择校准类型和 (b) 选择被测器件连接器类型

结论

本应用指南介绍了矢量网络分析仪校准的最新进展。外场手持式微波分析仪 FieldFox 的专有校准技术 CalReady 和 QuickCal，可提供高测量精度，避免携带校准套件的麻烦。针对 FieldFox 中的许多校准选件的校准程序和测量结果进行了比较。



FieldFox 手持式分析仪可在外场测试环境中提供与台式仪器媲美的精度和符合军用标准的耐用性，覆盖了卫星通信、微波回程、军用通信、雷达系统和许多其它应用。

参考资料

- [1] 在外场执行精密干扰测量的技巧，应用指南 (5991-0418EN)
- [2] 在外场执行精密电缆和天线测量的技巧，应用指南 (5991-0419EN)
- [3] 安捷伦网络分析仪基础知识，5965-7917E。
- [4] 安捷伦射频与微波测试附件、波导附件，传单。

随时随地进行精确测量

外场套件中的每一件工具都必须证明其具有不可替代的作用。FieldFox 分析仪的设计理念是帮助我们的客户轻松进行外场测量。它们适用于常规维护、深入故障诊断等。更重要的是，无论用户需要到什么地方工作，FieldFox 都能执行出色的测量，体现安捷伦仪器的卓越品质。将 FieldFox 加入工具箱中，您可以随时随地进行精确测量。

相关文献	编号
FieldFox 组合分析仪, 技术概述	5990-9780EN
FieldFox 微波频谱分析仪, 技术概述	5990-9782EN
FieldFox 微波矢量网络分析仪, 技术概述	5990-9781EN
FieldFox 手持式分析仪, 技术资料	5990-9783EN
FieldFox 手持式分析仪, 配置指南	5990-9836EN
FieldFox N9912A 射频分析仪, 技术概述	5989-8618EN
FieldFox N9912A 射频分析仪, 技术资料	N9912-90006
FieldFox N9923A 射频矢量网络分析仪, 技术概述	5990-5087EN
FieldFox N9923A 射频矢量网络分析仪, 技术资料	5990-5363EN

如欲下载其它应用指南、观看视频以及了解更多信息，请访问：

www.agilent.com/find/FieldFox

www.agilent.com
www.agilent.com/find/FieldFox

如欲获得安捷伦科技的产品、应用和服务信息，请与安捷伦公司联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：

www.agilent.com/find/contactus

请通过 Internet、电话、传真得到测试和测量帮助。

热线电话: 800-810-0189, 400-810-0189
热线传真: 800-820-2816, 400-820-3863

安捷伦科技(中国)有限公司

地址: 北京市朝阳区望京北路3号
电话: (010) 64397888
传真: (010) 64390278
邮编: 100102

上海分公司

地址: 上海市虹口区四川北路1350号
中信泰富申虹广场5楼、16-19楼
电话: (021) 36127688
传真: (021) 36127188
邮编: 200080

广州分公司

地址: 广州市天河北路233号
中信广场66层07-08室
电话: (020) 38113988
传真: (020) 86695074
邮编: 510613

成都分公司

地址: 成都高新区南部园区
天府四街116号
电话: (028) 83108888
传真: (028) 85330830
邮编: 610041

深圳分公司

地址: 深圳市福田区
福华一路六号免税商务大厦3楼
电话: (0755) 83079588
传真: (0755) 82763181
邮编: 518048

西安分公司

地址: 西安市碑林区南关正街88号
长安国际大厦D座5/F
电话: (029) 88867770
传真: (029) 88861330
邮编: 710068

安捷伦科技香港有限公司

地址: 香港北角电气道169号25楼
电话: (852) 31977777
传真: (852) 25069292

香港热线: 800-938-693

香港传真: (852) 25069233

E-mail: tm_asia@agilent.com

本文中的产品指标和说明可不经通知而更改

©Agilent Technologies, Inc. 2013

出版号: 5991-0421CHCN

2013年9月 印于北京



www.agilent.com/find/myagilent
个性化视图为您提供最适合自己的信息！

安捷伦渠道合作伙伴

www.agilent.com/find/channelpartners
黄金搭档: 安捷伦的专业测量技术和丰富产品
与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。



安捷伦优势服务

www.agilent.com/find/AdvantageServices
确保在仪器生命周期内进行精确测量。



www.agilent.com/quality



Agilent Technologies