

宽带正交解调器幅相一致性测量*

黎向阳, 刘光平, 梁向农, 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 基于数字示波器和网络分析仪, 提出了两种测量方法, 解决了宽带正交解调系统 I、Q 幅度和相位误差的测量问题, 比较了两种方法的优缺点, 并成功应用于某 100MHz 带宽正交解调系统的测量和调试中。

关键词: 宽带正交解调器; 数字示波器; 矢量网络分析仪

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A

The Measurement of the Amplitude and Phase Error of Wide Band Quadrature Demodulator

LI Xiang-yang, LIU Guang-ping, LIANG Dian-nong, ZHOU Zhi-min

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the digital oscilloscope and vector network analyzer, two methods of the amplitude and phase error measuring of wide band quadrature demodulator are proposed and compared. They've also been verified in the measurement of a quadrature demodulator of 100MHz band.

Key words: wide band quadrature demodulator; digital oscilloscope; vector network analyzer

正交双通道处理可以保留信号的相位信息, 它在现代雷达、通信等领域获得了广泛的应用。随着信号带宽的不断扩大, 宽带正交解调器成为接收机的关键组成部分之一, 其框图如图 1 所示。数字中频直接采样是实现正交解调的一种极具吸引力的方法, 然而就目前国内器件和工艺水平而言, 宽带 ($BW > 100\text{MHz}$) 正交解调系统很难在数字域直接实现, 而采用模拟正交解调可以显著降低对 A/D 采样率的要求, 而且模拟滤波器的设计与实现技术也非常成熟。对模拟正交解调器而言, 其同相分量 I 和正交分量 Q 之间的幅度一致性和相位正交度是衡量系统性能的关键指标之一。经典的 IQ 测量仪带宽不超过 20MHz, 根本不能满足宽带正交解调器的测量要求。

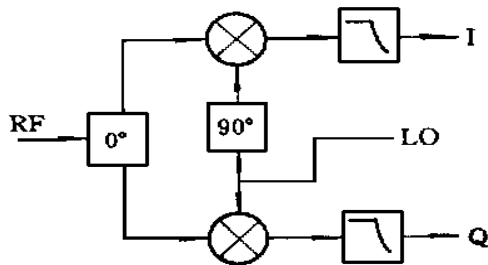


图 1 正交解调器框图

Fig. 1 diagram of quadrature demodulation

本文基于宽带数字示波器和新型网络分析仪提出了两种测量方法^[1]: 数字示波器法和网络分析仪法, 解决了两种方法的误差校正问题。经实测结果表明它们具有很高的测量精度, 能满足正交解调系统的测试要求。

1 数字示波器法

数字示波器 (DSO) 的飞速发展给电子测量领域带来了巨大变化, 它能直接测量信号的幅度、频率等基本参数, 不仅具有基本的波形显示功能, 而且具有相当强的数据处理能力, 如相位比较、统计分析、频谱分析等。另外, 它的数据也可通过内置软盘或 GPIB 接口传给计算机作进一步的分析处理。宽带数字示波器具有高采样率、多通道、多功能的特点, 能完全满足正交解调器 I、Q 幅度和相位一致

* 收稿日期: 1999-06-29

基金项目: 国家部委项目资助

作者简介: 黎向阳 (1972-), 男, 博士生。

性的测量。本方法以数字示波器为主要仪器, 并配有相应的数据处理方法, 可直接从数字示波器上读取结果, 或把数据储存起来利用计算机分析^[2]。测量系统如图 2 所示, 具体测试流程如下:

- (1) 设置示波器工作状态, 补偿探头 1 或 2 的长度使之相等;
- (2) 设置正交解调器的输出频点, 从示波器上读出通道 1 和通道 2 之间的幅度差和相位差;
- (3) 更改频点, 重复 (2), 直至感兴趣的频点全部测量完毕。

需要指出的是, 当交换通道 1 和通道 2 测量结果有较大差别时, 说明示波器通道 1 和通道 2 (包含探头) 不一致 (由于大带宽的影响, 这种不一致经常存在), 此时对交换通道两次测量的结果做“平均”处理, 即可消除通道间的误差。简单讨论如下:

设 I、Q 输出信号频谱分别为 $A_I(\omega)e^{j\Phi_I(\omega)}$ 和 $A_Q(\omega)e^{j\Phi_Q(\omega)}$, 通道 1 和通道 2 之间的误差为 $A_e(\omega)e^{j\Phi_e(\omega)}$, 归结到通道 2, 如图 3, M_1 为通道 1 对 I 信号的测量结果, M_2 为通道 2 对 Q 信号的测量结果, M_1 为通道 1 对 Q 信号的测量结果, M_2 为通道 2 对 I 信号的测量结果。其中

$$M_1 = A_I(\omega)e^{j\Phi_I(\omega)}$$

$$M_2 = A_Q(\omega)e^{j\Phi_Q(\omega)} \quad A_e(\omega)e^{j\Phi_e(\omega)} = A_Q(\omega)A_e(\omega)e^{j(\Phi_Q(\omega)+\Phi_e(\omega))}$$

$$M_1 = A_Q(\omega)e^{j\Phi_Q(\omega)}$$

$$M_2 = A_I(\omega)e^{j\Phi_I(\omega)} \quad A_e(\omega)e^{j\Phi_e(\omega)} = A_I(\omega)A_e(\omega)e^{j(\Phi_I(\omega)+\Phi_e(\omega))}$$

$$M_2/M_1 = (A_Q(\omega)/A_I(\omega))A_e(\omega)e^{j(\Phi_Q(\omega)-\Phi_I(\omega)+\Phi_e(\omega))}$$

$$M_2/M_1 = (A_I(\omega)/A_Q(\omega))A_e(\omega)e^{j(\Phi_I(\omega)-\Phi_Q(\omega)+\Phi_e(\omega))}$$

