

基于网络分析仪的宽带 MIMO 信道探测

作者: Rubén Ibernón-Fernández, José-María Molina-García-Pardo, José-Víctor Rodríguez, Leandro Juan-Llácer,
喀他赫纳科技大学 (UPCT)

本文介绍了一款宽带 MIMO (多路输入多路输出) 信道探测仪, 它是基于多端口网络分析仪和快速开关而构建的, 二者分别由笔记本电脑中的应用软件进行控制。该信道探测仪具有多种功能, 可以配置频率带宽、发射天线和接收天线的数量等系统参数。唯一不便的是, 在测量过程中信道必须保持稳定。

喀他赫纳科技大学实验室对 4x4 MIMO 系统进行了测量, 以测试信道探测仪的性能。所选频段为 2.4 GHz~2.5 GHz。校准后系统的幅度和相位噪声非常低, 幅度噪声最大值为 1.5×10^{-2} dB, 相位噪声最大值为 0.1 度。此外, 由于只使用一台网络分析仪, 它还避免了旁路相位噪声。

介绍

最近几年, MIMO 系统受到极大的关注。实践证明, 通过在发射机和接收机上使用多个天线可以提高频谱效率, 并且有可能获得较高的数据发射率。这些系统得益于空间分集, 由此可见, (信号或数据的) 传播环境对

提高 MIMO 的容量具有特殊作用。因此研究这些系统的不同环境及如何有效地使用系统非常重要。

为了在不同环境中提高容量, 人们已经做了许多理论性的研究, 但是对于最终可达到的真实容量, 只有通过实验的结果才能做出评估。为此, 研究者对 MIMO 信道进行了大量的实际测量。

许多参考文献中阐述了信道探测仪的各种配置: 如使用窄带信道探测仪, 每个发射天线可发射间隔为 2 kHz 的连续波; 使用发射机和接收机上的矢量分析仪和虚拟阵列测量 MIMO 信道。由于发射机、接收机与矢量分析仪使用同轴电缆连接, 所以发射机和接收机之间的距离受到电缆损耗的限制。虚拟阵列的问题是, 由于测量需要的时间较长, 所以很难保证信道在测量过程中保持不变。有些配置使用了两个矢量分析仪和同轴开关。但是, 使用两个矢量分析仪会引起旁路相位噪声。另一种方法是发射伪随机的噪声序列, 以便测量复杂的激励响应。还有一个常用的信道探测器是 RUSK ATM, 其发射机和接收机阵列都带有快速射频开关, 每个发射机可连续发射周期性多频信号。这种信道探测仪使用了光纤同步发射机和接收机, 远程链接时还可以使用两个铷参考。

本文介绍的信道探测仪是在通过笔记本电脑控制的快速开关和多端口网络分析仪 (NA) 的基础上构建的。由于只使用一台信号分析仪, 从而避免了旁路噪声问题。这种信道探测仪的独特之处主要在于使用了光纤链路, 以避免同轴电缆的损耗; 因此, 发射机和接收机之间的距离仅受限于产生路径损耗的组件。

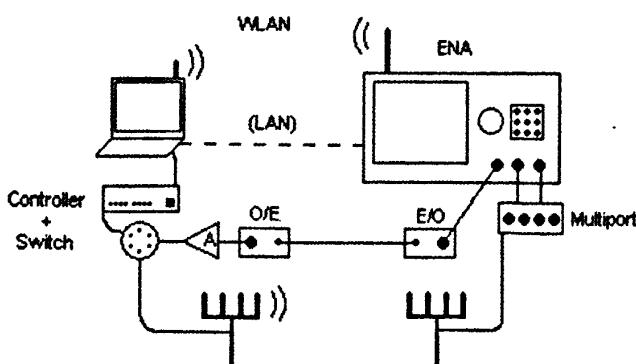


图 1. MIMO 信道探测仪的结构示意图

这套系统使用快速开关和多端口网络分析仪代替虚拟阵列，从而减少了测量时间。

这种信道探测仪支持不同的系统配置，能够对网络分析仪所支持的任何频率进行测量。但是必须保证信道固定不变。测量过程的快慢取决于网络分析仪和其他系统组件。这种信道探测仪的优点是，大多数实验室和研究中心都有多种类型的网络分析仪，因此可以有效地利用现有资源。

