

覆盖70kHz至220GHz的 集成矢量网络分析仪的设计

Design of an Integrated VNA Covering 70 kHz to 220 GHz

作者：Jon Martens、Tom Roberts，安立公司；Andrej Rumiantzev、Koocho Jung，MPI公司
译者：陈刚，安立中国

随着毫米波频率的广泛应用，通信设备和系统的建模也在紧锣密鼓地进行。这就需要更高频率的测量设备和手段，而这也困难重重。除了常规的S参数外，还有其他需要在宽频率范围内测量的参数，如增益压缩、互调失真和频率转换特性等。例如使用波导等频率选择性的仪器在高频还可以工作，但是设置和校准会非常耗时，而且这类仪器在不同频段的不确定度也不尽相同，将数据拼接在一起也会导致测量的不连续性。

安立公司推出的宽带矢量网络分析仪（VNA）能够覆盖从低频到最高220GHz的频率范围，并配有相应的探针，可以解决许多测量难题。这样的VNA不仅需要具有足够的输出功率和可控的倍频器，而且需要具有良好的噪声性能和足够线性度的下变频器，还需要能够覆盖宽频范围的多路复用的源和接收机以及能够覆盖整个频率范围的在片测量的宽带连接系

统。本文着重阐述了为了设计满足所需的稳定性、噪声特性、线性度和功率大小的宽带矢网所面临的设计挑战和技术要点。

测量需求

宽带S参数和其他微波参数的测量是许多模型建模过程的核心^[1-6]。在其他情况下，微波参数用于表征器件建模中的寄生参数。在这两种情况下，最基础的测量数据的准确与否对于整个模型性能和描述分析都是非常重要的。为了进一步确保测量的准确性，对探针到设备或子系统进行去嵌入操作通常是必要的。常常需要对纯净的小信号进行测量，那就要求良好的线性度，包括压缩性（AM/AM和AM/PM）、谐波抑制、互调失真、相邻信道功率抑制和其他参数。这些准线性或非线形参数可能是完整非线性建模模型的一部分，或可用于基本参数表征。其中一些参数可能只能在子系统中调用，

