

# 差分散射参数测试

作者：王险峰（MAXIM 公司高级射频工程师）

## 关键词

散射参数、差模分量、共模分量、网络分析仪

## 概述：

该文章主要讨论三个问题：1）如何用单端矢量网络分析仪测量差分网络的散射参数；2）差分网络到单端网络转换时的共模干扰问题；3）双端网络双共轭匹配问题。

## Abstract:

Often we encounter this question that we need to evaluate one balance type component with single ended Vector Analyzer; this document will discuss this question. The value point of this article is that a new type S-parameter is discussed here to describe multi-port network, and use this S-parameter, we can easy to design matching circuit.

## 问题提出

在设计手机的射频电路时，我们常会遇到带有差分端口的低噪声放大器、混频器、声表滤波器等。下图是 TD-SCDMA 手机射频接收电路，其中 MAX2392 的低噪声放大器输出是单端的，而 MAX2392 的混频器输入是差分形式的，低噪声放与混频器之间是一个单端到差分形式的声表滤波器和必要的匹配网络，在设计该匹配网络时，我们需要知道混频器输入端差分散射参数和声表的散射参数，通常我们用的网络分析仪都不是差分型的，我们该如何测试，下面则以对声表的测试为例来说明。

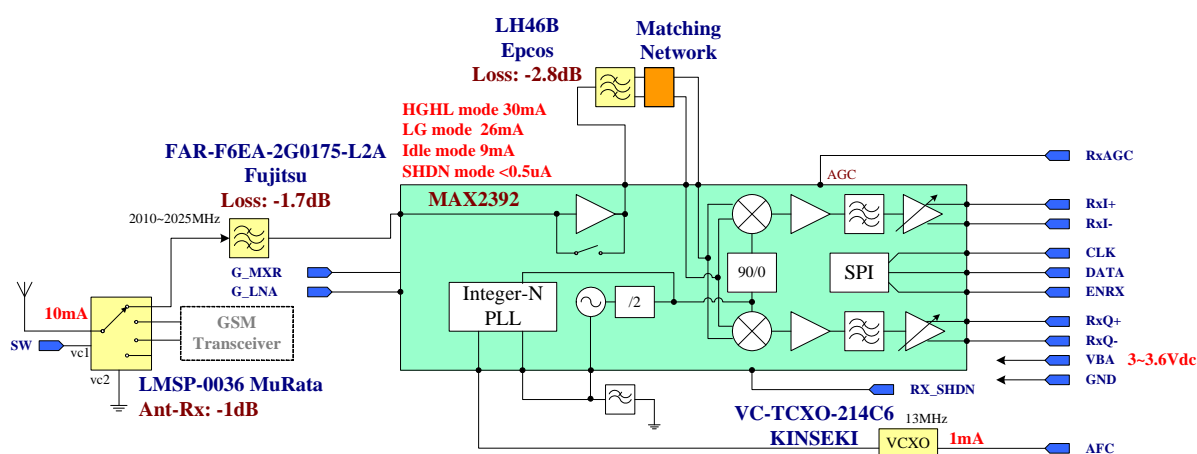


图 1: MAXIM 公司 TD-SCDMA 手机射频接收电路

## 差分散射参数测试

### 物理三端口散射参数

在设计该手机的射频电路时，我们选用的是 Epcos 公司的 LH46B 声表面波滤波器，Epcos 公司提供了一块评估板，如下图：

