

# 用矢量网络分析仪进行在片 S 参数测试的测量不确定度分析

韩利华 孙 静 郑延秋

中国电子科技集团公司第十三研究所 信息产业部电子 202 计量站

**摘要：**目前，我国有很多台由网络分析仪和微波探针台组成的在片测试系统，测试芯片的 S 参数。本文介绍了在片测试的测量不确定度计算方法，并根据计算结果绘制出了测量不确定度曲线。

## 1、测试系统组成

目前，对微波毫米波器件测试，越来越多地采用在片测试，即用矢量网络分析仪和微波探针台，直接在大圆片上进行测试（测试系统组成如图 1）。这种方法对芯片无损伤，避免了夹具、封装、键合引线等引入的误差，测试结果较准确。

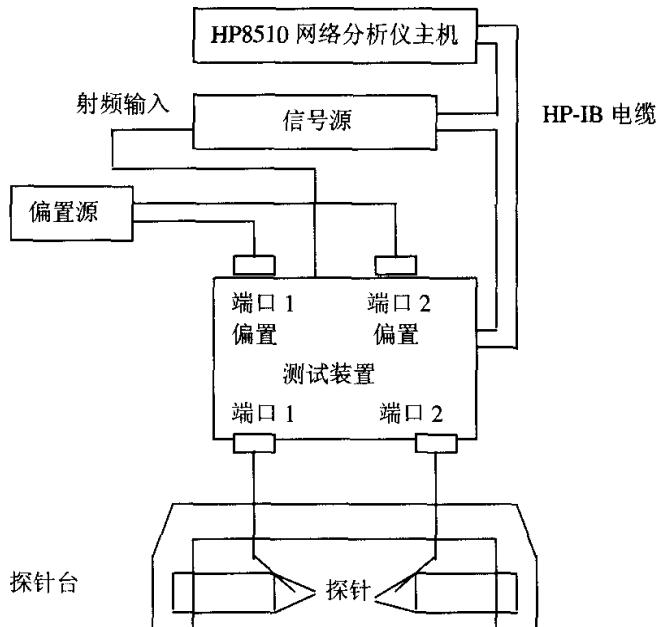


图 1 测试系统连接简图

## 2、测量不确定度的计算

就如何评定在片测试的测量不确定度，我们查阅了相关资料，进行了一些尝试。

矢量网络分析仪说明书中，以曲线形式给出了传输幅度、相位不确定度，反射幅度、相位不确定度，非常直观。这些曲线是通过测量系统的有效方向性、有效源匹配、反射跟踪、传输跟踪、串扰等剩余误差项，经过计算得到的。在片测试系统中，需要用测试电缆、适配器将网络分析仪和探针台连接起来，因此，在探针头处直接测试整个在片系统的剩余误差项（有效方向性、有效源匹配、反射跟踪、传输跟踪、串扰等），然后计算并绘制在片测试的测量不确定度曲线，可以很直观地看出在片测试的测量不确定度。

### 2.1 计算公式

在探针上测量在片系统的有效方向性、有效源匹配、反射跟踪、传输跟踪、串扰等参数和被测件  $S$  参数，根据 HP8510 说明书上的不确定度计算公式计算出被测件  $S$  参数的测量不确定度：

总传输幅度不确定度（单位：dB）：

$$E_{tm}(\log) = 20 \log(1 + V_t / S_{21}) \quad (1)$$

其中：

$$V_t = S_t + \sqrt{W_t^2 + X_t^2 + Y_t^2 + Z_t^2}$$

$$S_t = C + T_s S_{21} + M_s S_{11} S_{21} + M_1 S_{22} S_{21} + A S_{21}$$

$$W_t = 3N_1 \quad X_t = 3N_h S_{21} \quad Y_t = R_{t1} S_{21} + R_{r1} S_{11} S_{21}$$

$$Z_t = R_{t2} S_{21} + R_{r2} S_{22} S_{21}$$

总传输相位不确定度（单位：度）：

$$E_{tp} = \sin^{-1}(V_t / S_{21}) \quad (2)$$

总反射幅度不确定度（线性幅度）：

$$E_{rm} = V_r \quad (3)$$

其中：

$$V_r = S_r + \sqrt{W_r^2 + X_r^2 + Y_r^2 + Z_r^2}$$

$$S_r = D + T_r S_{11} + M_s S_{11}^2 + M_1 S_{21} S_{12} + A S_{11}$$

$$W_r = 3N_1 \quad X_r = 3N_h S_{11}$$

$$Y_r = R_{r1} + 2R_{t1} S_{11} + R_{r1} S_{11}^2 \quad Z_r = R_{r2} S_{21} S_{12}$$

总反射相位不确定度（单位：度）：

$$E_{tp} = \sin^{-1}(V_r / S_{11}) \quad (4)$$

公式中：

*C*-----串扰 *D*-----有效方向性 *Ms*-----有效源匹配

*Tr*-----传输跟踪 *Tr*-----反射跟踪

*Rrl*、*Rr2*-----输入探针、输出探针与被测件接触的反射连接重复性

*Rt1*、*Rt2*-----输入探针、输出探针与被测件接触的传输连接重复性

*Nl*-----低电平噪声 *Nh*-----高电平噪声

*A*-----8510C 幅度动态准确度误差

## 2.2 计算时使用的数据以及计算结果

进行传输不确定度计算时，假定被测件的 *S11* 和 *S22* 为零。进行反射不确定度计算时，假定被测件的 *S21* 和 *S12* 为零。可以计算出在片系统的测量不确定度。