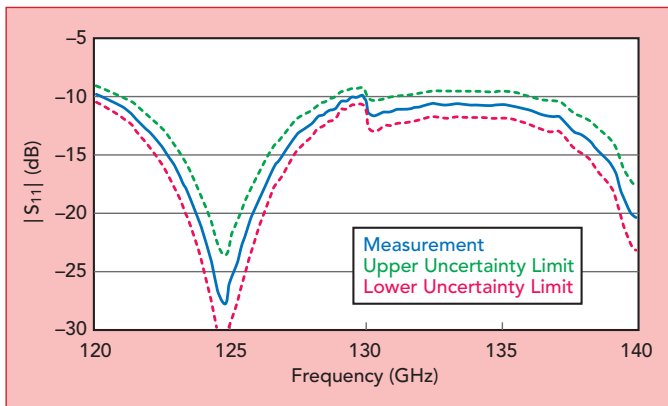


图1：在测量设备切换交界处出现的数据拼接突变。

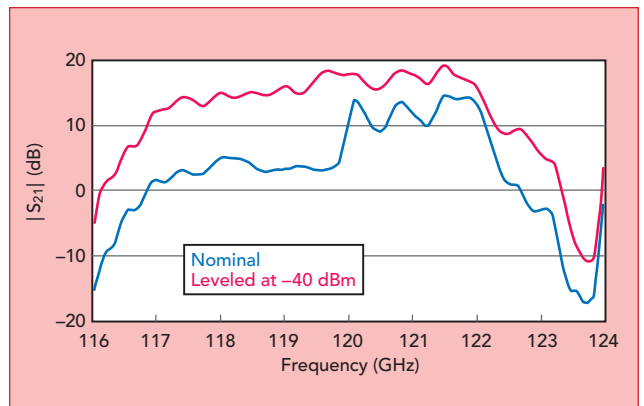


图2：不同功率驱动120GHz LNA，其中标称电平条件下出现了压缩。

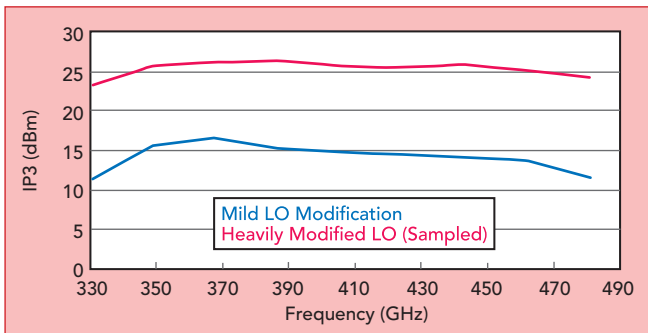


图3: 两种具有相同谐波数、不同本振设计的毫米波接收机的三阶截点图。

而在其他系统中使用别的参量,如频率转换(增益和相位)和调制失真。而这其中最为重要的是,需要在一个非常宽的频率范围内进行测量分析,而所用仪器本身的线性度并不会极大地影响测量结果。

技术难点

F波段(90至140 GHz)以上的测量面临几个挑战。一个典型的测量设备,其中可能包括一个工作频率为110或125 GHz的宽带系统,以及工作于更高频率的波导模块(例如110至170GHz、170至260GHz或90至140GHz、140至220GHz)。除非足够幸运,否则安装的不同探针台之间必然会产生测量偏差。

对于宽带设备的建模参数提取和集成电路的性能验证,产品和工艺设计规范要求待测件(DUT)需要测量多个温度点的参量(通常为5个或更多),这就意味着对待测件的触点进行多次接触测量。因为寄生阻抗随频率升高而增加,所以亚毫米波探针的金属触点都非常小。但是过小的金属触点又无法满足探针的多次测量,因此在整个频率范围和所有温度点的多个频带上测量相同的待测件是不可能的。这就要求工程师根据不同的温度或频带选择不同的待测件,从而增加了测量参量和结果的不确定性。所以,在较宽的频率范围内,如果一个测量系统能够减少接触次数或一次接触就能完成测量,这样的测量系统将会有很大帮助。

传统的矢网扩频模块对实验室环境非常敏感。若没有环路控制系统,宽带测量系统的指标会比基础的矢网漂移更快。这就需要系统进行更频繁的重新校准,增加了测量时间。频繁的配置和转接对于宽频率范围的测量不仅增加测量系统的停机时间,还可能损坏其中昂贵的系统组件,如晶圆探针和矢网扩频模块。这增加了本已昂贵的测量成本。

数据拼接

数据拼接也是一个问题。不同波段使用不同的探头,但每个探头都具有独特的接地特性、损耗和匹配特性;使用不同的

测量模块,但每个模块都具有不同的匹配特性、效率、频谱纯度、稳定性和噪声性能;这就导致了每个波段的数据将在不同的情况下进行测量。虽然经过校准,其中的一些差异得到了校正,然而,不仅是线性度、噪声、频谱纯度、漂移或重复性,还包括不同波段的不确定性和参数分布都可能会有所不同。这就提出了如何处理数据突变的问题(如图1)。图中显示了两个不同波段的测量结果存在突变的例子,虽然这两个测量过程都没有根本的错误,但是这种不连续性使测量和结果分析变得非常复杂。如果单个模块和探针在频带边缘有更高的不确定性,那么测量结果的分析将变得更加复杂^[7]。

一旦得到测量数据,去嵌入到想要的参考平面可能会有些风险。特别是使用五到九层金属的BiCMOS和CMOS工艺,所需要的晶体管参考平面可能在底层,而探针金属触点在顶部。这导致了一个由许多过孔和转换组成的“网络去嵌”,而这些都是都具有较大的插损和失配^[7-9]。增加的损耗和失配使去嵌过程更复杂,增加了测量结果的潜在误差,尤其是漂移^[10-11]。由于此类半导体制造工艺越来越多地应用于毫米波频段,因此S参数测量结果的稳定性和准确性至关重要,这决定了在整个波段中拼接数据和控制不确定性(包括测量重复性)的效果。