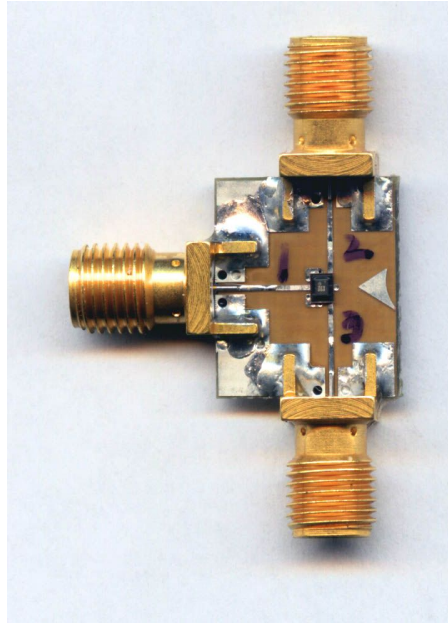


图 2: Epcos 公司射频声表评估板

上图所示，端口 1 为单端型输入端口，端口 2、3 组成差分型输出端口。在评估该器件时，我们先将其视为一般的三端口网络，用一般的矢量网络分析仪很容易测得其三端口散射参数，具体过程如下：

- I 端口 3 接匹配负载，用网络分析仪测端口 1、2 的双端散射参数，记为  $SA$ ；
- I 端口 2 接匹配负载，用网络分析仪测端口 1、3 的双端散射参数，记为  $SB$ ；
- I 端口 1 接匹配负载，用网络分析仪测端口 2、3 的双端散射参数，记为  $SC$ ；

I 物理三端口网络散射参数为：
$$ST = \begin{bmatrix} SA_{11} & SA_{12} & SB_{12} \\ SA_{12} & SA_{22} & SC_{12} \\ SB_{12} & SC_{12} & SC_{22} \end{bmatrix}$$

## 差分散射参数测试

一般来说，差分端口并不是理想的，通过研究上面我们得到的物理三端口网络散射参数  $ST$ ，你会发现：

$$ST_{12} \neq ST_{13}e^{ip} \quad \text{等式 1}$$

$$ST_{22} \neq ST_{33} \quad \text{等式 2}$$

理想情况下，端口 1 加一点频激励信号，在端口 2 与端口 3 应得到大小相等，相位差 180 度的信号，也就是说在端口 2 与端口 3 上得到一个差分信号，实际上在端口 2 与端口 3 上还存在着大小与相位都相等的信号，即共模信号。若将差模信号看作一个端口，共模信号看作一个端口，再加上原来的端口 1，这样就组成了一个新的三端口网络。为便于叙述，我们称该新的三端口网络为模式三端口网络。下面就来分析模式三端口网络的散射参数。

