

矢量网络分析仪时域功能分析

徐杰 黄敬健 黄居敏 袁乃昌

(国防科技大学四院微波技术发展中心 长沙 410073)

摘要: 矢量网络分析仪采用时频变换及时域选通方法来获得待测器件真实的频率响应。文中给出上述方法理论依据和实现步骤,介绍了不同窗函数对变换结果的影响和基于 Chirp-Z 变换的时域测量算法,推导出时域选通门的数学表达式,解释了理论结果出现失真的原因。并采用 Visual Basic 结合 Measurement Studio 语言编写相关软件实现时域测量功能,最后给出实际测量和变换结果,对结果进行分析后提出下一步的工作方向。

关键词: 矢量网络分析仪; 窗函数; Chirp-Z 变换; 选通门

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

Analysis for time-domain function of vector network analyzers

Xu Jie Huang Jingjian Huang Jumin Yuan Naichang

(Microwave Center of NUDT, Changsha 410073)

Abstract: The VNA acquires the real frequency response of DUT (Device Under Test) by means of frequency-time transform and time-domain strobe. This paper shows the theories and realizable process of the method which just mentioned. It introduces the influence of different window functions on the transform and a time-domain measurement algorithm bases on Chirp-Z transform. And it gets the expressions for time-domain strobe gate, explains why result distortion is found. We compile the software to realize the function of time-domain function by visual basic and Measurement Studio language. At last, the result is obtained and the future work is presented.

Keywords: VNA; window function; Chirp-Z transform; strobe gate

0 引言

现代微波测量中,经常使用矢量网络分析仪^[1](以下简称矢网)对被测器进行扫频测量,如测量天线增益或者目标的雷达散射截面(RCS)等特性,但是由于干扰的不可避免,使得矢网所测待测目标的频率响应中叠加了较多非期望的反射、散射信号,想要滤除这些杂波需要在时域中进行处理。若矢网的时域功能^[2-3]被禁用,则需要编写软件来处理数据以达到目的。

1 软件编写

编写软件来实现滤除杂波如图 1 所示,需要以下几个步骤:频域窗函数使用^[4],逆变换到时域,时域选通处理,变换回频域。图中 $X(k)$ 表示频域数据, $x(n)$ 表示时域数据, $W(k)$ 表示频域窗函数, $h(n)$ 表示时域选通门函数。

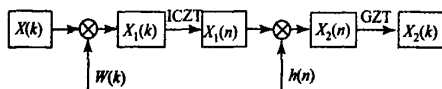


图 1 滤除杂波方框图

1.1 窗函数选择

时域信号主瓣宽度 Δt ,称为时域的时间分辨率, Δt 越小表示时间分辨率越高。由于矢网只能在有限的频率范围内进行测量,因而由其变换得到的时域数据必定是具有有限分辨率的。 Δt 与扫频宽度 f_{span} 关系如公式^[3](1):

$$\Delta t = \frac{1}{f_{\text{span}}} \quad (1)$$

可知,增加矢网的扫频宽度可以提高时间分辨率。

直接对频域数据进行变换会由于截断效应^[5-6]而使时域信号产生旁瓣,这会淹没被测期间产生的较小响应,从而降低了时域测试的动态范围。降低旁瓣影响需要选择窗函数,窗函数可以修改频域数据,因而抑制了对截断过程中形成的旁瓣,这使得响应更加有利于区分和识别每个响应,但是它又会引起时域信号主瓣宽度增大,从而降低时间分辨率,限制两个靠的很近的响应被分辨出来的能力。因此,选择窗函数与否,选择什么样的窗函数要根据实际情况而定。

常用的窗函数是 Kaiser-Bessel 窗,其表达式为:

$$w(k) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - [1 - 2k/(K-1)]^2})}{I_0(\beta)}, 0 \leq k \leq K-1 \quad (2)$$

式中： $I_0(u) = 1 + \sum_{r=1}^{+\infty} \left[\frac{\left(\frac{u}{2}\right)^{2r}}{r} \right]^2$ 是第一类变形 Bessel 函数。公式(2)中 β 控制窗函数的形状,较大的 β 值可以降低旁瓣高度。图 2 显示的是不同 β 值的窗函数的系数,不难看出当 $\beta = 0$ 时即是矩形窗。