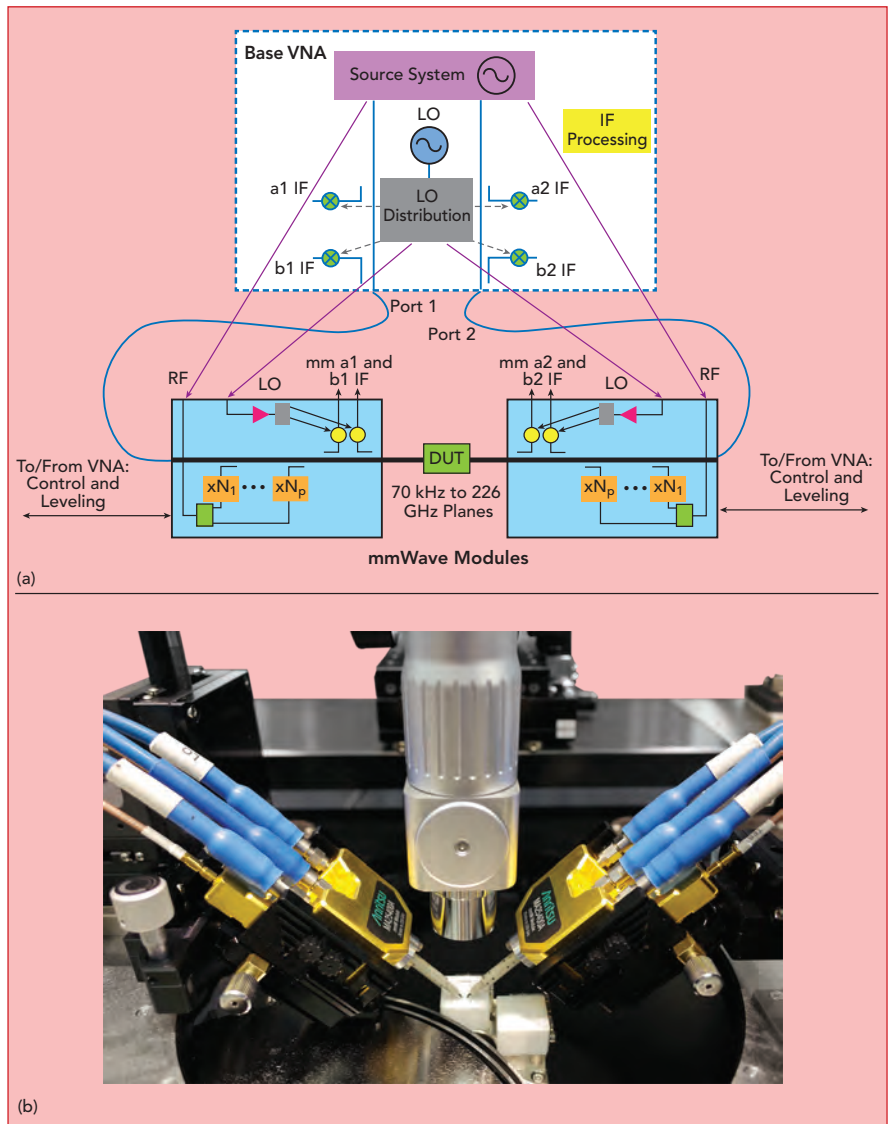
