

通信技术

网络分析仪中反射计的双定向耦合器的设计和优化

左海亮 殷兴辉

(河海大学计算机与信息学院, 南京 211100)

摘要 提出一种可以应用于反射计的双定向耦合器的设计,此耦合器由两个微带定向耦合器级联而实现,并且通过理论推导在微带线中心导带上方加入介质片增加奇模电容来实现奇偶模相速度相等,从而提高双定向耦合器的定向性。利用 HFSS 电磁仿真软件成功仿真耦合度为 -10 dB,驻波大于 -15 dB, $2 \sim 3$ G 的宽频带,隔离度大于 -28 dB 能够应用于网络分析仪中反射计的双定向耦合器。

关键词 微带线 双定向耦合器 介电常数 隔离度

中图分类号 TN817; **文献标志码** A

在现代微波测量中对于单端口或双端口网络的反射系数和传输系数的测量仍是非常地广泛,能够精确地测量出一个网络的反射系数可以方便地使网络调整最佳匹配的状态。无论是只测量幅值特性的标量网络分析仪还是可以同时测量幅值和相位的矢量网络分析仪,测量网络的反射系数和传输系数都必须用到反射计。反射计是将微波电路的输入和输出端的功率分别按比例进行提取的器件^[1]。反射计的种类很多,通常用于测量二端口网络参数的反射计有定向耦合器式、电桥式^[2],还有六端口反射计^[3]等。相对于电桥式,定向耦合器式的则显得结构简单,测量结果也可以做的更加地精确;同样相对于六端口反射计,定向耦合器式的则显得结构简单使用方便,同时在尺寸上也可以缩小很多。比如现在广泛实用的微带定向耦合器,在高频带,它的尺寸一般只有几厘米的长和宽,甚至更小,使得设计出的反射计容易安装和携带,所以能够设计出符合指标的定向耦合器很有实用意义。

1 网络分析仪中反射计的应用

在只测量反射参数传输参数幅值特性的标量网络分析仪中,反射计充当将入射、反射和透射微波信号分离开的信号分离器的作用,其组成方案如图1。

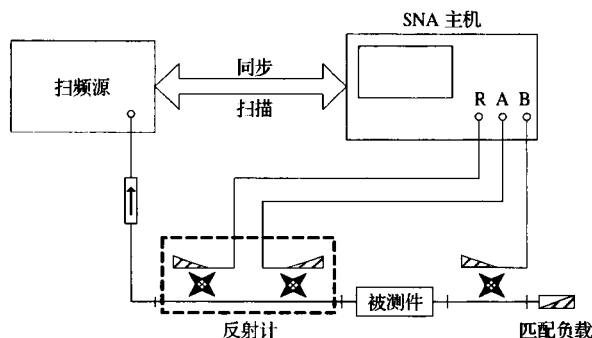


图1 标量网络分析仪的组成方案图

信号从扫频源传出来经过定向耦合器后,一定比例的源信号被耦合到定向耦合器的耦合端,而从负载反射回来的微波信号也会按照一定的比例被耦合到耦合器的另一个耦合端,这样将得到的两组耦合信号送入比值计就可以得到网络的反射系数。假设入射波耦合器的电压耦合系数为 C_1 ,反射波耦合器的电压耦合系数为 C_2 ,入射波反射波电压分别

2013年4月24日收到

第一作者简介:左海亮。E-mail: zu_o_hai_liang@126.com。

是 V_i 和 V_r , 那么两个耦合端口的高频电压分别是 $V_1 = C_1 V_i$ 和 $V_2 = C_2 V_r$, 将这两个信号送入比值器后, 参考文献[1], 可以得到。

$$\frac{|V_2|^2}{|V_1|^2} = \frac{C_2^2 |V_r|^2}{C_1^2 |V_i|^2} = \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 |\Gamma|^2 = k |\Gamma|^2。$$

由于 C_1 和 C_2 通常并非准确已知, 并且两个检波器以及指示器的灵敏度也不会完全一致, 所以比例常数需要通过校准步骤将其测定或者消除, 详细的校准方法在文献[1]和文献[2]中有详细的叙述。