以频率为 2GHz 时的总传输幅度不确定度的计算为例，下面列出了计算时各个参数的数值和最终计算结果，其中除了 *Etm(log)* 的单位是 dB、*Etp* 的单位是度以外，其它参数均为线性幅度。

Rt1	Rt2	S21	Yt	Zt	Nh	Xt	N1
0.00016	0.00016	1	0.00016	0.00016	0.000018	0.000054	0.000191
0.00016	0.00016	0.3162	5.06E-05	5.06E-05	0.000018	1.71E-05	0.000191
0.00016	0.00016	0.1	0.000016	0.000016	0.000018	5.4E-06	0.000191
0.00016	0.00016	0.03162	5.06E-06	5.06E-06	0.000018	1.71E-06	0.000191
0.00016	0.00016	0.01	1.6E-06	1.6E-06	0.000018	5.4E-07	0.000191
Wt	A	C	Tt	St	Vt	Etm(log)	Etp
0.000572	0.006	0.000054	0.000123	0.006177	0.006794	0.058814	0.38928
0.000572	0.0079	0.000054	0.000123	0.002591	0.003167	0.08657	0.573914
0.000572	0.0118	0.000054	0.000123	0.001246	0.001818	0.156526	1.04193
0.000572	0.0214	0.000054	0.000123	0.000735	0.001306	0.351606	2.3676
0.000572	0.0249	0.000054	0.000123	0.000304	0.000876	0.729283	5.024821

## 3、绘制的不确定度曲线

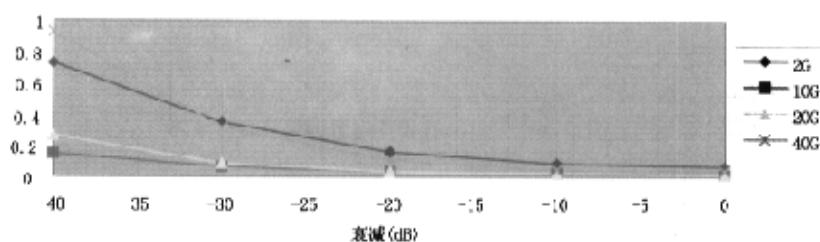
根据计算出的测量不确定度，绘制的不确定度曲线见下页(图例中，2G 代表 2GHz，10G 代表 10GHz，20G 代表 20GHz，40G 代表 40GHz)：

## 4、结束语

目前，我国有很多台由网络分析仪和微波探针台组成的在片测试系统，测试芯片的 S 参数。本文介绍的在片测试测量不确定度计算方法，以及根据计算结果绘制出的测量不确定度曲线，非常直观地反映了在片测试的测量不确定度。对多家使用在片测试系统的单位，有很好的借鉴作用。

不确定度(dB)

表 1 总传输幅度不确定度



不确定度(dB)

表 2 总传输相位不确定度

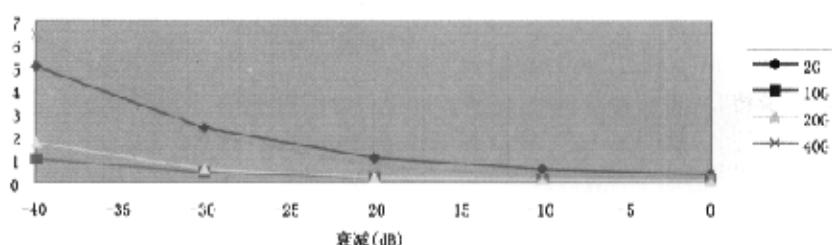
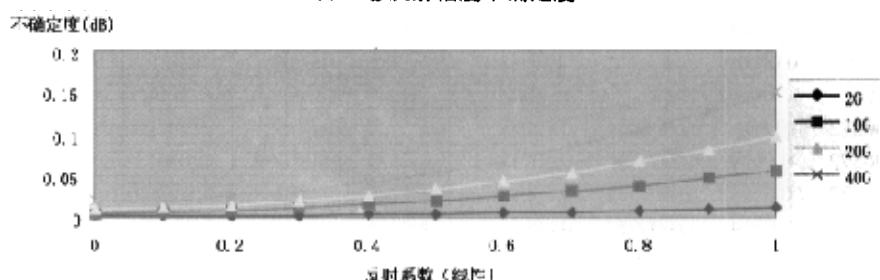
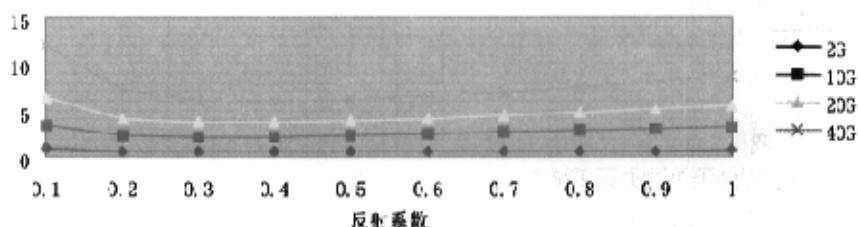


表 3 总反射幅度不确定度



不确定度(dB)

表 4 总反射相位不确定度



## 微波射频测试仪器使用操作培训

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; 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>