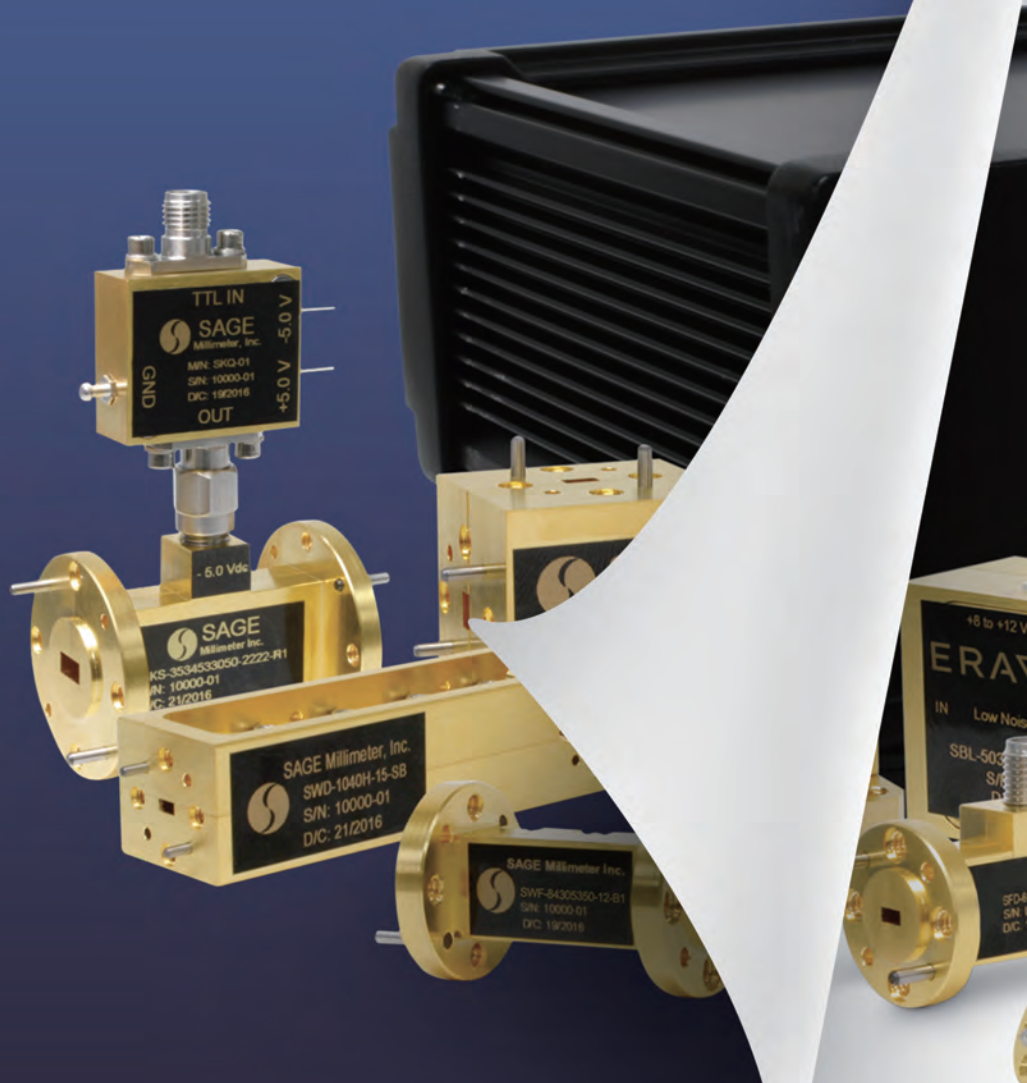