MIMO 信道理论

在由M根发射天线和N个接收天线组成的MIMO系统中，接收到的信号可写作：

$$\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{G}\tilde{\mathbf{s}} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (1)$$

其中 $\tilde{\mathbf{r}}$ 是接收信号的 $N \times 1$ 矢量； $\tilde{\mathbf{s}}$ 是表示发射信号的 $M \times 1$ 矢量； \mathbf{G} 是一个 $N \times M$ 矩阵，表示从每个发射天线到每个接收天线的信道传输； $\tilde{\mathbf{n}}$ 表示 $N \times 1$ 噪声矢量。

均衡分配的发射功率带有信噪比(SNR) (用 ρ 表示)，其最大理论容量可表示为：

$$C = \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \right) \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (2)$$

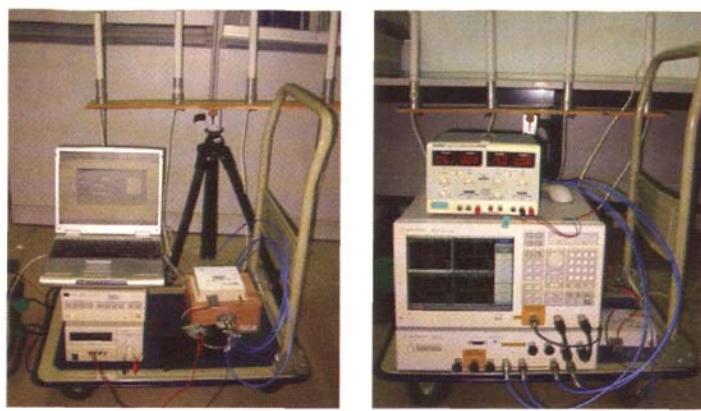
其中 \mathbf{I}_N 是单位矩阵 $N \times N$ ， t 表示转置共轭函数。对 \mathbf{G} 进行标准化后得到 \mathbf{H} 以便去除路径损耗，因此，上式可归一化为 Frobenius 函数：

$$E[\|\mathbf{H}\|_F^2] = NM \quad (3)$$

也可通过对由奇异值分解(SVD)的每个独立子信道求和，计算出容量。

每个子信道的功率增益可根据相关矩阵 $\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H}$ ($N=M$ 时) 或 $\mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger$ ($N < M$ 时)，由特征值 (eigenvalues, λ_k) 得出。

子信道 (K) 的数量可通过 M, N 的最小值和可解析的多通道组件的数量



(a)

(b)

图 2. a) 发射机端和 b) 接收机端

量得出。如果是平均功率分配，则可根据下式算出容量：

$$C = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_k \rho}{M} \right) \text{ bits/s/Hz} \quad (4)$$

如果是宽带模式，可对所有测量频率取平均值来计算容量：

$$C = \frac{1}{F} \sum_{f=f_1}^{f=f_2} \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}(f) \mathbf{H}^\dagger(f) \right) \right) \text{ bits/s/Hz} \quad (5)$$

其中 F 表示测量频率的数量， f_1 和 f_2 分别表示初始频率和最终频率。

系统描述

基于网络分析仪的宽带MIMO测量系统是对窄带测量的扩展。这种新系统可以执行宽带测量，而且极大地提高了模块和相位的噪声电平。测量设备的重要组件是通过笔记本电脑控制的网络分析仪和快速开关(见图1)。

众所周知，对于只使用一台网络分析仪的测量设备，其主要优势在于：相位噪声低 (系统是锁相的，所以没有旁路相位噪声)、成本低和功能多；这是因为可以选择任意频段。不方便的是发射机(图2a)和接收机(图2b)之间的距离受限，这是由于

