

【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】

关于 S 参数

文档编号：HWTT0020



鼎阳硬件设计与测试智库
群策群力，连接所有硬件人！



【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】关于 S 参数

汪进进

鼎阳硬件设计与测试智库发起人之一

深圳市鼎阳科技有限公司

进进按语：

这篇关于 S 参数的文章是我在 2010 年编写的。当时刚开始学习射频知识，学得很用力、很虔诚，远在成都的同事将他那翻得破旧的大学微波教材寄给了我。我打印了几十篇关于 S 参数的论文，采用“集中优势兵力，各个击破”的学习方法，查找各种学术文献中关于 S 参数的介绍。最终，我综合了这篇《关于 S 参数》，保持着我一贯的“浅浅的”文章风格。因为我的茶壶里能装下的就这么点饺子，就全部倒出来了。

当时我在周末邮件中介绍了写作这篇文章的过程，引起一位华南理工大学的老师（我现在记起来了是褚庆昕教授）的关注，他将他的教学讲义发给了我。虽然我一直和他都未曾谋面，直到最近我每天都看各种不同大学的网站，在查看华南理工的网站看到褚老师名字才准确地记起就是这位先生，他曾经慷慨地向我伸出援助之手。

如果也有朋友曾经和我一样，对 S 参数是个完全的门外汉，我的文章是最适合扫盲的。否则，这篇关于 S 参数的文章实在是又一篇“炒剩饭”。如有内行人可能会读到，我想了就觉得羞涩。

不过，为了能促使硬件人的相互适当“跨界”，我们鼓励大家推荐更多这类“浅浅的”文章。射频的要学点 SI 知识，时域的要学点射频知识，硬件设计的要学点测试测量知识，做 SI 研究的，要学点电源知识，做电源设计的，要学点 SI 知识，……。当然，基础的还是大学那几门课程，电路，模电，数电，控制原理，……。那几门课程实在太重要了！

欢迎推荐！推荐文章有积分哦！

无源网络如电阻、电感、电容、连接器、电缆、PCB线等在高频下会呈现射频、微波方面的特性。S参数是表征无源网络特性的一种模型，在仿真中即用S参数来代表无源网络，在射频、微波和信号完整性领域的应用都很广泛。本文将从S参数的定义，S参数的表达方式，S参数的特性，混合模式S参数，S参数测量等多个方面介绍S参数的一些最基本的知识。

1, S参数的定义

人们都喜欢用一句话来概括一个术语。譬如用一句话来表达什么是示波器的带宽，笔者概括为：带宽就是示波器前端放大器幅频特性曲线的截止频率点。如何用一句话来回答什么是S参数呢？笔者在网上搜索了很多关于S参数的文章，现摘录几段关于S参数的定义。





在维基百科上，关于S参数的定义是：Scattering parameters or S-parameters (the elements of a scattering matrix or S-matrix) describe the electrical behaviors of linear electrical networks when undergoing various steady state stimuli by electrical signals. The parameters are useful for electrical engineering, electronics engineering, and communication systems design. 翻译成中文：散射参数或者说S参数描述了线性电气网络在变化的稳态电信号激励时的电气行为。该参数对于电气工程、电子工程和通信系统的研发是很有用的。（抱歉，英语水平太差，翻译得很别扭。）这个定义似乎不够好！在另外一篇文章中的定义是：The S-parameter (Scattering parameter) expresses device characteristics using the degree of scattering when an AC signal is considered as a wave. The word “scattering” is a general term that refers to reflection back to the source and transmission to other directions. 中文含义是：“S参数是利用器件在受到带有“波”特点的AC信号激励下的散射程度来表达器件的特征。”这个定义比较简洁，但可能翻译得不准确。作者试图表达S参数主要是用于描述在高频信号下的特性，但很不直截了当。另外一篇文章中的定义更是简洁明了：Scattering parameters or S-parameters are commonly used to describe an n-port network operating at high frequencies like RF and microwave frequencies. 中文含义是：“S参数通常用来描述工作在类似于RF和微波频率的高频下的n端口网络。”在一篇测量相关的应用文档中对S参数的表达是：“Scattering” or ‘s’ parameters are a measure of reflected power and transmitted power in a network as a function of frequency. The “Network” could be a coax cable, passive antenna, active amplifier, microwave filter, etc. S-parameters have magnitude and phase Typically, magnitude is measured in dB, phase is measured in degrees. 中文含义是：“S参数是测量“传输网络”的反射功率和传输功率，最终测量结果是和频率相关的。这里的“传输网络”是可能同轴电缆、无源衰减器、有源功放、微波滤波器等。S参数有幅值的S参数和相位的S参数。一般地说，幅值测量是以dB表示，相位是以角度表示。”这个表达是从测量角度说的，似乎不能作为一种术语的定义。