图4: 70kHz至226GHz VNA原理框图(a),毫米波模块直连到探针台(b)。



SAGE Millimeter 将于2020年3月变为Eravant, 这一变化再次彰显了我们对毫米波行业的承诺。自2011年以来, 我们一直为新一代射频工程师提供优质产品并持续改善客户体验。

随着我们不断成长为行业领导者, 我们希望有一个新的身份来反映我们为未来技术赋能的愿景。欲了解我们即将进行的转型, 请访问: www.sagemillimeter.com/eravant



www.sagemillimeter.com/eravant

www.sagemillimeter.com/eravant 3043 Kashiwa St. Torrance, CA 90505
T: 424-757-0168 F: 424-757-0188 sales@SAGEMillimeter.com

SAGE IS BECOMING ERAVANT

NEXT GENERATION MILLIMETERWAVE COMPONENTS



WWW.ERAVANT.COM
03-01-2020

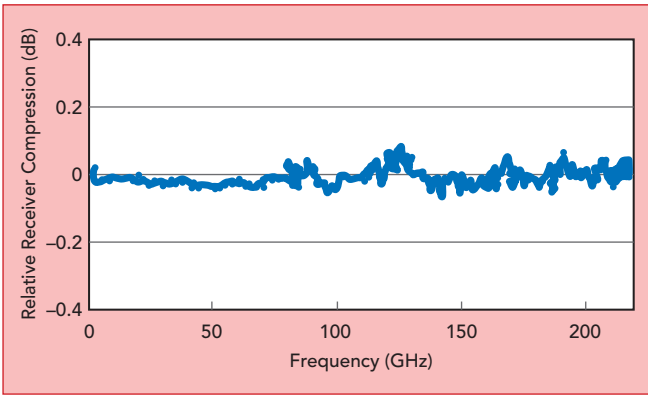


图5: 端口功率为+5和-20dBm条件下的矢量接收机的相对压缩对比。

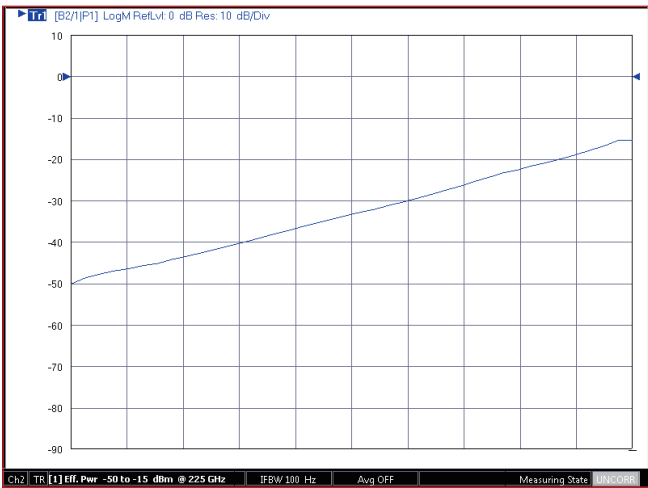


图6: 矢量网在225GHz的功率控制范围。

线性度

射频驱动电平的大小对于晶体管和放大器很重要，因为这些器件的输入压缩点可能很低。因为驱动功率可能需要-40dBm或更低，因此为了避免出现功率压缩，精确控制功率就显得尤为重要。对于准线性测量，精确的功率控制更为重要^[12]。传统的解决方案中使用的机械可变衰减器无法为这类测量提供足够的功率平坦度。如图2显示了一个没有考虑驱动功率的120GHz LNA的测量结果曲线（“标称”曲线）。LNA的输入功率不是平坦的，有些地方达到了-15dBm。第二次测量时，输入功率为-40dBm。标称的增益测量显示放大器被高度压缩，与频率变化显著，因为驱动功率并不是平坦的。虽然这个例子可能是极端的，但在较高的毫米波段，尤其是在使用晶体管裸片的情况下，功率压缩并不罕见。

即使驱动功率是精确的，另一个挑战是仪器接收机的线性度。接收机失真修正是一项困难的工作。由于许多毫米波接收机使用的是高阶谐波混频，因此内部的本振设计对于保持测试端口的线性度非常重要。如图3显示了两个频差100MHz的自由空间的单音信号输入到接收机的互调性能比较。两个接收机有相同的谐波数，但使用不同的本振设计系统：一个带有轻微的削波，另一个带有更严重的削波，并带有主动边缘锐化。表征接收机参考测量平面的三阶截止点的残余线性度相差了近10dB。由于转换器有不同的击穿电压，因此也不能随意下结论。尽管如此，在这个频率范围内，接收机的线性度依旧会有很大的影响。

宽带矢网设计

解决这些问题的一种方法是使用高线性度的接收机、足够的集成度和系统控制的宽带VNA，以确保稳定性。一个这样的系统的框图如图4a所示，包括一个基本的VNA和毫米波模块。该模块使用宽带定向耦合器和基于III-V非线性传输线技术的高本振采样设计，足以覆盖了30至226 GHz^[13]。这些下变频器的端口参考三阶互调超过30dBm，满足线性要求。这些模块能实现54GHz以上的倍频功能，并在测量耦合器之前使用一系列的4路复用器，信号从对应的复用器输入。由于在较高的毫米波频率下可用的功率逐渐减少，因此频率最高的多路复用器是最后的，并且具有最优异的耦合度。射频和本振部分的功率环路控制能有效提高模块测量的稳定性。

将接收机、耦合器和倍增器集成在一起有助于确保热均匀性和稳定性，耦合器靠近探针顶端也是同样的道理（见图4b）。该测试端口是一种支持同轴的新型结构，使用0.6mm的外导体和精密UG-387法兰盘（而不是螺纹阀体）来形成外部结构。同时还增加了法兰盘的接口面积，提高了耐久性，并显著降低了连接的轴向力和弯矩。使用高精度的UG-387法兰盘和有限的连接角度（0度和180度），无论是旋转还是不旋转都可以有效地提高测量的重复性。这种互连系统可以使用一个单片晶圆探头，满足70kHz到226GHz频率的测量需求。