### 模式三端口网络散射参数

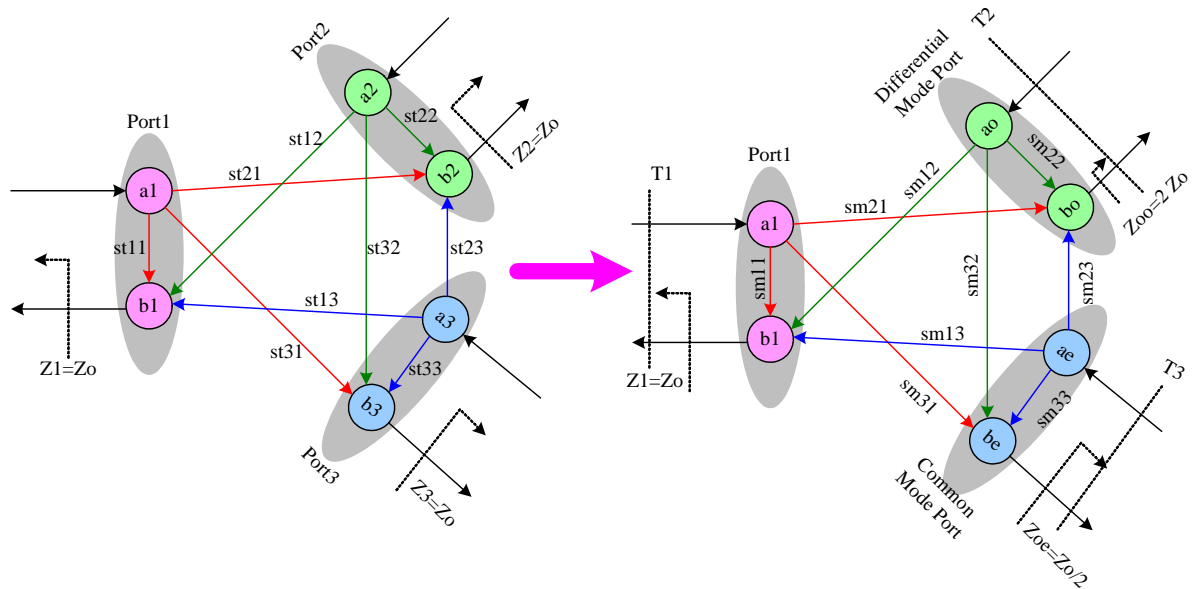


图 3：散射参数信号流图

现在的问题是该如何由物理三端口网络的散射参数导出模式三端口网络的散射参数。声表器件属于无源网络，且不含有各向异性介质材料，其散射参数必然是互易的，就是说物理三端口网络仅有 6 个独立参数。差模与共模信号只是端口 2 与端口 3 信号的

## 差分散射参数测试

线性组合，所以模式 3 端口网络的散射参数也必然是互易的，即只有 6 个独立参数（ $SM_{11}, SM_{21}=SM_{12}, SM_{31}=SM_{13}, SM_{22}, SM_{32}=SM_{23}, SM_{33}$ ）。观察图 3 可以看到端口 1 在两种散射参数信号流图中未变，故：

$$SM_{11} = ST_{11} \quad \text{等式 3}$$

$SM_{21}$  是反映有端口 1 来激发出差模信号能力的参数，根据差模信号的定义，我们知道它应是  $ST_{12}$  与  $ST_{13}$  的差，考虑到差模端口等效为将端口 2 与端口 3 串接起来，故其此时特征阻抗已是原来两倍。假定端口 2 信号的相位为差模信号相位，这样我们可以得到：

$$SM_{21} = \frac{ST_{12} - ST_{13}}{\sqrt{2}} \quad \text{等式 4}$$

$SM_{31}$  是反映有端口 1 来激发出共模信号能力的参数，根据共模信号的定义，我们知道它应是  $ST_{12}$  与  $ST_{13}$  和的一半，考虑到共模端口等效为将端口 2 与端口 3 并接起来，故其此时特征阻抗已是原来一半，这样我们可以得到：

$$SM_{31} = \frac{ST_{12} + ST_{13}}{2 * \sqrt{1/2}} = \frac{ST_{12} + ST_{13}}{\sqrt{2}} \quad \text{等式 5}$$

$SM_{22}, SM_{32}$  分别是反映端口 2 与端口 3 在等幅反相信号激励时，在反射波中产生差模分量与共模分量能力的一个量，我们将物理三端口网络的端口 1 接匹配负载，端口 2 加激励信号  $a_2 = \sqrt{1/2}$ ，端口 3 加激励信号  $a_3 = -\sqrt{1/2}$ ，这两个激励信号合起来等效为在差模端口加激励信号  $am_2 = \frac{\sqrt{1/2} - (-\sqrt{1/2})}{\sqrt{2}} = 1$ 。现在分别计算端口 2 与端口 3 反射波中差模与共模信号成分，它们在数值上应分别等于  $SM_{22}, SM_{32}$ 。

$$SM_{22} = bm_2 = \frac{b_2 - b_3}{\sqrt{2}} = \frac{ST_{22} a_2 + ST_{23} a_3 - ST_{33} a_3 - ST_{23} a_2}{\sqrt{2}} = \frac{ST_{22} + ST_{33} - 2 ST_{23}}{2} \quad \text{等式 6}$$

## 差分散射参数测试

$$SM_{32} = bm_3 = \frac{b_2 + b_3}{\sqrt{2}} = \frac{ST_{22} a_2 + ST_{23} a_3 + ST_{33} a_3 + ST_{23} a_2}{\sqrt{2}} = \frac{ST_{22} - ST_{33}}{2} \quad \text{等式 7}$$