使用了同轴电缆，因而会产生较高的衰减。在我们的测量系统中，为了解决这一问题采用光纤链路来取代同轴电缆。光纤链路的衰减约为 0.4 dB/km ，于是，发射机和接收机之间的距离只受路径损耗一种因素的限制。若在链路两端引入放大器，则它们之间的距离还可以进一步增大。设备系统的各个组成部分如图2所示。

A. 多端口网络分析仪

信道探测仪系统的主要组件是多端口网络分析仪。在我们的实验中，所用的 Agilent ENA 网络分析仪的频率范围是 $300\text{kHz} \sim 8.5\text{GHz}$ 。网络分析仪的一个端口配置为发射机，其余端口配置为接收机。接收天线分支直接与接收端口相连，发射端口直接与 E/O (电/光转换器) 相连。分析仪最多可配置 16 个端口，但是其中只有 15 个可用作接收机，因为有一个要配置为发射机。在此例中使用了 7 端口网络分析仪，因此有 6 个端口可用作接收端口。

B. 光纤连接

为了最大程度减小网络分析仪和

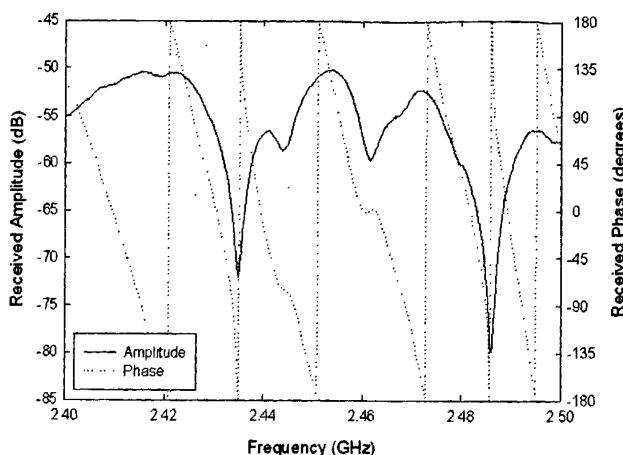


图3，一个组件接收到的幅度和相位

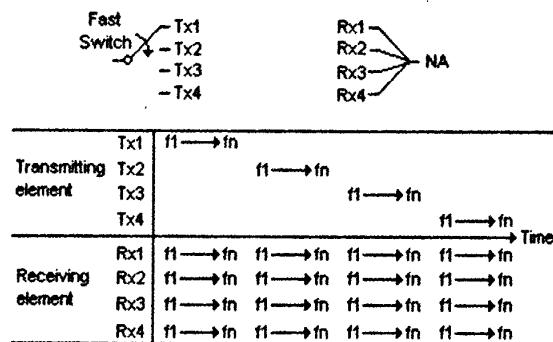


图4，测量过程梗概

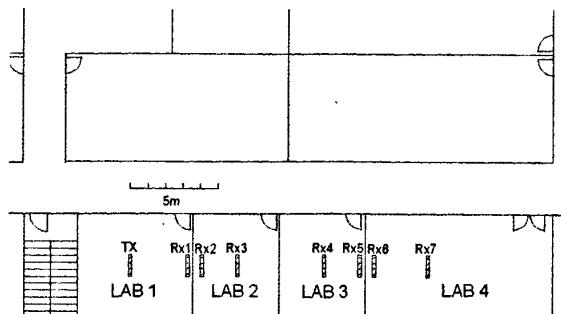


图5，测量环境俯视图

发射机开关之间的损耗和链路噪声，我们使用了光纤连接。链路由ORTEL光纤发射机(E/O)和ORTEL光纤接收机(O/E)组成，因此网络分析仪发射的信号被转化为光信号并通过光纤进行传输。链路末端与高速开关相