RF晶圆探针将沿三维介质（同轴电缆或矩形波导）传播的电磁能量转换到片上待测件及金属触点上。这种转换的目的是使电场和阻抗的失配达到最小。这在亚毫米波波长下尤其难以实现，因此如何制造精密的晶圆探针对整个系统的性能至关重要。精密、匹配良好的探针有助于在较宽的频率范围内改善校准和测量结果。220GHz的MPI TITAN™探针结合50Ω MEMS金属触点来实现宽频率覆盖范围。探针设计的另一个重要方面是触点与探针接触的可见性，以最小化所放位置的不准确性。即使没有经验的操作人员，依靠这些设置好的探针，在校准标准件和测量小型待测件时，也可以实现更好的重复性和再现性。探针技术的一个经常被忽视的方面是磨损。经过多次测量后，探针的长度通常会减小。然而，独特设计的TITAN探针在经过成千上万次测量之后，依旧能保持良好的射频特性。即使是在铝质质的金属触点上，探针的寿命比同类探头也有了极大的延长，从而降低了测试设备的测试成本和投资回报率。

使用外部激励源，图5显示了在+5dBm输入功率下，相对于-20dBm输入的条件下，相对接收机的压缩。这种性能是通过仔细控制用于驱动采样下变频器的本振信号来实现的^[14]。如前所述，功率控制是影响精确测量的一个重要因素。实现这一目标的一种方法是采用外差检测电路，将时间常数和增益可调

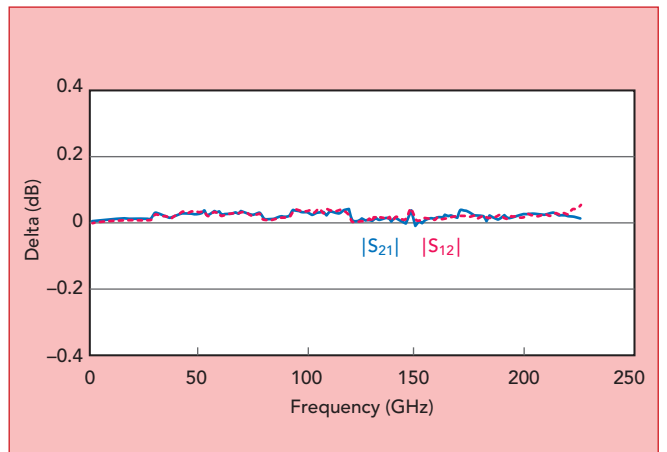


图7: 室温条件下，VNA测量直通线的24小时稳定度。

来自射频工程师的 RF解决方案



最全的射频、微波选型库 ✓

专家级技术支持 ✓

中国现货，可当天发货给国内客户 ✓

应用工程师
为您提供帮助



7天/24
小时支持

凭借着全球最大的可随时发货的现货射频元器件产品选型库，以及能为这些产品提供支持的聪明头脑，Pasternack的应用工程师们随时做好准备为您解决技术难题，并为您所有的射频项目需求提供创造性的解决方案。无论您是正处于设计困境中，还是正在寻找少见难寻的元器件，我们的应用工程师们随时待命，为您服务。更多详情，请致电400 928 5100 或访问www.pasternack.cn。

400 928 5100
sales@pasternack.cn

PE PASTERNAK
工程师的RF来源

的电平控制回路接入系统。本系统在225GHz处的电平控制范围约为35dB（见图6），在220GHz以下一般大于40dB，控制线性度位于合理区间。

稳定性对于最大限度地延长探针校准之后的使用时间和避免数据失真是很重要的，因为数据失真会增加模型拟合和分析的复杂性。图7显示了在 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 下，端口接口同轴结构18小时内的直通线的传输测量。随着温度变化对本振信号的影响，漂移随频率的增加而增加，这与预期一致，因为本振的倍频系数随频率的增加而增加。由于VNA接收机的工作频率低于30GHz，所以连接模块的射频电缆（见图4）在较低频率下影响更大。