笔者个人觉得比较糟糕的一个定义是在堪称经典的国外教材上，叫《射频电路设计——理论与应用》（电子工业出版社，Reinhold Ludwig和Pavel Bretchko著）。在其第111页的描述是：“简单地说，S参量表达的是电压波，它使我们可以用入射电压波和反射电压的方式定义网络的输入、输出关系。根据图示，可以定义为归一化入射波电压 a_n 和归一化反射电压波 b_n 。”这个教材有英文版在国内出版，我没查英文是怎么表达的，但这个翻译过来的中文定义确是很难懂。

但是上面几种表达综合在一起，确是给了我们一个关于什么是S参数的概念。

在物理意义上到底该如何理解S参数的本质呢？

我们打一个比方：假设流速极快的水流过了两个连接在一起但直径不一样的水管，在这两个水管的交界处会产生什么现象？一部分水会从一个水管流到另外一个水管，还有一部分水会反射回来，但如果水的流速很慢，所有的水都会从一个水管**全部**流到另外一个水管，没有水反射回来的。我们很容易理解这个现象。那么，我们将水管换成电阻，电阻两端连接的是导线，当电信号从导线流经电阻时会发生什么现象？答案是：当电信号的速率很低或直流信号时，所有的电信号能量除了转换为热能消耗掉，其余的都会流出电阻。输入电流等于输出电流。也就是说可以应用我们在大学里学习到的基尔霍夫电压和电流定律。但如果电信号的速率很高，“电阻”就不是我们过去意义上理解的电阻了，电阻会表现出射频特性。流过电阻的电信号一部分会被反射回来，而且反射回来信号的相位不一定是和入射的信号完全反相，是一个**矢量**。当我们将电阻作为一个“黑箱子”，来描述电阻的特征时，该怎么描述？**S参数即是一种描述电阻在表现为射频特性的高频信号激励下的电气行为的工具，而且它的描述的方法是以电阻对入射信号作出“反应”**





即“散射”后，从电阻“外部”“散射”出的可测量的物理量来实现的，测量到的物理量的大小反应出不同特性的电阻会对相同的输入信号“散射”的程度不一样，这种不一样的散射程度就可以用来描述电阻的特性，而且这种表达方法已成为作为一种非常有用的电气模型。这些物理量被称为入射电压，反射电压，传输电压，等等。不只是电阻会表现这种特性，很多无源器件如电缆，连接器，PCB走线等传输介质都会表现出这种特性，因此都可以用S参数来表征。图1表示了S参数的基本概念。

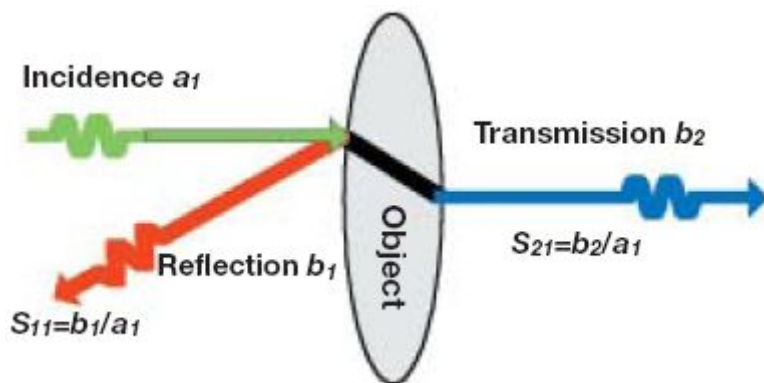


图1 S参数的概念

2, S参数的表达方式

S参数的表达方式多种多样。在**数学**表达上是一个**矩阵**形式，矩阵中的每个数值代表了一定的物理意义。在**图形**表达上，则是一个横轴表示频率，纵轴表示散射程度的**曲线**。在**仿真**中，S参数就是代表了器件特性的一种模型，这个模型在仿真应用中的“输入”是一个叫touchstone格式的文件。

2.1, S参数矩阵

S参数矩阵如图2所示。对传输网络的输入输出端口都要编上数字，数字次序不一样代表的物理含义不一样。如 S_{ij} 表示为入射端口为j，检测端口为i。记住这个次序就不会混淆矩阵中每个符号的含义。反射表示为 $i=j$ ，传输表示为 $i \neq j$ ，因此，对于一个n端口的网络，就有n的平方个参数值，将这些数值列在一起就组成了S参数矩阵。

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & & S_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

图2 S参数矩阵

S参数是两个物理量的比值，因此严格讲是没有单位的，但通常当表示幅值的S参数时，一般按对数的算法，最终用dB来表示，表1是dB和衰减比值之间的关系。



$ S_{ij} $	$20\log S_{ij} $
1	0dB
$1/\sqrt{2}$	-3dB
$1/10$	-20dB
$1/100$	-40dB
$1/1000$	-60dB