连，以便发射的信号以连续方式到达发射机阵列的每个组件。

由于E/O和O/E之间的转换，此链路的固定损耗为20 dB。光纤损耗取决于链路的长度(大约为0.4 dB/km)，可以忽略不计。

C. 开关和控制器

使用高速开关是为了给系统提供多个发射天线分支，它由控制器进行调整，能够在预想的输出端口和输入端口间进行转换。我们的系统中使用了6端口开关，因此最多可以使用5个发射天线。通过增加开关数目或者使用带有更多端口的网络分析仪，可以增加发射天线的数量。

光纤链路的末端是开关的输入端。输出端是发射天线分支，控制器将光纤链路发出的信号连接到不同的发射天线分支。

D. 笔记本电脑

在笔记本电脑上运行了先进的软件，以便控制测量过程。笔记本电脑放在开关控制器附近，通过GPIB与之连接。网络分析仪通过W-LAN或LAN与笔记本电脑相连。对于W-LAN，可以使用802.11a和802.11b标准(工作频率分别为2.4 GHz和5.5 GHz)。这样，如果可以在上述频率下测量，就能避免可能产生的干扰。如果W-LAN网络产生任何问题，则可以用LAN(局域网)来替代。最后，测量结果被存储在网络分析仪中，以防止W-LAN过载。

E. 其他必要的组件

测量过程中需要天线、电缆和连接器来连接系统的各个部分。

如果有必要对较高的路径损耗进行补偿，则可以在光纤链路前后两端引入放大器。本例中，在光纤链路后端使用了放大器，增益为30 dB。不在光纤链路前端使用放大器是为了避免E/O组件可能产生损坏。

测量过程

笔记本电脑使用Visual Basic软

表1. MIMO 信道探测仪的配置参数

参数	说明
N	发射天线分支的数量
M	接收天线分支的数量
Pt	网络分析仪发射功率
fc	中心频率
W	带宽
K	测量的点数
WIF	中频带宽

表2. 初始测量中使用的参数值

参数	说明
N	4
M	4
Pt	10 dBm
fc	2.45 GHz
W	100 MHz
K	512
WIF	3 kHz

件来控制测量过程。测量过程的第一步是引入无线参数和系统参数，必须在网络分析仪中指定下列参数：中心频率、扫宽和要测量的点数，以及中频（IF）带宽，中频带宽值是进行测量所需的时间与噪声本底之间的折衷值。需要在软件中输入系统参数（发射组件和接收组件的数量）。所有这些参数都可通过笔记本电脑运行的软件来引入，然后再用它们通过 WLAN 来配置信道探测仪。表1总结了可由用户进行配置的各个参数。

在测量过程中，必须对系统进行校准，以去除由连接天线和网络分析仪的元器件（电缆、放大器、连接器、E/O 和 O/E 转换器等）所引起的衰减和相移。必须对每对天线进行校准。

最后一步是采集过程。这个过程包括获取矩阵G的所有元素，这样就可得到每对天线分支的频率响应（图3）。首先，开关选择第一个发射天线分支，然后网络分析仪保存所有接收天线分支接收到的信号。之后，笔记

本电脑切换到第二个发射天线分支，以此类推。测量速度很快，因为网络分析仪可同时读取所有端口。此过程如图4所示，其中f1和f2表示初始频率和最终频率。最后，测量结果保存在网络分析仪中。

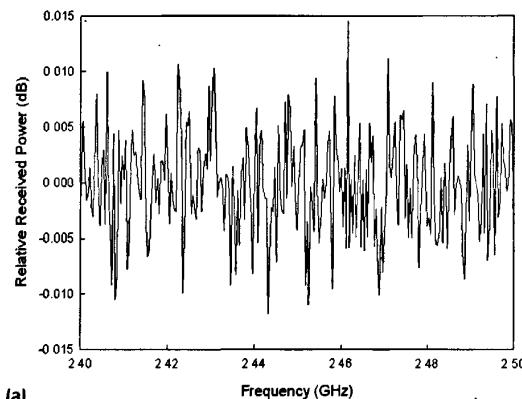
可在6.3秒内获得信道的矩阵，在此期间信道必须保持稳定。存储过程需要7.2秒，因此13.5秒后，信道探测器完成测量过程并再次就绪。