不考虑仪器精度带来的误差, 反射计的误差主要来源于定向耦合器, 由于它一般不会具有理想的方向性, 在用来提取反射波信号的耦合器的耦合输出端中肯定也会有入射波的插入从而给整个测量系统带来误差。这种误差也是反射计的主要误差来源, 而对于这部分误差的计算则会变得十分地复杂, 那么要想准确地测得网络的反射系数, 减少反射计带来的误差, 如何设计出一个具有高定向性低驻波系数的双定向耦合器则是解决问题的关键所在。微带耦合器已经得到了广泛的推广, 但就国内技术而言还是很难制造出高定向性的定向耦合器。本文将利用微带线做一个频带在 2~3 G 之间耦合度在 10 dB 的双定向耦合器并且在驻波比、定向性、耦合度、隔离度这些性能指标满足通用要求。但由于微带线制作的定向耦合器往往由于奇偶模相速度不相等的问题而导致定向性不高, 那么本文也将提出一种提高微带线定向耦合器定向性的设计和优化方法来平衡微带线内奇偶模电容, 使之在较宽的带宽内达到较高的定向性。



图2 单个定向耦合器模型

2 双定向耦合器的设计理论

双定向耦合器可以看成是两个定向耦合器级联起来的器件, 单个定向耦合器的设计理论以及设计模型已经比较成熟, 那么对双定向耦合器的分析, 可以从单个定向耦合器的理论分析入手。单个定向耦合器的模型如图2。

它是一个四端口网络, 用微波网络的理论来分析^[4], 理想情况下, 该四端口网络对称, 无耗, 互易且端口完全匹配则会有:

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0 \quad (1)$$

将式(1)代入散射参数方程组^[4]并令隔离端口完全隔离, 不妨设 $S_{13} = 0$ 则有:

$$\begin{cases} |S_{12}|^2 + |S_{14}|^2 = 1 \\ S_{12}S_{14}^* + S_{14}S_{12}^* = 0 \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出在端口1完全匹配和端口1与端口3之间完全隔离的情况下输入端的功率完全分配到偶合端以及负载端。对于微带线耦合器, 采用奇偶模分析法来分析, 设每个端口的输出电压为 b_1, b_2, b_3, b_4 , 然后用归一化奇偶模反射系数 Γ_{oe}, Γ_{oe} 和传输系数 T_{oe}, T_{oe} 来表示出每个端口的反射电压就可以得到以下方程组。

$$\begin{cases} b_1 = \Gamma_{oe} + \Gamma_{oe} \\ b_2 = \Gamma_{oe} - \Gamma_{oe} \\ b_3 = T_{oe} - T_{oe} \\ b_4 = T_{oe} + T_{oe} \end{cases} \quad (3)$$

利用单根传输线的 A 矩阵: $A = \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ\sin\theta \\ jsin\theta/Z & \cos\theta \end{bmatrix}$, 其中 Z 为传输线的特性阻抗, θ 是微带线的耦合导线的电长度, 以及传输系数和反射系数与 A 矩阵的关系。

$$\begin{cases} \Gamma = \frac{A_{11} + A_{12}/Z - A_{21}Z - A_{22}}{A_{11} + A_{12}/Z + A_{21}Z + A_{22}} \\ T = \frac{2}{A_{11} + A_{12}/Z + A_{21}Z + A_{22}} \end{cases} \quad (4)$$

就可以求得 b_1, b_2, b_3, b_4 , 再将完全匹配和完全隔离的条件: $b_1 = b_3 = 0$ 带入到方程组(3)中可以得到

$$S_{11} = S_{31} = 0 \text{ 且 } Z_o^2 = Z_{oe}Z_{oo}。$$

式中, Z_{oe}, Z_{oo} 分别是奇偶模特性阻抗。

利用传输矩阵 A 和散射矩阵 S 的关系^[4] 可以导出

$$k = S_{21} = \frac{Z_{oe} - Z_{oo}}{Z_{oe} + Z_{oo}} = \frac{jksin\theta}{\sqrt{1 - kcos\theta} + jsin\theta} \quad (5)$$