表1 S参数的幅值单位

我们先用二端口网络来了解S参数矩阵中的数值在理论上如何得到的。图3为测量二端口网络前向S参数时的微波功率传输示意图。入射能量（a1）输入到端口1，有一部分能量（b1）被反射回来，另外一部分能量（b2）输出到端口2。S参数只能在输入、输出端口完全匹配的条件下才能确定。

测量“前向”S参数时，在输入端施加激励信号，在输出端接匹配电阻。

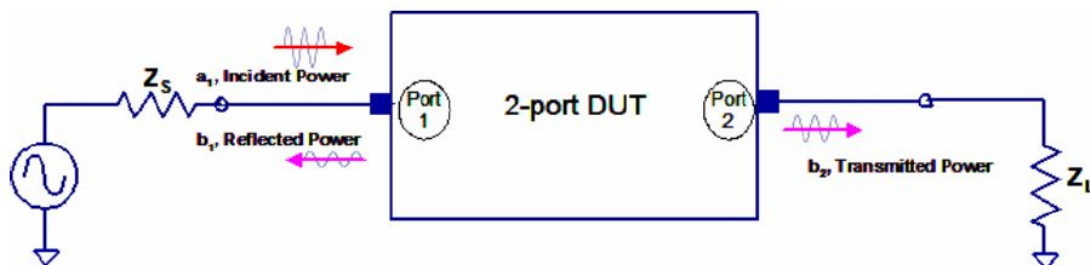


图3 二端口网络前向S参数测量示意图

$S_{11}=b_1/a_1$ =反射功率/入射功率。 S_{11} 表示在输出端端接匹配情况下的输入端反射系数，通常被称为回波损耗（return loss）。

$S_{21}=b_2/a_1$ =输出功率/输入功率。 S_{21} 表示在输出端端接匹配情况下的前向传输增益（系数），通常被称为插入损耗（inset loss）。

测量“反向”S参数时，在输出端施加激励信号，在输入端接匹配电阻，如图4所示。

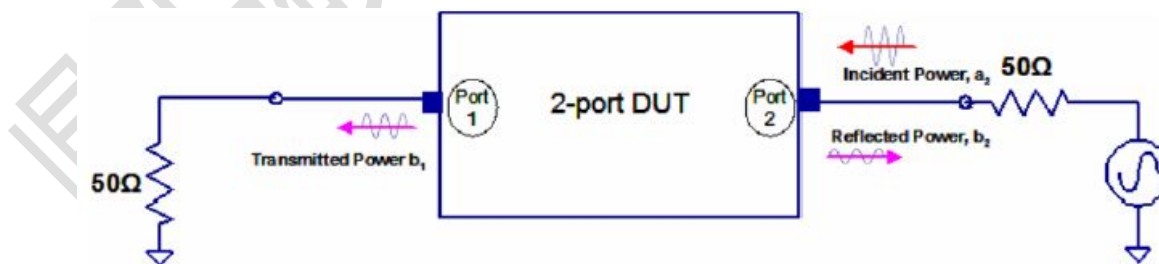


图4 二端口网络反向S参数测量示意图

$S_{22}=b_2/a_2$ =反射功率/入射功率。 S_{22} 表示在输入端端接匹配情况下的输出端反射系数。

$S_{12}=b_1/a_2$ =输出功率/输入功率。 S_{12} 表示在输入端端接匹配情况下的反向传输增益（系数）。

刚开始记这些参数时可能有些容易混淆。正向和反向是相对表达上的方便而言的，无源器件一般来说正向和反向的一致结果。其实，我们牢记住S21表示b2/a1就可以了，其它的就可以类推了。相同的后缀S11, S22表示反射，比较容易记住。