在每个接收机上都测量五次MIMO信道，以便在测量过程中检查信道是否稳定。发射功率设为10 dBm，即网络分析仪所能传输的最大功率，以便EIRP（有效同性辐射功率）达到15.2 dBm。系统经过校准后，使用此配置可获得-100 dB的噪声本底，如果建立的最小SNR为15 dB，则可以为其补偿85 dB的路径损耗。如果在光纤链路的两端再使用一个放大器，还可以获得更高的范围。这些数量就是我们所说的校准点，因此天线增益并未包括在内。表2总结了初始测量中使用的参数。

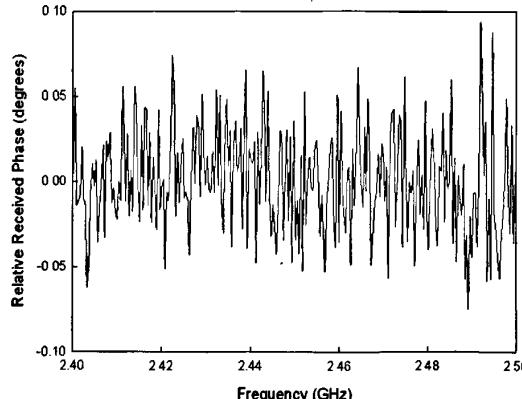
测量结果

测量的目的是测试信道探测仪的性能。喀他赫纳科技大学实验室选择了室内环境（图5）。MIMO系统配置为两个均匀线性阵列（ULA），由相隔 $\lambda/2$ 的4个全向天线分支组成。此外，测量中还使用了8个带有5.2dBi增益的Cisco Aironet全向支架天线（AIR-ANT2506）。将发射机放在“1号实验室”，7个接收机则分别放在另外4个不同的实验室。1号接收机放在视距（LoS）范围内，其余的放在非视距（NLoS）范围。阵列采用并行放置，各阵列以较宽的一面相对。发射机和接收机的高度为1.5米，并且天线分支经过垂直极化。

测量所选择的频段为2.4 GHz ~ 2.5 GHz。因此，中心频率设置为2.45GHz，扫宽为100MHz。在这些频率上，G矩阵中的每个元素在每个频率处都获得512个矩阵点。选择3kHz的中频带宽。使用这种配置，信道探测仪



(a)



(b)

表3. 图5中固定SNR为15 dB时的平均容量(bits/s/Hz)

Rx 1	Rx 2	Rx 3	Rx 4	Rx 5	Rx 6	Rx 7
12.86	13.58	14.15	14.97	15.76	15.46	15.42

校准完毕后, 得到校准响应的幅度值(见图6a)和相位噪声值(见图6b)。使用Kolmogorov-Smirnov测试, 获得幅度(dB)和相位(度)的零均值高斯噪声。幅度标准差为 4.9×10^{-3} dB, 相位标准差为 3.16×10^{-2} 度。测得的幅度噪声的最大值是1.5×

10^{-2} dB(图6a); 相位噪声(图6b)的最大值是0.1度。众所周知, 测量容量受相位噪声的影响。这种信道探测仪的一个优点是相位噪声和幅度噪声都非常低。此外, 仅使用一台网络分析仪时没有旁路相位噪声。