式(5)中, k 是电压耦合系数,可以看出当电长度等于 $\pi/2$ 时,可以达到最佳耦合。由于奇偶模特性阻抗由微带线之间的线距线宽决定,从公式(5)中可以看出定向耦合器的耦合度和微带线的线宽和线距具有直接的关系,同时电长度,即在 $1/4$ 中心频率的波长左右,也对耦合度影响较大。那么在优化耦合度的时候,线距、线宽以及耦合段的长度将是重要参数。

要使得各端口匹配,达到较好的驻波比,那么微带线的特性阻抗和输入阻抗相等。很多文献中在求微带线的线宽时,由于采用了奇偶模分析法,都先求出微带线的奇偶模特性阻抗以及等效奇偶模介电常数,再综合求取线宽,使得计算相当复杂。这里直接给出微带线的特性阻抗公式,在求取值后利用 HFSS 仿真软件,进行优化就可以得到一个理想的线宽值。设 w 是微带线的线宽, h 是微带线介质板的厚度(往往是给定的,不能够随意修改), ϵ_r 是介质板的介电常数。那么参考文献[5]微带线的特性阻抗公式是:

$$\begin{cases} Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e}} \\ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667\ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right) \\ \epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \end{cases} \quad (6)$$

在知道特性阻抗的情况下根据文献[6]中 Gupta 给出的公式可以求出线宽:

$$A = \frac{Z_o}{60} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right) \quad (7)$$

当 $A > 1.52$ 时,确定线宽的公式有:

$$W = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} h \quad (8)$$

当 $A \leq 1.52$ 时,确定线宽的公式有:

$$W = \frac{2}{Z_o \sqrt{\epsilon_r}} \left\{ \frac{60\pi^2}{Z_o \sqrt{\epsilon_r}} - 1 - \ln\left(\frac{120\pi^2}{Z_o \sqrt{\epsilon_r}} - 1\right) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln\left(\frac{60\pi^2}{Z_o \sqrt{\epsilon_r}} - 1\right) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (9)$$

从公式中可以明显地看出特性阻抗和微带线的线宽和介质板的厚度有关,线宽越宽特性阻抗越小,而介质板的厚度往往是固定的,所以在设计微带线定向耦合器时,微带线的宽度是优化耦合器驻波比的主要参数。

对于一个双定向耦合器,其设计图如图3,它既要提取输入端微波信号也要提取负载端的反射波信号,那么可以将两个定向耦合器级联起来,这样从端口3和端口4分别提取出输入信号和负载反射信号。只要隔离度足够大就可以认为是互不影响的,并且在端口5和端口6接上匹配负载就可以充当一个良好的反射计应用于网络分析仪当中。

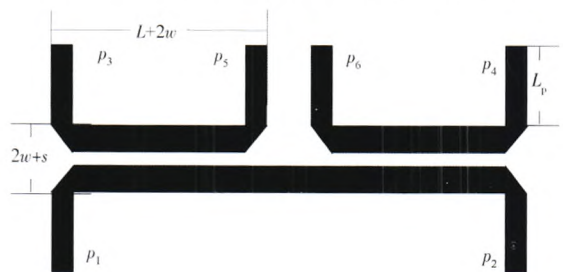


图3 双定向耦合器模型

3 仿真设计和实验结果

用 HFSS 电磁仿真软件先画出实验模型,选择 $\epsilon_r = 4.8$ 厚度 $h = 1.6$ mm 的介质板,输入特性阻抗 $Z_o = 50 \Omega$,耦合度为 10 dB,频带在 2 ~ 3 G 之间。利用 matlab 编程软件可以计算出微带线的线宽 $W = 2.802$ mm,中心导带的耦合长度是中心频率波长的 $1/4$,那中心导带的长度 $L = 13.6931$ mm。在实验时将它的六个端口的引线长度也设定一个变量为 L_p ,便于优化以得到双定向耦合器的最佳指标,将其定在 10 mm 左右,因为大量的仿真实验证明 L_p 的长度将直接影响到双定向耦合器各个 S 参数的平滑程度,选择不当,很可能产生曲线的畸变。至于确定微带线耦合度的关键参数之一线距 s 至今还没有确定的公式能将它算出来,不过由于 s 是耦合