可以用下面的两个关系式来完整地描述二端口网络的输入、输出和S参数的关系。用图形描述这些关系式如图5所示。

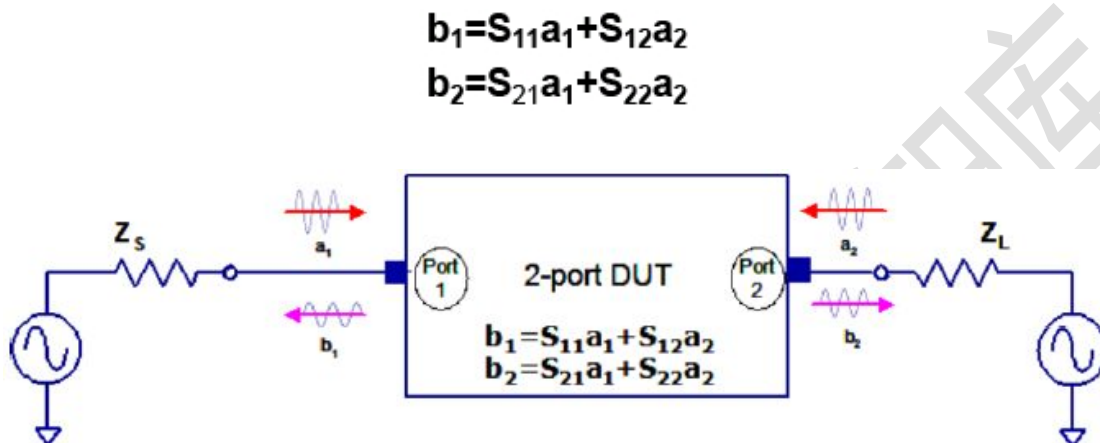


图5 二端口网络S参数关系式

单端四端口或更多端口网络的S参数和二端口网络的测量方法类似。在某一端施加激励信号，其它所有端口端接匹配电阻。得到的S参数矩阵如图6所示。

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}$$

图6 四端口网络S参数矩阵

四端口网络S参数中，S11, S22, S33, S44分别表示各端口的回波损耗/反射系数。S21, S12, S34, S43表示插入损耗/传输增益。S13, S31, S24, S42表示近端串扰 (near end crosstalk)。S14, S41, S23, S32表示远端串扰 (far end crosstalk)。图7表示了串扰的物理意义。近端串扰表示在某端口施加激励，在相近的一端的另外一个端口耦合到的信号。远端串扰的含义就是在较远的一端耦合到的信号。示波器指标中有一项通道隔离度其实就是串扰的一种表现。

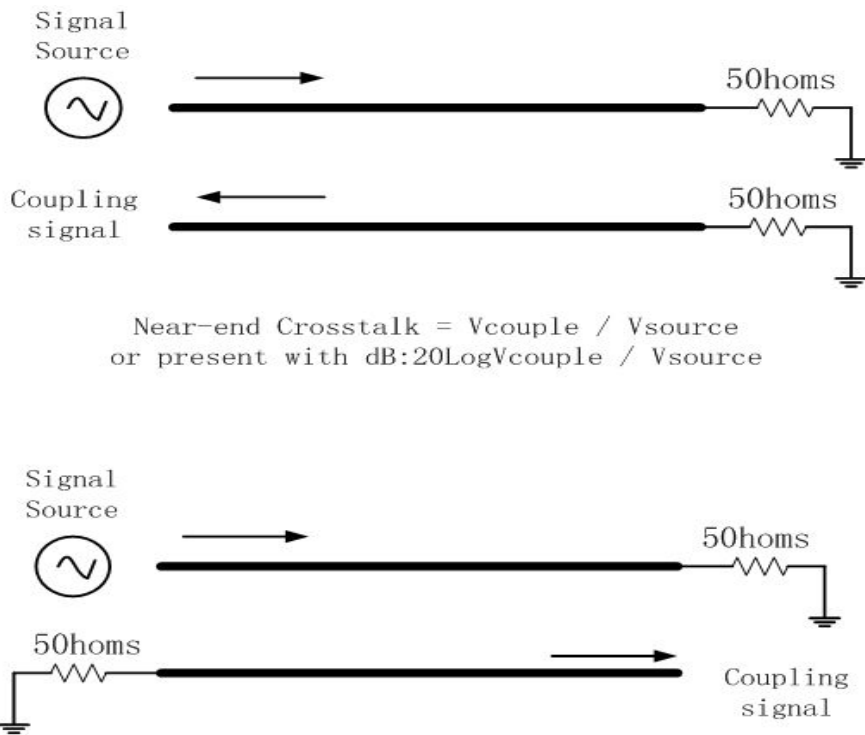


图7 串扰的含义

2.2, S参数图

S参数图可以更加直观地理解S参数的物理意义。S参数图的横坐标表示频率的大小，纵坐标表示幅度或相位的“散射”程度，图8的左图表示S11和S21的幅值S参数图，右图表示S12和S22的幅值S参数图。S21和S12表示的二端口网络在不同频率正弦信号作用下的增益，整体上呈现低通特性，随着频率的增加，能量衰减越大，传输到另外一端的能量就越小，这其实和示波器前端放大器的频响曲线的含义是一样的。对于频率越高的信号，经过相同的PCB或电缆之后的幅值衰减得越快。所谓去加重和预加重就是针对传输网络的这种特性补偿高频衰减的一种解决办法。S11和S22则恰恰相反，随着频率的升高，反射回来的能量就越大。