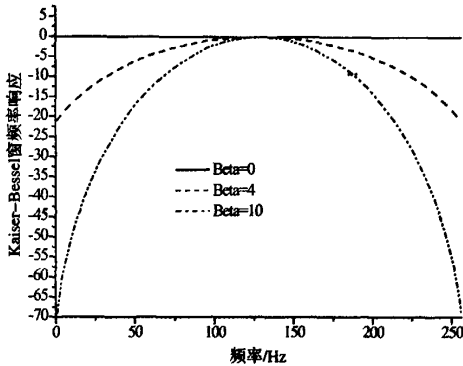


图 2 不同 β 值的 Kaiser-Bessel 窗

综合考虑到实际测量中可能需要低旁瓣或者高时间分辨率的窗函数,选择 3 种窗形状,如表 1 所示。

表 1 3 种选定的 Kaiser-Bessel 窗形状

窗形状	β	旁瓣电平/dB	过渡带
最小	0	-13	$1.2/f_{span}$
普通	6.02	-44	$1.92/f_{span}$
最大	11.975	-75	$2.88/f_{span}$

1.2 Chirp-Z 变换^[2,7]

chirp-Z 变换算法应用广泛,它允许输入点数 N 和输出点数 M 不相等,输入点数可以是任意数,且可用 FFT 来快速计算。其定义如下:

已知 $x(n) (0 \leq n \leq N-1)$ 是有限长序列,其 z 变换是:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n} \quad (3)$$

沿 z 平面上的一段螺旋线作等分角的抽样,这些抽样点 z_k 为

$$z_k = AW^{-k}, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

M 为所要分析的复频谱的点数,不一定等于 N , A 和 W 都是任意复数,可表示为:

$$\begin{cases} A = A_0 e^{j\theta_0} \\ W = W_0 e^{-j\phi_0} \end{cases} \quad (5)$$

A_0 表示起始抽样点的矢量半径长度, θ_0 表示起始抽样

点相位角, W_0 表示螺旋线的伸展率, ϕ_0 表示两相邻抽样点之间的角度差。

将式(4)代入式(3)可得:

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{nk}, 0 \leq k \leq M-1 \quad (6)$$

当 A_0 和 W_0 等于 1,选择 θ_0 和 ϕ_0 时就可得到 z 平面单位圆上任意频段内等间隔的抽样点,从而提高分辨率。

对加窗后的频域响应使用 ICZT 变换,可得到对应时域信号。

1.3 时域选通

选通^[3]即是使用时域的选通门滤除非期望的回波信号,从而得到与待测器件真实响应更加接近的响应。选通门更像是一种“时域带通滤波器”,因此,可以参考窗函数法设计频域带通滤波器^[7]来实现选通门选择设计。下面推导时域选通门 $h(n)$ 的表达式。

理想线性相位时域选通门的时域响应为:

$$h_d(n) = \begin{cases} e^{jn\omega_0}, & 0 < n1 \leq |n| \leq n2 < \frac{N}{2} \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases} \quad (7)$$

根据选通门的阶数 K 确定 ω 离散值 ω_k :

$$\omega_k = k\Delta\omega, k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (8)$$

式中: $\Delta\omega = \frac{2\pi}{K}$, 则时域选通门的单位冲击响应 $H_d(e^{j\omega_k})$ 为:

$$\begin{aligned} H_d(e^{j\omega_k}) &= \frac{1}{N} \int_{-n_1}^{n_2} h_d(n) e^{-jn\omega_k} dn = \frac{1}{N} \int_{-n_1}^{n_1} e^{jn\omega_k} e^{-jn\omega_k} dn + \\ & \frac{1}{N} \int_{n_1}^{n_2} e^{jn\omega_k} e^{-jn\omega_k} dn = \\ & \begin{cases} \frac{2}{N(\omega_k - \pi)} (\sin((\omega_k - \pi)n_2) - \sin((\omega_k - \pi)n_1)), & \omega_k \neq \pi \\ \frac{2}{N}(n_2 - n_1), & \omega_k = \pi \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: n_1, n_2 分别表示时域选通门中起始和终止位置。

窗函数仍然使用 Kaiser-Bessel 窗,根据选通门过渡带大小及旁瓣电平的要求可以确定窗函数的形状。定义窗函数为 $w(e^{j\omega_k})$, 则可得:

$$H(e^{j\omega_k}) = H_d(e^{j\omega_k}) \cdot w(e^{j\omega_k}) \quad (10)$$

由 $H(e^{j\omega_k})$ 求实际的 $h(n)$, 即

$$h(n) = \sum_{\omega_k=0}^{2\pi} H(e^{j\omega_k}) e^{jn\omega_k} \quad (11)$$

将变换得到的时域数据加门、选通,即得到了接近待测器件真实响应的时域响应。

1.4 选通后的频域值

将选通后的时域数据采用 CZT 变换到频域^[6],即得到了接近真实的待测器件频率响应。但是值得注意的是,在所关注的频率范围内,任意点处的选通值由原始频率响应乘以该频率为中心的选通频率函数的倒数,然后将结果相加(卷积)来确定。在最后的数据点处,选通响应的中心