$SM_{33}$  是反映端口 2 与端口 3 在等幅同相信号激励时，在反射波中产生共模分量能力的一个量，我们将物理三端口网络的端口 1 接匹配负载，端口 2 与端口 3 同时加激励信号  $a_2 = a_3 = \sqrt{1/2}$ 。这两个激励信号合起来等效为在共模端口加激励信号  $am_3 = \frac{\sqrt{1/2}}{\sqrt{1/2}} = 1$ 。现在来计算端口 2 与端口 3 反射波中共模信号成分，它在数值上应等于  $SM_{33}$ 。

$$SM_{33} = bm_3 = \frac{b_2 + b_3}{\sqrt{2}} = \frac{ST_{22} a_2 + ST_{23} a_3 + ST_{33} a_3 + ST_{23} a_2}{\sqrt{2}} = \frac{ST_{22} + ST_{33} + 2 ST_{23}}{2} \quad \text{等式 8}$$

综合等式 3 至等式 8，我们可以得到完整的模式三端口网络散射参数，整理如下：

$$SM = \begin{bmatrix} ST_{11} & \frac{ST_{12} - ST_{13}}{\sqrt{2}} & \frac{ST_{12} + ST_{13}}{\sqrt{2}} \\ \frac{ST_{12} - ST_{13}}{\sqrt{2}} & \frac{ST_{22} + ST_{33} - 2ST_{23}}{2} & \frac{ST_{22} - ST_{33}}{2} \\ \frac{ST_{12} + ST_{13}}{\sqrt{2}} & \frac{ST_{22} - ST_{33}}{2} & \frac{ST_{22} + ST_{33} + 2ST_{23}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{等式 9}$$

需要特别注意的是此处得到的该散射参数各端口并不是利用统一的特征阻抗作归一化，假定端口 1 的特征阻抗为  $Z_0$ ，则端口 2（差模信号端口）为  $2 Z_0$ ，端口 3（共模信号端口）为  $Z_0/2$ 。

### 共模抑制比

MAX2392 是一个零中频的射频接收机，为解决本振信号的泄漏问题，MAXIM 公司采用了差分形式的混频器，从图 1 看到当共模形式的本振信号有混频器输入端泄漏出来时，声表会对此产生抑制（此处回避了匹配网络的影响），这儿可以定义共模抑制比如下：