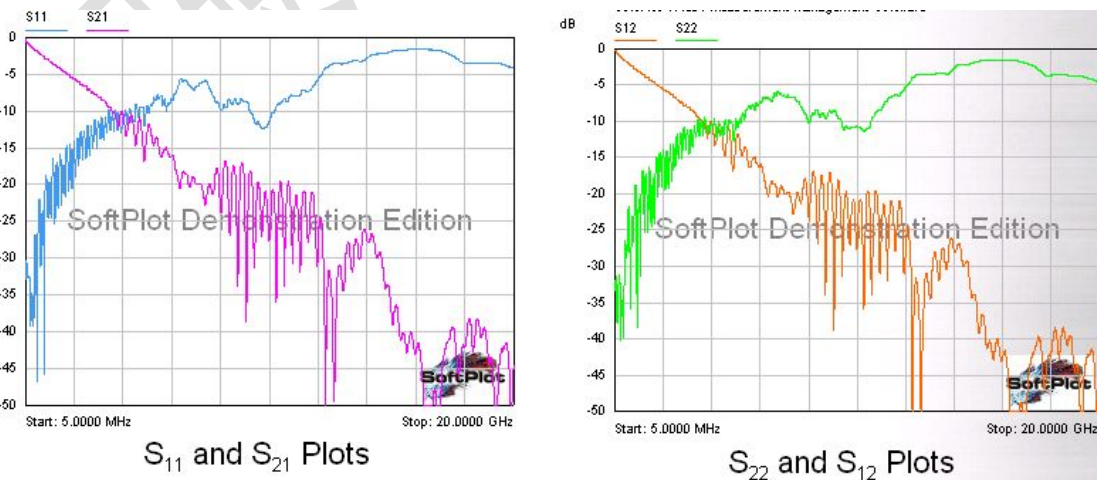


图8 S参数图



2.3、TouchStone文件

TouchStone文件是一种被用于各种仿真软件的标准格式的文件，仿真软件中调用此文件来代表一个器件或电路。TouchStone文件名都是以.snmp为后缀名。n表示端口数。s2p即表示一个2端口网络。s4p表示4端口网络。图9是一个二端口网络的TouchStone文件的实例。该文件是一个纯文本文件，可直接用记事本打开。二端口网络的S参数总共有9列，按频率，幅值S11，相位S11，幅值S21，相位S21，幅值S12，相位S12，幅值S22，相位S22的次序排列。频率按由小到大的从上往下排列，中间的间隔没有严格规定，但必须按从小到大的顺序。值得注意的一点是，用VNA测量得到的TouchStone文件中，没有DC点，即没有0频率，是不能直接被仿真软件调用的，需要进行编辑，补充0频率及相应的S参数数值。该实例中，第一行中的dB表示复数的表达形式，这里的dB表示幅值单位是dB，相位单位是角度。文件中的这个位置上如果显示是MA，则表示幅度和相位都用实际的数值表示。R50表示匹配的参考电阻是50欧姆。

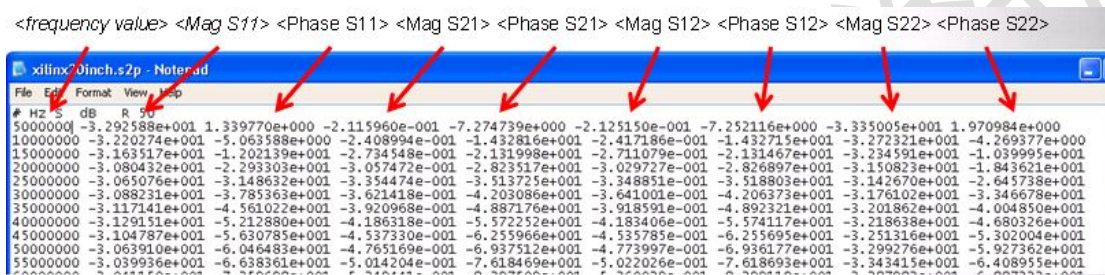


图9 二端口网络TouchStone文件实例

3、直接用于仿真的S参数的特性

不是任何S参数文件都可以直接用于仿真软件。可直接用于仿真软件的S参数需要具备以下特点：1，遵循三大S参数特性原则：无源性（Passivity），互易性（Passivity），因果性（Causality）。VNA产生的S参数由于不遵循这三个特性的原则，需要另外的软件来做这三个原则的检查验证之后才能用于仿真。2，有DC点。VNA产生的S参数不带有DC点，需要另外的方法测量出DC时的S参数值。3，对于差分信号系统，需要混合模式S参数。VNA不能直接产生混合模式S参数。4，S参数以touchstone文件格式保存。

- 无源性 (Passivity)

对于一个无损网络，S矩阵是一个单位矩阵，因此，对于二端口网络存在下面的关系式：

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$$

由于没有损耗，所有散射的总量应是100%。当S21（S11）大的时候，S11（S21）就会小一些，这从前面的S参数曲线可以看出来。

对于无源的二端口网络 $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 \leq 1$ ，因此，一个无源器件的S参数不会大于1（0dB）。VNA测量的S参数结果如果没有经过软件进行无源性验证，其S参数值会出现出现大于0dB的情形，不能直接用于仿真软件。