处在所关注频带的终点。超出频带终点的任何频率都将返回零,所以,选通函数的一半将乘以零而不加到和值上。这样造成的结果是,任何选通都将使选通频率响应在开始和最后 10% 处出现失真^[3]。

2 结果分析

时域测试软件已经编写完成,图 3 给出了一种宽带阿基米德螺旋天线(1~20 GHz)加时域选通前后的 S11 值,图中较细的线是选通前数据而较粗的线则是选通后数据。从图中可以看出,变换后的数据滤除了包括连接电缆反射等非期望信号的频域响应,从而得到了更加准确的天线的 S11 值。对天线调试提供了准确的依据。但是也可以看出,在频域响应两端,选通都造成了不同程度的失真,这也和理论分析吻合。因此,找到一种完美的补偿此失真的算法将使得该软件趋于完善,准确度更高。

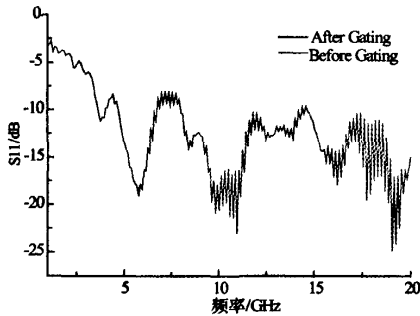


图3 选通对频域响应的影响

3 结论

这套软件已经编写完成,并且集成到了 RCS 测量系统软件中,成为 RCS 测量系统的重要组成部分,该软件具有界

面友好,操作简单,变换速度快等优点,在实际测量中发挥了重要作用。下一步工作就是找到一种完美的补偿变换失真的算法从而使频率响应的两端数据也是准确可靠的。

参考文献

- [1] 孙声雯. 矢量网络分析仪的测量精度和测量稳定性[J]. 国外电子测量技术, 2004, 4: 26-30.
- [2] 韩晓东, 黄珍元, 郑利颖. 基于 chirp-z 逆变换矢量网络分析仪时域测量技术[J]. 电子测量技术, 2003, 3: 1-2.
- [3] Agilent Technologies. 使用网络分析仪进行时域分析[Z]. 2007.
- [4] 唐恬, 张治, 张平. 一种基于频域加窗的 OFDM 信道估计算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 12: 140-143.
- [5] 陈卫东, 杨绍全. 加窗离散傅里叶变换测频分辨率研究[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2000, 27(2): 157-160.
- [6] 丁康, 朱小勇. 适用于加各种窗的一种离散频谱相位差校正法[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 987-989.
- [7] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 张昆帆, 王兰云, 赵拥军. 基于窗函数的离散谱校正方法[J]. 现代雷达, 2007, 9: 63-66.

作者简介

徐杰,男,1984 年出生,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为微波测量,微波电路等。

E-mail: nudtleo@163.com

袁乃昌,男,1965 年出生,安徽无为,人,教授,博士生导师,主要从事目标环境电磁特性、超宽带雷达、微波电路等方向研究。

(上接第 27 页)

- [4] 华夷和,徐金平. 电磁散射与辐射问题中的混合基函数矩量法[J]. 微波学报, 2003, 19(4): 15-18.
- [5] 张云华,用基于 rao-wilton-glisson 基函数的矩量法分析线天线[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(6): 1105-1108.
- [6] SAVAGE J S, PETERSON A F. Quadrature rules for numerical intergration over triangles and tetrahedral [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine, 1996, 38(3): 100-102.
- [7] EIBERT T F, HANSEN V. On the calculation of potential intergrals for linear source distributions on Triangular domains[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1995, 43(12): 1499-1502.

- [8] KAMEN Y, SHIRMAN L. Triangle rendering using adaptive subdivision [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1998, 18(2): 95-103.

作者简介



楚玉焕,女,1983 年出生,安徽淮北人,硕士研究生,主要研究方向为线天线理论。

邢光龙,男,山西平遥人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电磁场理论及应用技术。

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>