测量结果一般幅度用 dB 表示, 相位用 deg 表示, 即对上式取对数, 此时有

$$A_I(\text{dB}) - A_Q(\text{dB}) = \frac{1}{2}((M_2(\text{dB}) - M_1(\text{dB})) - (M_2(\text{dB}) - M_1(\text{dB})))$$

$$\Phi_I(\text{deg}) - \Phi_Q(\text{deg}) = \frac{1}{2}((M_2(\text{deg}) - M_1(\text{deg})) - (M_2(\text{deg}) - M_1(\text{deg})))$$

2 网络分析仪法

矢量网络分析仪 (VNA) 是双口线性网络测量的理想工具。它的频率扫描、矢量分析功能提供了对双口网络 S 参数的快速测量能力, 一般能在几百 ms 之内完成频率扫描和结果显示。它还具有完善的误差校正模型, 测量精度非常高。新型网络分析仪具有频率偏置 (frequency offset) 工作模式和谐波扫描能力, 极大方便了含混频器系统的测量, 是正交解调器测量的理想仪器^[3]。本法以矢量网络分析仪为主要仪器, 配有相应的辅助设备和数据处理方法。下面以 HP8753E VNA 为例说明正交解调器的 IQ 幅度和相位差的测量方法。

VNA 一般具有两个外接端口 (PORT 1 或 A, PORT 2 或 B), 一个作为输入, 另一个作为输出, 可互换。HP8753E VNA 的参考通道通过前面板的一根 SMA 半刚性电缆连接, 拆下这根电缆即可由外部输入参考信号, 这相当于给网络分析仪增加了一个输入通道。通常, 参考信号由定向耦合器从输出口获得, 三个端口工作于同一频率。测量混频器时, 网络分析仪工作于频率偏置模式, 设置混频器工作参数 (本振频率、上/下变频) 后, 设置混频器的中频频率范围, PORT 2 和 Rin 即调谐于中频频率, PORT 1 则扫描于相应的射频频率, 本振信号由外加信号源提供^[4]。值得注意的是, 混频器输入输出端口必须加上衰减器避免失配, 中频端口必须加上滤波器以免网络分析仪锁相环失锁。

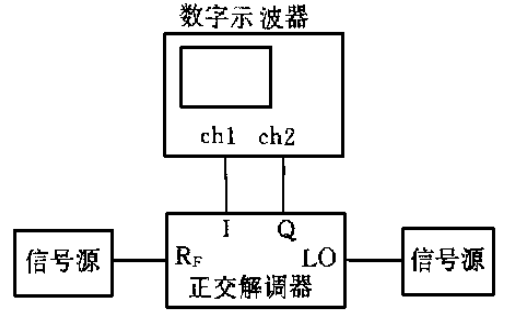


图 2 数字示波器法

Fig. 2 DSO-method

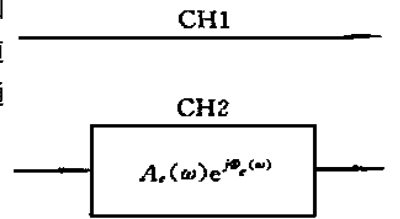


图 3 通道误差模型

Fig. 3 model of channel error

宽带正交解调器（包含放大器、滤波器等）可以等效为一个混频器，I、Q 信号分别接到 PORT2 和 Rin，测量系统连接见图 4，本振由外加信号源提供。此时可直接比较 PORT2 和 R 通道信号得到 I、Q 之间的幅度差和相位差。正交解调为零中频处理方式，射频带宽以本振频率为中心在中频（视频）上产生折叠，必须分为射频高于本振（ $RF > LO$ ）和射频低于本振（ $RF < LO$ ）两部分分别进行测量，流程如下：

- (1) 设置 VNA 频率偏置工作参数 ($RF > LO$) 并校准；
- (2) 测量 B/R (S_{21})；
- (3) 交换 I、Q 信号输出电缆再测 B/R (S_{21})；
- (4) 设置 VNA 频率偏置工作参数 ($RF < LO$)，重复 (2) 和 (3)。

由于连接 I、PORT1 和 Q、PORT2 的两根电缆不一样，必须交换通道测量以消除通道误差（参见数字示波器法的讨论）。两次测量结果相减可由网络分析仪自己完成：先把第 (2) 步的结果存在存储器 M 中，在第 (3) 步显示结果时选择 DATA/M，直接显示两次测量相减的结果。另外，显示屏幕可以分为两屏，一屏显示 $RF > LO$ 结果，一屏显示 $RF < LO$ 结果。网络分析仪的优点集中体现于此，它能快速给出一个“全局”的结果。