$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2$ 表示为功率散射比，这个值越小，说明损耗越大。

- 互易性 (Passivity)

如果一个器件是可交换方向使用，而不是单相的如隔离器、环行器，S矩阵是对称的，因此， $S_{ij}=S_{ji}$ 。





• 因果性 (Causality)

所谓因果性就是先有激励才有输出。对于无源系统S参数，由于信号的传输一定会产生一定的延时，因此无源系统的S参数应该是符合因果性原理的，但实际测得的S参数往往会由于种种原因产生一定的非因果性。很多信号完整性仿真软件需要符合因果性特征的S参数，否则仿真时可能会产生发散现象，导致不正确的仿真结果。

4, 混合模式的S参数

差分传输系统早已成为高速信号系统传输的主流。如果差分传输线的距离很近，差分线之间能很好的耦合，差分信号完全对称,任何引入的噪声对两条差分传输线的影响是相同的,那么在芯片的接收端,由于减法运算,引入的共模噪声就被消除了。然而,实际的差分系统并不是完美的,构成差分信号的两个单端信号本身的不平衡,两个通道的长度不相等,耦合不紧密等都会导致能量由差模向共模转换。由于实际的差分信号总是由差模信号和共模信号组成 ($V_{out} = A_D(V_{in+} - V_{in-}) + A_{CM}(V_{in+} + V_{in-})/2$),单端的四端口S参数矩阵并不能提供关于差模和共模匹配和传输的有洞察力的信息。因此,1995年提出的混合模式S参数成为评价差分传输系统的重要工具。

笔者常说,各种各样的串行数据标准描述的都是关于“两根线”的故事。如果不是用来传输差分信号,这“两根线”组成的是一个单端四端口的网络,单端四端口S参数矩阵描述了每个端口受到激励分别有什么样的响应。如果是用来传输差分信号,这个单端四端口网络就可以理解为了一个差分二端口网络,如图10所示,混合模式S参数从物理意义上理解正是描述了成对的两根线对两个信号之和(共模)和两个信号之差(差模)的分别有什么样的响应。

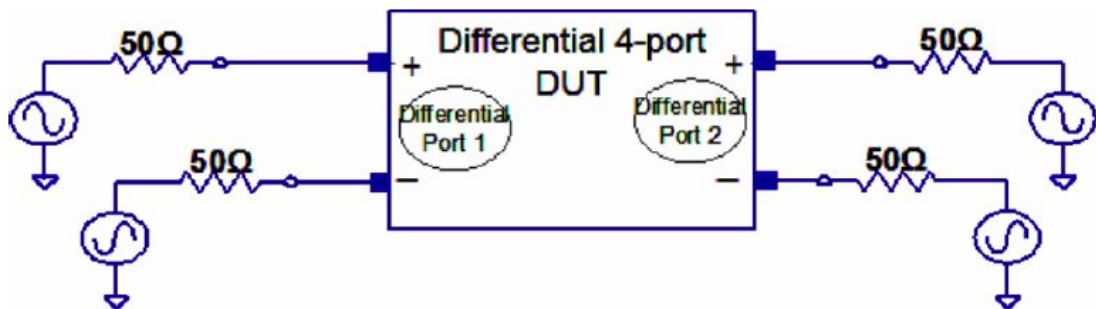


图10 混合模式S参数测量

单端四端口S参数和混合模式S参数之间是可以相互转换的,如图11所示。因此通过测量单端四端口的S参数来推导出混合模式的S参数。

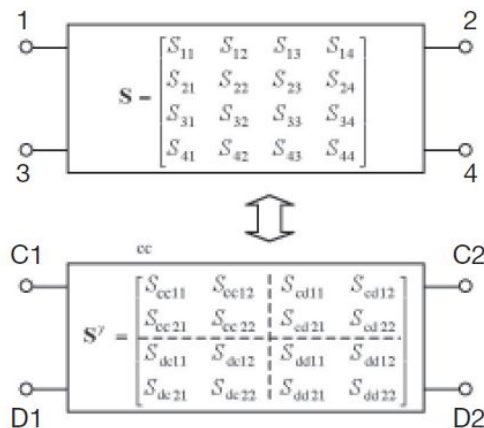


图11 单端四端口S参数和混合模式S参数之间的转换



混合模式S参数矩阵四个象限中包含了四种类型的混合模式S参数。第一象限以 S_{cc} 开头的表示共模S参数，第四象限以 S_{dd} 开头的表示差模S参数。其它两象限的 S_{dc} 表示差模向共模的转换， S_{cd} 分别共模向差模的转换。如果这两根线有很好的对称性， S_{dc} 和 S_{cd} 为零，表示差模和共模是完全独立的。 S_{dd21} 表示差分端口1到差分端口2的差模增益，其它符号的含义类推。