## 差分散射参数测试

$$CMRR_{1-3} = -20\log(|SM_{13}|)$$

等式 10

该共模抑制比反映了泄漏到天线端口的本振信号大小，该共模抑制比越大越好，下图是根据 EPCOS 公司 LH46B 的测试数据计算出的曲线：

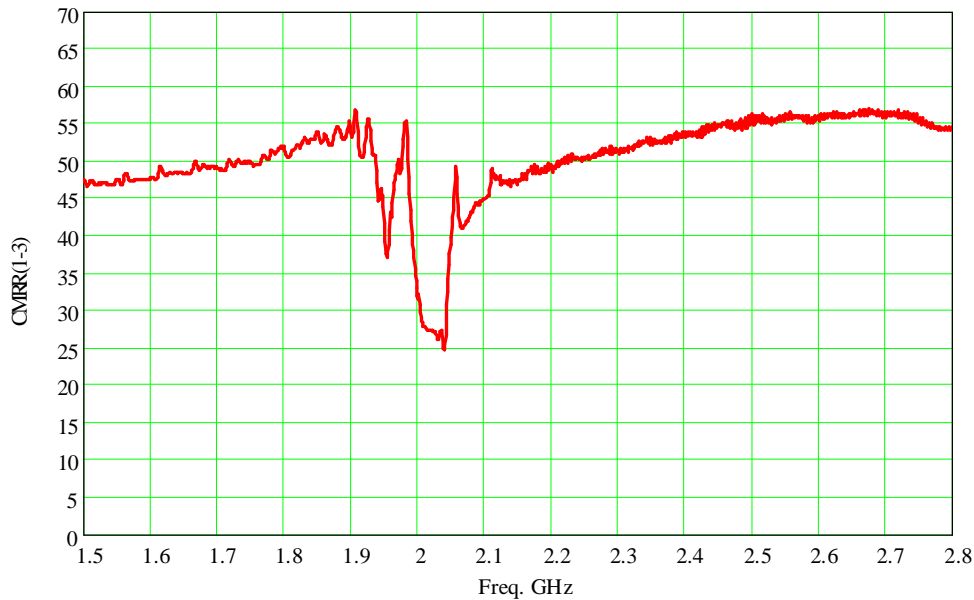


图 4：共模抑制比（端口 1 至共模端口）

研究图 3 所示的散射参数信号流程图，我们发现还有另外一种共模到差模的转换形式：

$$CMRR_{2-3} = -20\log(|SM_{23}|)$$

等式 11

该共模抑制比优劣与直流偏移量有关。本振信号通过空间辐射等途径耦合到 LH46B 差分端口应是共模信号，该共模信号经 LH46B 反射后产生的差模信号会直接加到混频器输入端，从而与本振自混频产生直流。该共模抑制比越大越好，下图是根据 EPCOS 公司 LH46B 的测试数据计算出的曲线：

## 差分散射参数测试



图 5：共模抑制比（端口 2，3 至共模端口）

### 差分端口匹配问题

通过将物理三端口网络转化为模式三端口网络，我们可以非常方便设计其输入输出匹配电路。一般情况下，共模端口影响较小，在设计匹配电路时认为它始终接匹配负载，这样原有的三端口网络就变成了模式 2 端口网络（端口 1 与差模端口），利用简单的双端口匹配理论即可解决该问题。模式 2 端口网络的散射参数如下：

$$SD = \begin{bmatrix} ST_{11} & \frac{ST_{12} - ST_{13}}{\sqrt{2}} \\ \frac{ST_{12} - ST_{13}}{\sqrt{2}} & \frac{ST_{22} + ST_{33} - 2ST_{23}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{等式 12}$$

为方便叙述，我们称端口 1 为源端，端口 2 为负载端。一般情况下中频声表的匹配电路设计都属于窄带匹配，也就是说只要考虑其中心频点处匹配就可以了；射频声表往往要覆盖较宽的频带，匹配电路相对复杂些，所幸的是一般射频声表不需做什么匹配。此处 MAXIM 的混频器输入阻抗为 200ohm, 我们需要检验一下 EPCOS 的声表平衡端是否为 200ohm? 下面的公式将给出最佳源端与负载端阻抗：

$$\Delta = SD_{11} \cdot SD_{22} - SD_{12} \cdot SD_{21} \quad \text{等式 13}$$

## 差分散射参数测试

$$B_1 = 1 + |SD_{11}|^2 - |SD_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad \text{等式 14}$$

$$C_1 = SD_{11} - SD_{22}^* \cdot \Delta \quad \text{等式 15}$$

$$B_2 = 1 + |SD_{22}|^2 - |SD_{11}|^2 - |\Delta|^2 \quad \text{等式 16}$$

$$C_2 = SD_{22} - SD_{11}^* \cdot \Delta \quad \text{等式 17}$$

$$\Gamma_{sm1} = \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4 \cdot |C_1|^2}}{2 \cdot C_1} \quad \text{等式 18}$$

$$\Gamma_{sm2} = \frac{B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4 \cdot |C_1|^2}}{2 \cdot C_1} \quad \text{等式 19}$$

$$\Gamma_{lm1} = \frac{B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4 \cdot |C_2|^2}}{2 \cdot C_2} \quad \text{等式 20}$$

