

非常见问题第202期： RF揭秘：散射参数 及其类型

Anton Patyuchenko，现场应用工程师

问题：

什么是S参数？它有哪些主要类型？



答案：

S参数描述了RF网络的基本特征，其主要类型有小信号、大信号、脉冲、冷模式和混合模式S参数。

引言

本文延续之前的一系列短文，旨在为非RF工程师讲解RF的奥秘。其中一些RF文章如下：“[RF揭秘——了解波反射](#)”，探讨了波反射；“[如何轻松选择正确的频率产生器件](#)”，探讨了RF信号链中发挥作用的频率产生器件的主要类型。

这一次，我们将介绍在描述任何RF组件时需要用到的一个最基本术语——散射参数（或S参数）。但是，与有关该主题的其他很多文章不同，本文不仅会聚焦S参数的基本定义，而且还会简要概述其在RF工程中常用的主要类型。

基本定义

S参数量化了RF能量是如何通过系统传播的，因而包含有关其基本特征的信息。使用S参数可以将最复杂的RF器件表示为简单的N端口网络。图1显示了一个双端口未平衡网络的例子，该网络可用于表示许多标准RF元件，例如RF放大器、滤波器或衰减器等。

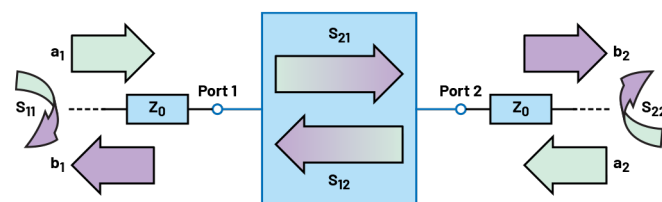


图1. 双端口未平衡 RF 网络

示意图图1显示的波量a是入射在器件端口1和端口2上的电压波的复数幅度。如果使用相应的波量a₁或a₂依次激励一个端口，同时另一个端口端接到匹配的负载中，我们就可以根据波量b来定义器件的正向和反向响应。这些数量代表了从网络端口反射和通过网络端口透射的电压波。基于所得复数响应和初始激励量的比率，我们可以定义双端口器件的S参数，如式1所示：

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}; S_{12} = \frac{b_1}{a_2}; S_{21} = \frac{b_2}{a_1}; S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (1)$$

然后，我们可以将S参数组成一个散射矩阵(S-Matrix)来反映其所有端口的复数波量之间的关系，由此表示该网络的内在响应。

对于双端口未平衡网络，激励-响应关系的形式如式2所示：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于任意N端口RF器件，可以类似方式定义S矩阵¹²。

S参数的类型

如果没有明确说明，则“S参数”一词通常是指小信号S参数。它表示RF网络对小信号激励的响应，量化了线性工作模式下不同频率的反射和透射特性。使用小信号S参数，我们可以确定基本RF特性，包括电压驻波比(VSWR)、回报损耗、插入损耗或给定频率的增益。

然而，如果不断增加通过RF器件的信号功率水平，通常会导致更明显的非线性效应。这些效应可以利用另一种类型的散射参数——即大信号S参数——来量化。它们不仅会随着频率不同而变化，而且也会随着激励信号的功率水平不同而变化。此类散射参数可用于确定器件的非线性特性，例如压缩参数。

小信号和大信号S参数通常均利用连续波(CW)激励信号并应用窄带响应检测来测量。但是，许多RF器件被设计为使用脉冲信号工作，这些信号具有宽频域响应。这使得利用标准窄带检测方法精确表征RF器件具有挑战性。因此，对于脉冲模式下的器件表征，通常使用所谓的脉冲S参数。这些散射参数是通过特殊的脉冲响应测量技术获得的³。

还有一类我们平时很少谈论但有时可能变得很重要的S参数，那就是冷模式S参数。“冷模式”一词是指有源器件在非活动模式（即其所有有源元件都不工作，例如晶体管结反向或零偏置且无传输电流流动）下获取的散射参数。此类S参数可用于改善带关断状态元件的信号链分段的匹配，这些元件会在信号路径中引起高反射。

到目前为止，我们为单端器件的典型示例定义了S参数，其中激励和响应信号均以地为基准。但是，对于具有差分端口的平衡器件，此定义还不够。平衡网络需要更广泛的表征方法，它必须能够充分描述其差分模式和共模响应。这可以利用混合模式S参数来实现。图2显示了混合模式散射参数的一个例子，这些参数组成一个扩展S矩阵，代表一个典型的双端口平衡器件。

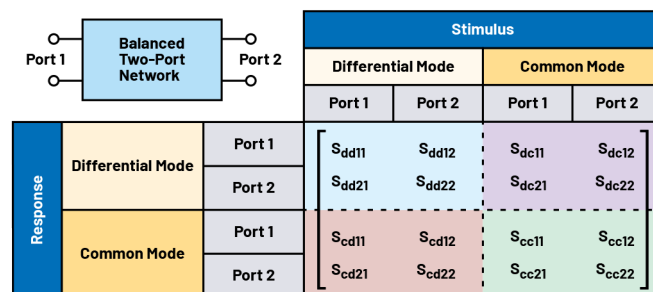


图 2 双端口平衡 RF 网络及其混合模式散射矩阵

此矩阵中的混合模式S参数的下标使用如下命名约定：b模式、a模式、b端口和a端口，前两个描述响应端口的模式（b模式）和激励端口的模式（a模式），后两个指定这些端口的索引号，b端口对应响应端口，a端口对应激励端口。在示例中，端口模式由下标定义，d表示差分模式，c表示共模模式。但是，在同时具有平衡端口和未平衡端口的更一般情况下，混合模式S矩阵还

会有其他元素，下标s描述针对单端端口获得的量。利用混合模式散射参数，我们不仅可以确定RF器件的基本参数，例如回波损耗或增益，还可以确定用于表征差分电路性能的关键品质因数，例如共模抑制比(CMRR)、幅度不平衡和相位不平衡程度。

结论

本文介绍了散射参数的基本定义，并简要讨论了其主要类型。S参数可用于描述RF器件在不同频率下和对于信号的不同功率水平的基本特性。RF应用的开发高度依赖于描述RF设计的整体结构和组成部分的S参数数据。RF工程师测量或依赖已经存在的S参数数据，该数据通常存储在称为Touchstone或SNP文件的标准文本文件中。当今市场上的大部分常用RF器件都有这种免费提供的文件。



作者简介

Anton Patyuchenko于2007年获得慕尼黑技术大学微波工程硕士学位。毕业之后，Anton曾在德国航空航天中心(DLR)担任科学家。他于2015年加入ADI公司，担任现场应用工程师，目前为ADI公司战略与重点客户提供现场应用支持，主要负责RF应用。联系方式：anton.patyuchenko@analog.com。

ADI公司提供丰富的集成RF器件组合，它们能够满足广泛应用中的各种严苛要求。为了支持RF工程师并简化目标应用的开发过程，ADI公司围绕RF技术提供完整的生态系统，包括各种RF产品的散射参数、[设计工具](#)、[仿真模型](#)、[参考设计](#)、[快速原型制作平台](#)和[论坛](#)。

结论

¹ David Pozar. *Microwave Engineering*, 第四版。Wiley, 2011年。

² Michael Hiebel. *Fundamentals of Vector Network Analysis*. Rohde & Schwarz, 2007年。

³ "Pulsed Measurements Using Narrowband Detection and a Standard PNA Series Network Analyzer". Keysight Technologies, 2017年12月。