度的最主要决定因素,可以利用仿真软件逐步优化,将找出一个比较理想的值。做一个 10 dB 的定向耦合器,采用这种结构线距通常在 1 mm 以内,那么可以利用 HFSS 仿真软件分别算出线距在 0.1 ~ 1 mm 每隔 0.1 mm 的耦合度的大小,这样可以快速确定线距的取值范围,通过优化最终可以得到线距 $s = 0.465 \text{ mm}$ 。

将得到的算出的值以及探寻出来的值带入到 HFSS 仿真软件的模型尺寸中,然后将可以优化的变量: ϵ_r 、 L 、 L_p 、 s 、 w 全部选中,并设置好优化区间进行优化,最后从所有优化结果中选出结果最好的一组数据的 S 参数图如图 4。

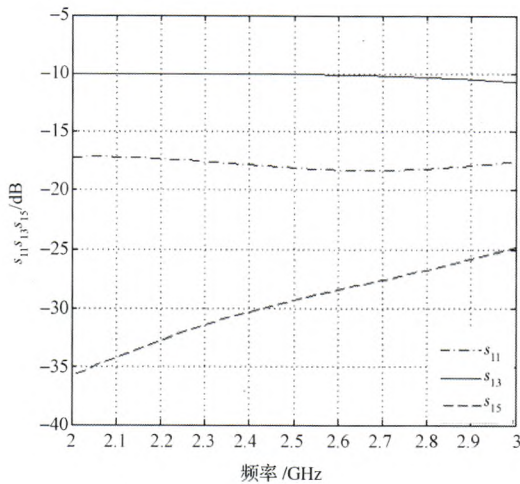


图 4 双向耦合器的 S 参数曲线

图 4 中从上向下依次是耦合度曲线,驻波比曲线,以及隔离度曲线,隔离度在整个频带上都是大于 25 dB,耦合度在 (10 ± 1) dB 的区间内,驻波大于 15 dB,已经满足了实用指标了。

4 双向耦合器的结构优化

由于微带线本身的结构是上面处在空气中下面处在介质中,这种非均匀介电常数结构,参考文献[7]、文献[8]以及文献[9]可以推导出奇偶模电容不等进而奇偶模相速度不等而导致它的定向性一定不会很高。

对于如何提高双向耦合器的定向性,已经有大量的文献提出了很多的方法,比如文献[10]与文献[11]中采用补偿电容来弥补奇偶模电容不等的

问题,文献[12]提出串接电感来实现定向性的提高,这些方法都有效地提高了微带线定向耦合器的定向性。然而从表面上看,微带线的定向性不高是由于其本身非均匀的介电常数的介质(一半是介质基片一半是空气)导致,那么从其本身结构入手,在耦合微带线的中心导带正上方某高度上再加入一块介质片,该介质片的介电常数和基片的介电常数一样为 4.8,厚度取基片的一半为 0.8 mm,长度与微带线的耦合段长度相等为 L ,宽度为 $2w + s$,其结构模型如图 5,图(a)是物理模型的俯视图,图(b)是它的侧视图。这种结构从一定角度上来看有点类似于带状线式的定向耦合器,由于带状线的上下结构是对称的,导带上下介电常数相等,它的奇偶模电容也是相等的,所以不存在奇偶模相速度不等而导致定向性不高的问题,在文献[1]第七章第五节里面有详细的公式推导。采用这种结构使得微带线上方的介电常数增大,从而使得奇模电容增大^[8],奇偶模相速度趋于相等。适当地调节介质片距离导带的高度可以通过仿真看到隔离度曲线的变化趋势,以便于选出理想的高度值。