$$\Gamma_{lm2} = \frac{B_2 - \sqrt{B_2^2 - 4 \cdot |C_2|^2}}{2 \cdot C_2} \quad \text{等式 21}$$

$$\Gamma_{sm} = \begin{cases} \Gamma_{sm1} & \text{if } |\Gamma_{sm1}| \leq 1 \\ \Gamma_{sm2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{等式 22}$$

$$\Gamma_{lm} = \begin{cases} \Gamma_{lm1} & \text{if } |\Gamma_{lm1}| \leq 1 \\ \Gamma_{lm2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{等式 23}$$

$$Z_{sm} = Z_1 \frac{1 + \Gamma_{sm}}{1 - \Gamma_{sm}} \quad \text{等式 24}$$

$$Z_{lm} = Z_2 \frac{1 + \Gamma_{lm}}{1 - \Gamma_{lm}} \quad \text{等式 25}$$



# 差分散射参数测试

下图是根据 LH46B 测试数据计算出的最佳源端与负载端阻抗曲线：

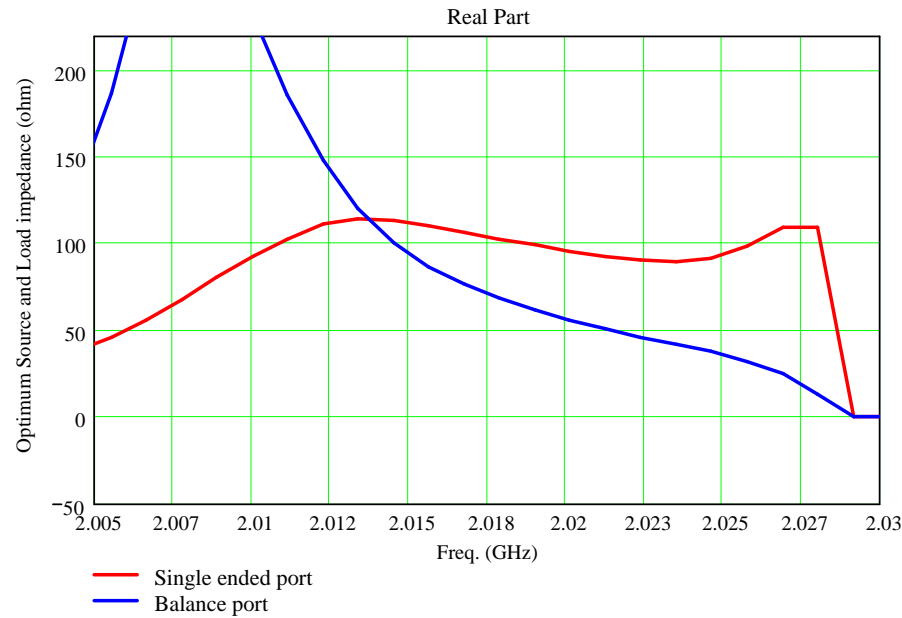


图 6：最佳源端与负载端阻抗曲线实部

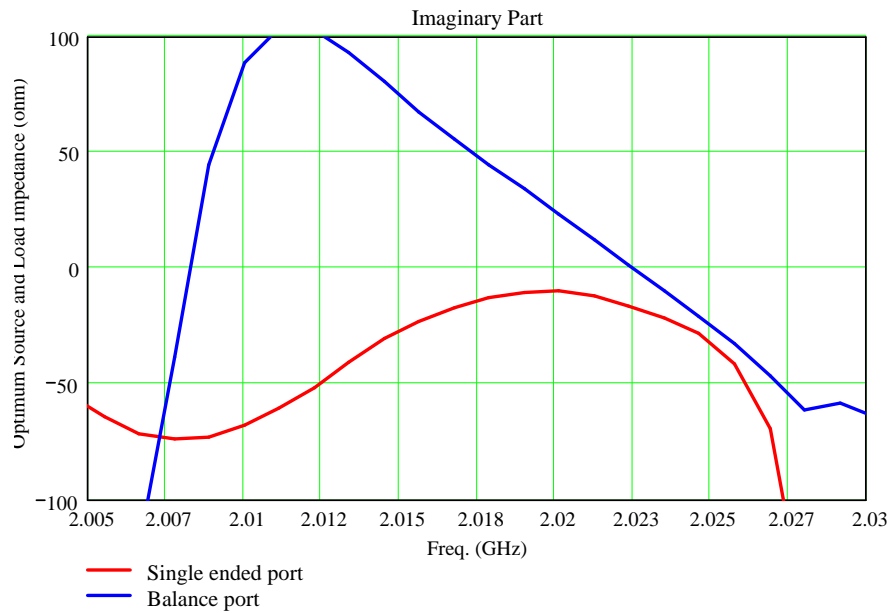


图 7：最佳源端与负载端阻抗曲线虚部

有图 6 与图 7 可以看到在 TD-SCDMA 频段（2010MHz~2025MHz）内，最佳源阻抗与负载阻抗变化较大，故难以用简单电路实现双端共轭匹配。观察最佳负载端阻抗实