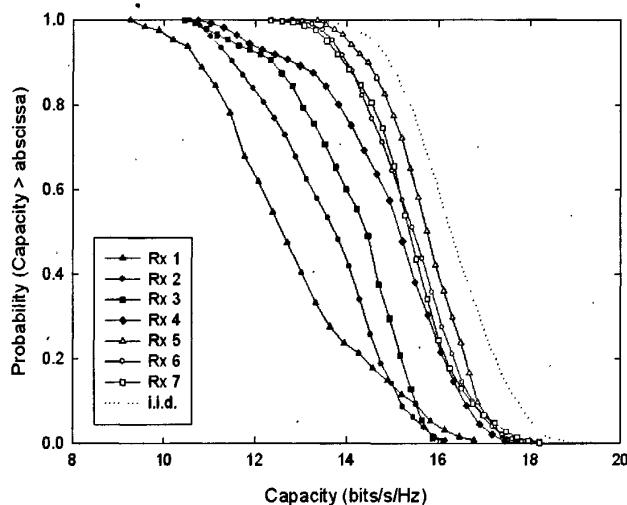


图7. 图5中所示位置固定SNR为15dB时的CCDF容量

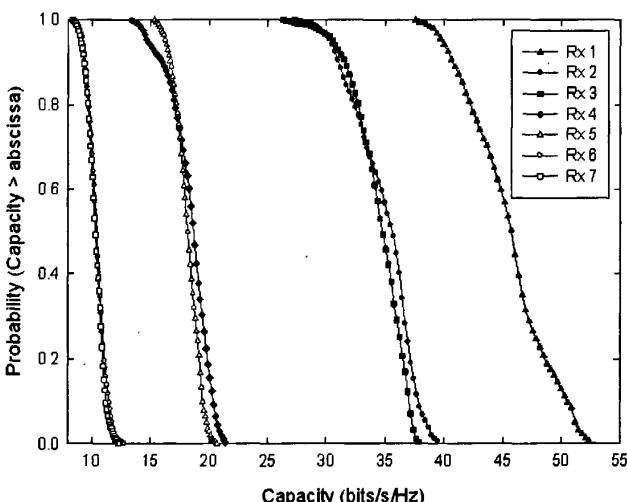


图8. 变化SNR时, 图5中所示位置的CCDF容量

A. 固定接收功率时的容量

当固定SNR为15dB时, 算出MIMO容量的初始结果。图7示出了每个接收机位置计算出的互补累积分布函数(CCDF)容量。独立同分布信道(i.i.d.)容量也在图中进行了显示。结果可见, 在视距范围内1号接收机的容量较小。位于2号实验室的接收机的容量比1号实验室的大, 3号和4号实验室中的接收机容量与i.i.d.信道的容量接近。因此, 在非视距(NLoS)范围内获得了最大容量。固定SNR为15dB时, 平均容量可通过表3总结如下: 平均容量值在12.86和15.76 bits/s/Hz之间变化。在3号实验室中Rx5获得了最大容量。

B. 固定发射功率时的容量

容量取决于SNR, 有时信号强度比多路径更重要。为此, 我们使用每个点(表4)上接收到的SNR来计算容量, 从而研究SNR参数的影响。图8显示了使用实际SNR时的CCDF容量。

可以看出, SNR对提高容量非常重要: SNR变化时, 1号实验室实现了最大容量, 平均容量达到42.5 bits/s/Hz。4号实验室通道多, 而SNR较低, 容量最小。在4号实验室中, 平均容量约为10 bits/s/Hz。

结论

本文探讨了宽带MIMO信道探测仪。它使用了网络分析仪和快速开关, 由笔记本电脑分别通过WLAN(或LAN)和GPIB进行控制。网络分析仪的一个端口用作发射机, 其余端口用作接收机, 因此快速开关可为系统提供多个发射天线分支。使用光纤链路代替同轴电缆, 可以最大程度减小链路损耗。

很多实验室和研究中心都有

可以降低设计迭代次数。在内存与磁盘之间进行优化管理的数据模型将开创一种新的计算模式，实现在历史迭代设计方法的基础上进行增量设计变更。主动的变更监控机制将能够把进行优化和修正引起的变化限制在设计发生变化的那些部分。在实施过程中，进行增量的签核设计规则校验、可制造性设计和电规则校验（ERC）将不仅可降低设计迭代次数，而且在代工厂经过验证的规则的基础上还提供一种按照设定的要求进行修正的环境。我们预期，这种设计驱动的验证进一步发展，将会在具有确定性地控制关键成本函数能力的基础上，取得流程中的自动修正能力。