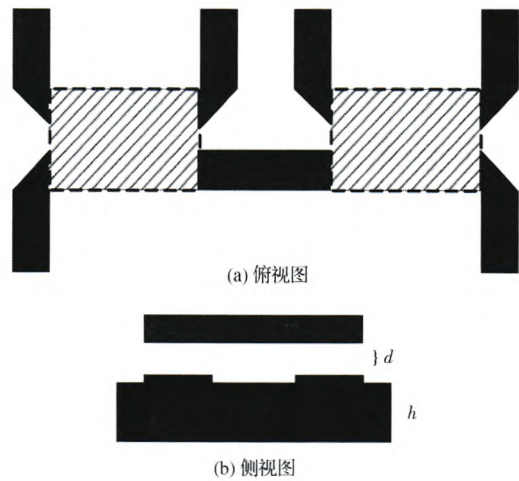


图 5 加了介质片后的模型

在图 4 的结构的双定向耦合器取得理想参数的基础上,加上介质片后,设置介质片距离导带的高度为 d 。采用 HFSS 的参数优化(parametric setup)选项可以很快确定 d 的值在 0.1 ~ 1 mm 之间。然后选中变量 s 、 w 、 L 、 L_p 、 d ,设置好变量范围,利用自动优化(optimization setup)可以方便地得到最佳的 S

参数值。选出最佳结果如图 6。优化后各个参数的值是: $s = 0.4281 \text{ mm}$, $L = 17.7231 \text{ mm}$, $w = 2.7322 \text{ mm}$, $L_p = 11.9644 \text{ mm}$, $d = 0.4872 \text{ mm}$, 介质板的厚度和介电常数是不可改变的,分别为 $\epsilon_r = 4.8$, $h = 1.6 \text{ mm}$ 。可以看出在耦合度驻波比上都是满足指标的,由于采用这种结构主要就是为了提高定向耦合器的定向性。所以比较两种结构的隔离度指标如图 7。图 7 中可以看出,在加了介质片以后,整个带宽里面的定向性是得到了一定的提高,也证实了理论。