## 差分散射参数测试

部曲线，发现其阻抗有频段低端的 220ohm 一直变到频段高端的 40ohm，这里我们取其几何平均值作为最佳负载阻抗，而对于源端我们不作匹配：

$$Z_{lm}(2018MHz) = \sqrt{40 * 220} = 94 \Omega \quad \text{等式 26}$$

利用 SMITH 圆图工具，我们得到如下匹配电路：

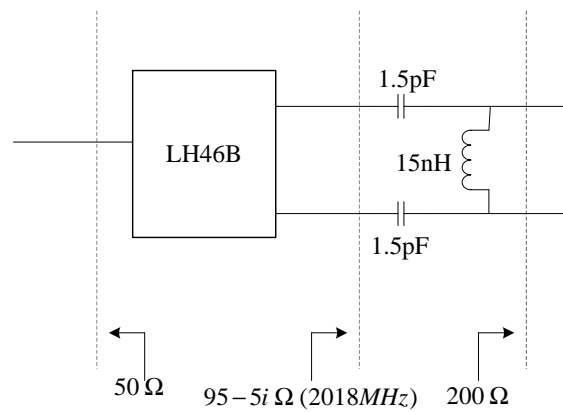


图 8：实际匹配电路

因为 MAX2392 混频器的输入阻抗为 200ohm，所以此处负载端特性阻抗取为 200ohm。下图是作匹配前与匹配后传输特性的一个比较：

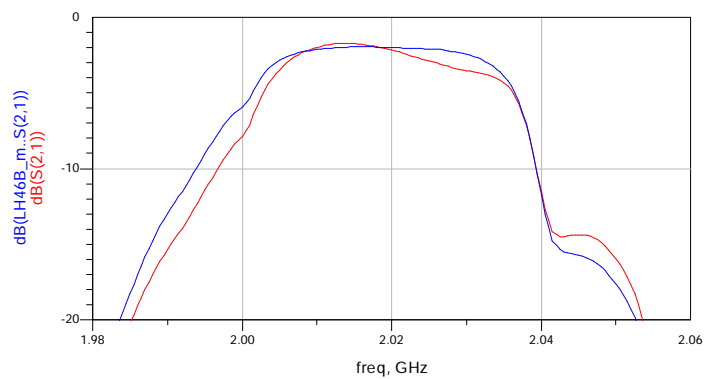


图 9：匹配前后对比

注图 9 中蓝色的曲线是匹配后的仿真结果，红色的是未加匹配电路的仿真结果。匹配改善了带内平坦度，但中心频点处插损略有变差。

## 差分散射参数测试

参考资料:

- 1) 王蕴仪等编《微波器件与电路》，江苏科学技术出版社，1981年。

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),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,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,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>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>