用混合模式S参数表示两端口差分系统的输出和输入之间的关系式如下： b_{d1} 表示1端口的差分输出， a_{d1} 表示1端口的差分输入。

$$\begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} & S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} & S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} & S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} & S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix}$$

5, S参数的测量方法

S参数的测量方法有两种，一种是基于扫频测量的原理（VNA），另外一种是基于快沿阶跃响应的原理（TDR）。

图12是VNA的原理框图，主要包括以下部分：（1）激励信号源：提供感兴趣的频率范围内的入射信号；（2）信号分离装置：含功分器和定向耦合器，分离出入射，反射和传输信号；（3）接收机：对被测件的入射，反射和传输信号进行测试；（4）处理显示单元：对测试结果进行处理和显示。

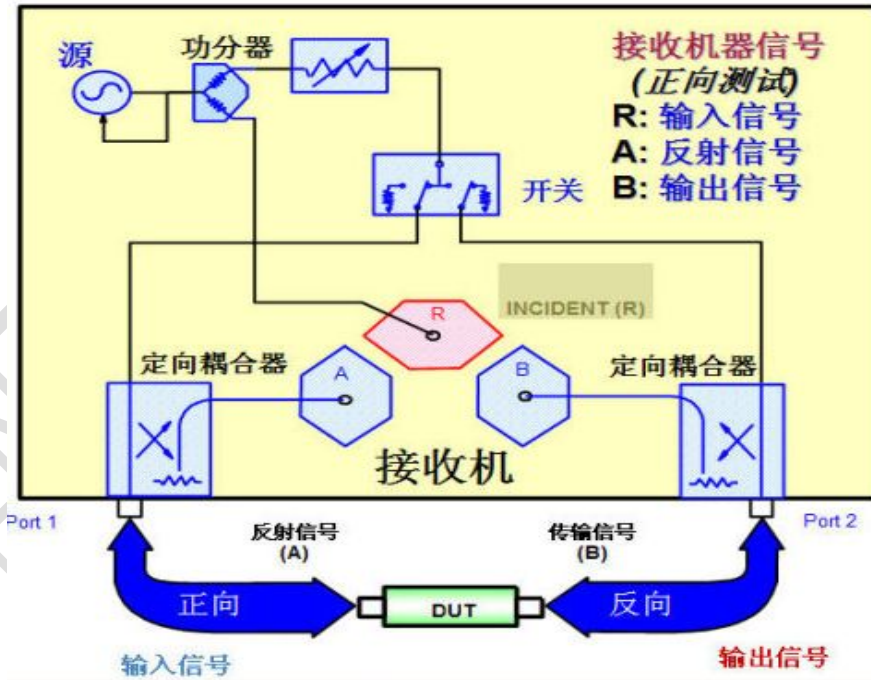


图12 VNA的原理框图

VNA的测量过程中会产生六大系统误差：（1）与信号泄露相关的方向误差；（2）与信号泄露相关的串扰误差；（3）与反射相关的源失配；（4）与反射相关的负载阻抗失配；（5）由测试接收机内部的反射引起的频率响应误差；（6）由测试接收机内部的传输跟踪引起的频率响应误差。因此在使用前需要进行严格的校准。



正确的校准是使用VNA的一个难点。VNA测量出来的S参数是否有错误并不能通过VNA直接能检查出来，只有导入仿真软件仿真出结果发现有小时可能会怀疑是S参数测量有问题，再返回来检查VNA校准VNA测量时的操作有没有错误。

理论上来说，任何信号在时域和频域上是一一对应的，而且是可以相互转换的。这为基于阶跃响应的时域TDR/TDT方法测量S参数提供了可能。图13表示采用TDR/TDT方法测量S₂₁，S₁₂的原理。ST-20是采样示波器件的TDR模块，可以产生ps级的快沿并可作为20GHz带宽的采样头。假设Channel2为端口1，Channel3为端口2，Channel1产生快沿信号作为入射波经过PCB走线后由Channel3接收该信号。入射的快沿信号和采样到的信号都可经过FFT变换分解成从一定频率范围的信号，经过计算得到频域的S参数。



图13 基于TDR/TDT方法测量S参数

其实在谈到VNA和TDR两种方法测量S参数的区别时，我们会自然联系到示波器的前端频率响应曲线的测量方法。可以通过传统的扫频描点的方法（调节正弦波信号源的频率，然后分别测量不同频率时示波器测量到的峰峰值）来测量频响曲线，但也可以通过快沿信号输入到示波器，对采样到的快沿信号做FFT的方法来快速简便地测量频响曲线。这两种方法测量示波器频响曲线的原理上的区别和测量S参数的两种方法的区别是一个道理。