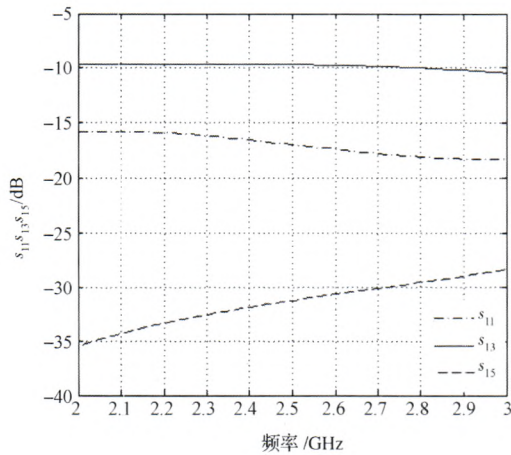


图 6 加入介质片优化后的双定向耦合器的 S 曲线图

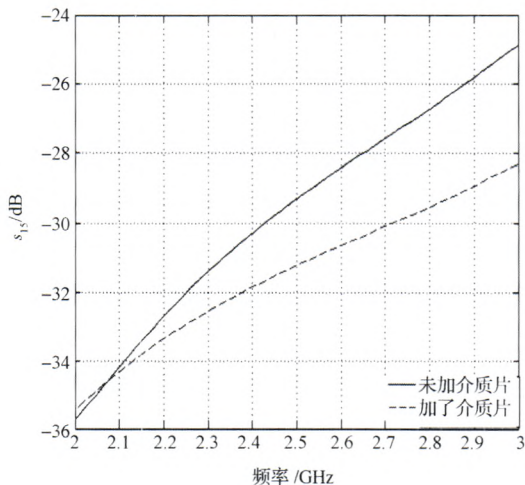


图 7 两种结构的隔离度 S 曲线图

5 总结

对于给定介质板的双定向耦合器,耦合传输线的线宽和线距以及线长决定了它的耦合度,定向性和驻波比,其中耦合度主要由线距决定,驻波比主要由线宽决定,至于提高定向性的方法是一个可以长期研究的方向,本文通过在微带线中心导带的上方加入介质片的方法在不耦合度和驻波比都满足指标的情况下有效地提高了双定向耦合器的定向性,并且也成功制作出了频带在 2~3 GHz 之间,耦合度在 10 dB 左右,驻波比大于 15 dB,隔离度大于 28 dB 的双定向耦合器,也为实现高定向性的微带线定向耦合器提供了一种可实行性方法。但是在制作 10 dB 定向耦合器时,发现线距 s 只有 0.4281 mm,在现实制作加工中很难达到如此精度,那么如何研究出宽线距的紧耦合定向耦合器结构将有非常现实的意义。

参 考 文 献

- 董树义. 近代微波测量技术. 北京:电子工业出版社,1995: 140—162
- 汤世贤. 微波测量. 北京:国防工业出版社,1981; 2:247—281
- 楼小明,李嗣范. 用单六端口反射计测量二端口网络参数. 南京工学院学报,1988;18(6):43—48
- 吴万春. 微波网络及其应用. 北京:国防工业出版社,1980: 295—305
- Pozar D M. Microwave Engineering. 北京:电子工业出版社,2006: 290—300
- 梁昌洪,谢拥军,官伯然. 北京:简明微波. 高等教育出版社,2006:169—204
- Klein J L, Chang K. Optimum Dielectric overlay thickness for equal even-mode and odd-mode phase velocities in coupled micro-strip circuits. Electronics Letters, 1990;26(5): 274—276
- Dydyk M. Microstrip directional couplers with ideal Performance via single-element compensation. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1999;47(6):956—964
- Dydyk M. Accurate design of microstrip directional couplers with capacitive compensation. IEEE MTT-S International, 1990; 8—10: 581—584
- 韩磊,商坚钢. 一种新颖三元件补偿的微带线定向耦合器研究. 微波学报, 2010;26(1), 64—68

(下转第 7189 页)

Design and Implementation of FPGA-based High-speed Solid-state Memory

HUAN Tao, ZHANG Hui-xin, LIANG Yong-gang

(National Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, P. R. China)

[**Abstract**] Based on the demand in the aerospace, communication, meteorological, a new type of solid-state memory is proposed. It uses a programmable logic device FPGA as the control, with mixed knitting frame technology and multi-channel digital, analog and pulse signal storing, Samsung Nano Flash as the storage medium. It uses dual-plane technology and pipeline technology mix, which greatly improves the efficiency of deposit number, and achieves the desired design requirements.

[**Key words**] FPGA mixed knitting frame dual-plane technology pipeline technology

(上接第 7179 页)

- 11 Kim Chulsoo, Lim Jongsik, Kim Dongjoo, *et al.* A Design of single and multi-section microstrip directional coupler with the high directivity. *IEEE. MTT-S International*, 2004; 6-11: 1895—1898
- 12 Lee Seungku, Lee Yongshik. A design method for microstrip directional couplers loaded with shunt inductor for directivity enhancement. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 2010; 58 (4): 994—1002.

The Design and Optimization of Double Directional Coupler that Used to the Reflectometer of Network Analyzer

ZUO Hai-liang, YIN Xing-hui

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, P. R. China)

[**Abstract**] Put forward a kind of double directional coupler can be used in the reflectometer. The coupler is cascaded by two microstrip directional coupler. And though making the odd mode capacitance equal to the even mode capacitance by putting a dielectric slice up the middle band of the microstrip line the directionality of the coupler is successfully improved. At last the double directional coupler is successfully simulated that the coupling degree is 10 dB the standing-wave ratio is greater than 15 dB and the isolation degree is greater than 28 dB and the frequency band is between 2 G and 3 G that can be applied to the reflectometer.

[**Key words**] microstrip line double directional coupler dielectric constant isolation

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测量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练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练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>