总结

越来越多的人需要在更高的频率下进行宽带毫米波VNA测量，这给测量带来了诸多挑战：多个波段拼接数据，功率控制，确保线性度和稳定性。一个集成式的宽带220GHz系统与待测件单一端口连接是解决这些挑战的一个简单而完美的方法。该系统的线性度、功率控制、噪声性能和稳定性极大地提高了测量的精度和重复性。■

参考文献

1. H. Chen, H. Zhang, S. Chung, J. Kuo and T. Wu, "Accurate Systematic Model-Parameter Extraction for On-Chip Spiral Inductors," IEEE Trans. Elec. Dev., Vol. 55, November 2008, pp. 3267–3273.
2. I. Angelov, K. Kanaya, S. Goto and M. Addasi, "On the High Frequency De-Embedding and Modeling of FET Devices," 73rd ARFTG Conf. Dig., June 2009, pp. 1–4.
3. C. Fager, L. J. P. Linner and J. C. Pedro, "Optimal Parameter Extraction and Uncertainty Estimation in Intrinsic FET Small-Signal Models," IEEE Trans. Micr. Theory Techn.,

Vol. 50, December 2002, pp. 2797–2803.

4. M. T. Yang, P. P. C. Ho, Y. J. Wang, T. J. Yeh and Y. T. Chia, "Broadband Small-Signal Model and Parameter Extraction For Deep Sub-Micron MOSFETS Valid Up to 110 GHz," 2003 RFIC Symp. Dig., June 2003, pp. 369–372.
5. D. Williams, W. Zhao, R. A. Chamberlin, J. Cheron and M. Urteaga, "Verification of a foundry-Developed Transistor Model Including Measurement Uncertainty," 87th ARFTG Conf. Dig., June 2016, pp. 1–4.
6. J. Martens, "Parameter Extraction from 110+ GHz S-Parameter Measurements: A Heuristic Analysis of Sensitivity and Uncertainty Propagation," 2011 COMCAS Conf. Dig., November 2011, pp. 1–4.
7. D. F. Williams, A. C. Young and M. Urteaga, "A Prescription for Sub-Millimeter-Wave Transistor Characterization," IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol. 3, April 2013, pp. 433–439.
8. N. Derrier, A. Rumiantsev and D. Celi, "State-of-the-Art and Future Perspectives in Calibration and De-Embedding Techniques for Characterization of Advanced Sige HBTs Featuring Sub-THz fT/fMAX," IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), 2012.
9. D. F. Williams et al., "Calibration-Kit Design for Millimeter-Wave Silicon Integrated Circuits," IEEE Trans. On Micr. Theory and Techn., Vol. 61, July 2013, pp. 2685–2694.
10. X. Ye, "De-Embedding Errors Due to Inaccurate Test Fixture Characterization," IEEE Electromagnetic Compatibility Mag., Vol. 1 No. 4, April 2012.
11. J. Martens, "Common Adapter/Fixture Extraction Techniques: Sensitivities to Calibration Anomalies," 74th ARFTG Conf. Dig., Dec. 2009, pp. 1–11.
12. L. Galatro, S. Galbano, A. Santaniello and M. Spirito, "Power Control for S-Parameters and Large Signal Characterization at (Sub)-mmWave Frequencies," 85th ARFTG Conf. Dig., June 2015, pp. 1–4.
13. J. Martens, K. Noujeim and T. Roberts, "An Improved Stability Broadband/mmWave VNA Structure," 77th ARFTG Conf. Dig., June 2011, pp. 1–4.
14. J. Martens, "Sub-mmWave and THz frequency Conversion: LO Waveform Control and Sampling Technologies," 8th ESA Workshop on Millimeter-Wave Technology and Applications, December 2018.

俊科[®] SHX

上海华湘计算机通讯工程有限公司

DC-65G 衰减器/负载



New
1.85mm
SMPM



65G

DC-6G 程控/可调衰减器



DC-6G 衰减器/负载



DC-40G 衰减器/负载



地址：上海市田州路99号13号楼3层 电话：021-54451396
网址：www.shx-sh.com 邮箱：shx@shhuaxiang.sina.net