对于不具备频率偏置模式的网络分析仪，如果其具有两个以上的输入通道，亦可用于正交解调器的测试，如 HP3577A，测量方法类似于数字示波器，需外加信号源作为本振信号。

3 测量结果

上文讨论的两种方法均应用某宽带（100 MHz）正交解调器的测试。数字示波器采用 TEK 公司的 TDS580D，网络分析仪为 HP 公司的 HP8753E 和 HP3577A。用 HP3577A 和 TDS580D 测量时，每隔 1MHz 测量一次，而 HP8753E 的测量点数远大于此，仅取 21 点的测量结果作比较，见图 5。“+”对应 HP8753E，“*”对应 TDS580D，“o”对应 HP3577A。可以看出，三者的测量结果非常吻合，以 HP8753E 的测量结果为基准，HP3577A 和 TDS580D 的测量误差幅度小于 0.05dB，相位小于 0.03°。

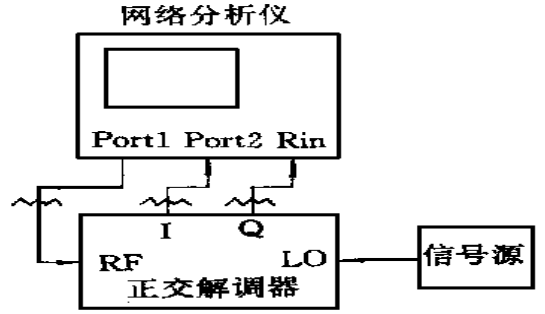


图 4 网络分析仪法
Fig.4 VNA-method

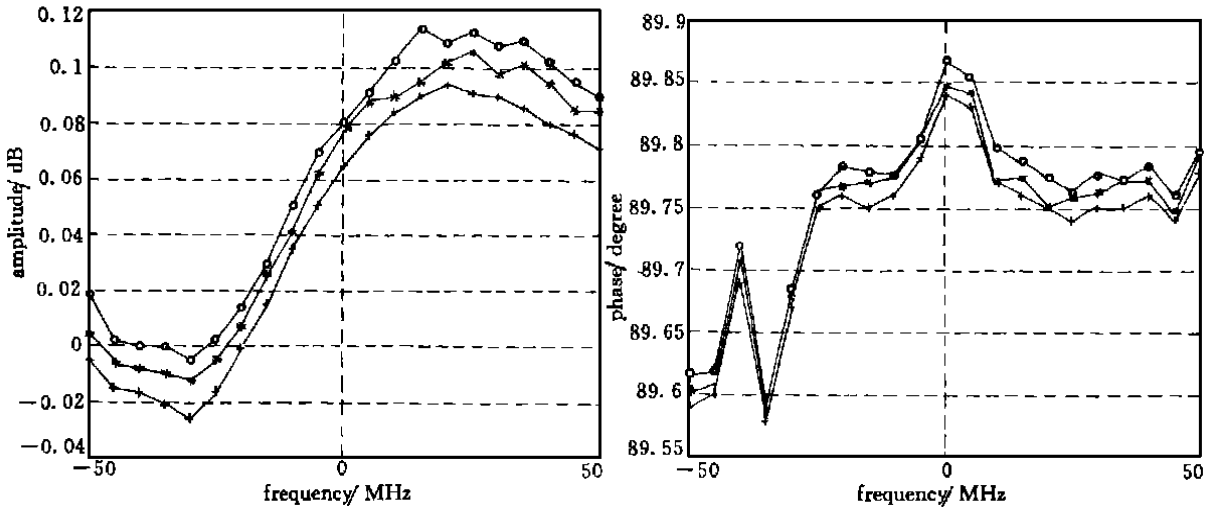


图 5 两种方法的测量结果
Fig.5 results of two methods

4 结束语

宽带正交解调器幅度和相位差的测量是一件棘手的工作, 网络分析仪能大大提高测试效率, 它能快速得到一个“全局”的结果, 增加带宽或频点不会显著延长测量时间, 是幅度和相位差测量的首选仪器, 为保证精度可能需要功率计来校准。数字示波器能够直接显示多次测量的统计平均结果, 具有直流测量能力, 但测试自动化程度低, 操作繁琐。作者利用 GPIB 接口组建自动测量平台, 所有操作均由计算机编程完成, 避免了人工干预, 是一种很有前途的方法。

参考文献:

- [1] Lee J P Y. Wideband I/Q demodulators: measurement technique and matching characteristics [J]. IEEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1996, 143 (5).
- [2] 刘天宽等. 正交检波器通道间平衡性能测试的线性回归方法 [J]. 现代雷达, 1998 (3) .
- [3] HEWLETT PACKARD Cor, HP8753E network analyzer User's Guide. 1998.
- [4] Clark C J. Network Analyzer Measurement of Frequency Translating Devices, 1996 (11): 115-126.