近些年来三个仪器厂商基于TDR原理测量S参数的实践证明了两种测量方法在频率不是特别高的时候符合度非常高，如图14所示为两种方法测量的S参数的结果对比。但基于TDR的方法存在有动态范围不太高的缺点。基于TDR测量S参数源于TDR的原理，但通过专利算法在提高动态范围上获得突破，而且在一键操作实现自动化校准方面的创新，具备时域分析能力和S参数文件可以直接被SI仿真软件调用等特点。

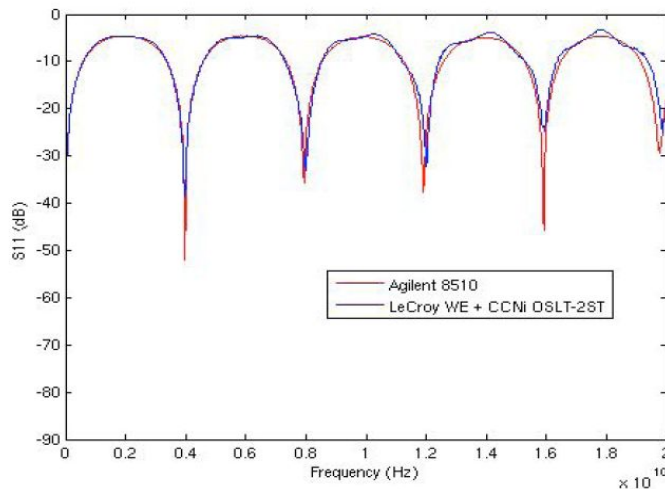


图14 VNA和TDR方法测量的S参数一致性很好





欢迎交流：

如果您想和本文作者进行进一步的技术交流，敬请发送电子邮件到 specialist@hwthinktank.com。如果您想要本文章的 PDF，请直接在微信对话框中回复您的电子邮箱地址，工作人员将在两个工作日内发送本文的 PDF 版本给您。

版权声明：

本微信所有文章皆为鼎阳硬件设计与测试智库专家呕心沥血之原创。希望我们的经验总结能够帮助到更多的硬件人，欢迎转载！我们鼓励分享，但也坚决捍卫我们的权益。引用请注明出处——“鼎阳硬件设计与测试智库”微信号（SiglentThinkTank）。鼎阳硬件设计与测试智库将保留追究文章非法盗用者法律责任的权利！”

【关于鼎阳】

鼎阳科技（SIGLENT）是一家专注于通用电子测试测量仪器及相关解决方案的公司。

从 2005 推出第一款数字示波器产品至今，10 年来鼎阳科技一直是全球发展速度最快的数字示波器制造商。历经多年发展，鼎阳产品已扩展到数字示波器、手持示波表、函数/任意波形发生器、频谱分析仪、台式万用表、直流电源等通用测试测量仪器产品。2007 年，鼎阳与高端示波器领导者美国力科建立了全球战略合作伙伴关系。2011 年，鼎阳发展成为中国销量领先的数字示波器制造商。2014 年，鼎阳发布了中国首款智能示波器 SDS3000 系列，引领“人手一台”型实验室使用示波器由功能示波器向智能示波器过渡的趋势。目前，鼎阳已经在美国克利夫兰和德国汉堡成立分公司，产品远销全球 70 多个国家，SIGLENT 正逐步成为全球知名的测试测量仪器品牌。

【关于鼎阳硬件设计与测试智库】

鼎阳硬件设计与测试智库（简称鼎阳硬件智库）由深圳市鼎阳科技有限公司领衔创办，是中国第一家“智力众筹”模式的硬件智库。

鼎阳硬件智库顺势顺势，倡导“连接-分享-协作-创造”的理念，高举志愿者服务的大旗，相信互联网是“爱”的大本营，相信人们都有发自内心分享的愿望。

鼎阳硬件智库选择硬件领域最普遍的七类问题：电源，时钟，DDR，低速总线，高速总线，EMC，测试测量进行聚焦。寻找“最针尖”的问题进行研讨，针对“最针尖”的问题组织专家答疑，将硬件大师积累的宝贵知识和经验变成公众财富，惠及更多硬件人。

鼎阳硬件智库的运作载体包括“线上”的微信公众号分享，微信群，网站，网络社区论坛，博客，邮件群等多种互联网工具和“线下”的专家论坛和专家把脉。“线上”的分享坚持原创，坚持干货，保持专注和深耕。“线下”专家论坛邀请硬件相关的一线实战派专家分享“最干货”的硬件设计与测试知识与经验，面对面相互研讨；“线下”的专家把脉，通过大数据连接，促使具体问题和最熟悉这个具体问题的专家“精准匹配”，远程问诊和现场解决问题相结合。

鼎阳硬件智库，群策群力，连接所有硬件人。

有硬件问题，找鼎阳硬件智库。