三，人们还可以预期未来将朝着一种基于标准的元语言发展，它把工艺设计规范映射到基于模型的设计规则。该语言将提供与众多工具的接口，降低在一个工艺节点上建立与维护设计规则校验运行集的成本。理想的情况是，这种新语言将成为设计参考手册（DRM）的一部分。代工厂将能够用一种语言来描述他们的规则，可以没有歧义地将它们映射到多家厂

商提供的多种设计规则校验工具中去。假如代工厂致力于发展一种语言的原语验证测试平台，在设计参考手册中出现的任何变更都将会引起设计生态系统中相应的变化。可以设想一下，这将会给设计规则校验运行集的开发时间以及规则平台论证带来多大的节约。

四，人们还将看到模式识别技术在这方面的应用，它能够更好地处理亚纳米设计中出现的模糊几何形状的问题。由专门设计来处理2D和3D设计视图以及参照工艺模型模拟推导出实际轮廓的新引擎将提高设计的精度和减少处理时间，从而可推动大型的设计在工厂中得到实施。这些新引擎将与各种各样的学习系统相连接，这些学习系统或者具有先前特征表征的电/良率性能表现装置，或者通过与工艺模拟器或测试芯片接口而具有当场分析的能力。就像在医疗系统中发明了计算机断层扫描技术（CAT）一样，这种新的方向将引导新一代的诊断能力脱颖而出，能够提高设计的性能和降低设计中的风险。

五，人们将观察到一种开放的虚

拟平台（OVP）的出现，它处理设计的复杂性并且和制造联系在一起。这种虚拟化将具有两个实质的要素：计算处理能力和模拟抽象能力。设计规模的爆炸式增长将要求在多台计算机上进行处理。将会建立一种用于并行计算和流水线计算的引擎架构，它通过允许设计流程分接到大量计算资源的开放应用编程接口（API）进行扩展。这些虚拟的API将鼓励人们在包括EDA在内的传统的自动实施流程中使用技术建模方法（TCAD）。设计团队将凭借这个平台缩短设计的工作周期和提高设计精度。开放虚拟平台的API将具有很充分的普遍性，允许通过web与多个硬件平台或服务器连接开展工作。以这种方式获得的处理能力可以确定在设计过程中出现变异所带来的影响。

进入到“纳米级”设计时代的后期阶段，人们可以期待业界的思维方式将发生变化，从“看到存在的各种问题”转变到“问题是完全可以克服的”。我们将针对面临的市场在批量和成本方面体现出来的特点，在适合的工厂里采用恰当的工艺节点，进行成本合理的设计。EDN

10 不同类型的网络分析仪。因此，他们可以很经济的构建这种信道探测仪，从而节省最主要的费用。信道探测仪可以改变不同的系统参数，例如天线的类型和数量、频段、测量点的数量等。其主要缺点是，在测量过程中测量环境不能出现任何变化，

而且要用光纤来连接发射机和接收机。测量范围从2.4GHz~2.5GHz，使用4x4 MIMO系统测试信道探测器。一方面，在视距（LoS）范围内，当固定SNR为15dB时，低容量为12.86bits/s/Hz。在非视距（NLoS）范围内，与发射机距离较远时，容量接

近于i.i.d.信道的容量。在3号实验室中容量最大，为15.76 bits/s/Hz。另一方面，SNR变化

表4，在图5的环境中，变化SNR时接收到的SNR(dB)和平均容量(bits/s/Hz)

	Rx 1	Rx 2	Rx 3	Rx 4	Rx 5	Rx 6	Rx 7
SNR	42.17	33.09	31.99	18.11	17.15	10.04	10.19
容量	45.56	34.98	34.54	18.44	18.17	10.48	10.35

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，推出多套微波射频以及天线设计培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频，不会仪器操作怎么行！对于射频工程师和硬件工程师来说，日常电路设计调试工作中，经常需要使用各种测试仪器量测各种电信号来发现问题、解决问题。因此，熟悉各种测量仪器原理，正确地使用这些测试仪器，是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能，该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟悉掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器；该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装，包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材，能够帮助微波、射频工程师快速地熟悉掌握矢量网络分析仪使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器，因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解，也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解，能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>