

应用反卷积实现脉冲计量中的信号重构与系统辨识

王 园 朱江淼

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘 要: 本文研究了在脉冲计量领域中的基于反卷积算法的信号重构与系统辨识。我国目前的脉冲参数国家基准过渡时间为 7.25 ± 0.50 ps, 带宽为 $56.3 \pm 5.8\%$ GHz。如果采用传统的计量方法, 该基准无法实现对标称带宽为 70GHz 的 Agilent86100C 高速取样示波器以及标称过渡时间为 5ps 的 Picosecond4016 负阶跃脉冲源进行校准。本文将反卷积算法引入到测量数据处理中, 并结合具体问题对传统的反卷积算法进行了改进, 克服了传统的反卷积算法对阶跃信号计算误差过大的问题, 并进行了实验验证, 实现了量值传递。

关键词: 反卷积; 校准; 信号重构; 系统辨识

中图分类号: TM935.38 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)04-0532-04

Signal Reconstruction and System Identification Using the Deconvolution in Pulse Metrology

WANG Yuan ZHU Jiang-miao

(Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: This paper studied the signal reconstruction and system identification based on deconvolution algorithm in pulse metrology. The transition duration of pulse parameter national standard of China is 7.25 ± 0.50 ps, and bandwidth is $56.3 \pm 5.8\%$ GHz. High speed sampling oscilloscope Agilent86100C has the bandwidth of 70GHz and minus step pulse source Picosecond4016 has the transition duration of 5ps, according to traditional calibration method, these two instruments could not be calibrated by the national standard. The deconvolution algorithm was used in the processing of measurement data in this paper, and conventional deconvolution method was improved to overcome the large errors while step signal was deconvoluted. Experiment verified the new algorithm, realized the value transfer.

Key words: deconvolution; calibration; signal reconstruction; system identification

1 引言

信号重构和系统辨识在信号处理中有着很重要的位置, 对于脉冲参数国家基准的建立来说也需要用到信号重构与系统辨识。Picosecond4016 是过渡时间为 5ps 的负阶跃脉冲信号源, Agilent86100C 是标称带宽为 70GHz 的高速取样示波器, 理论上在正式使用之前都要进行校准和验收, 否则不具备量值传递的功能, 其测量结果不可信。传统的校准方法是用系统阶跃响应转换时间更快的示波器对信

号源进行测量, 为了实现过渡时间为 5ps 的信号源 Picosecond4016 的校准, 要求示波器的阶跃响应的转换时间快 2~3 倍, 即 1~2ps, 同样对于带宽为 70GHz 的 Agilent86100C 的校准也需要过渡时间小于 1~2ps 的脉冲信号源^[1]。而我国现阶段的脉冲参数国家基准是基于 NTN 技术和 Agilent86100B 建立的, Agilent86100B 是标称值为 50GHz 的示波器, 该国家基准不仅是一个源基准, 同时还是一个表基准, 既可以校准信号源, 也可以校准示波器。但是该基准的过渡时间为 7.25 ± 0.50 ps, 带宽为 $56.3 \pm$

5.8% GHz^{[2][3]} 按照传统的校准思想,该基准不能实现对 Picosecond4016 以及 Agilent86100C 的校准。

本文将反卷积算法引入到测量数据处理中,应用脉冲参数国家基准实现了对 Picosecond4016 负阶跃脉冲信号源和 Agilent86100C 的校准和验收。本文对校准理论、实验方法和数据处理方法进行了研究,并进行了实验验证。

2 反卷积算法简介

反卷积属于反问题、反滤波的范畴。反卷积问题也称解卷积、去卷积问题。当反问题、反滤波的研究限于线性系统时,则称作反卷积^{[4][5]}。任意一个线性时不变系统的输入 $x(t)$ 、输出 $y(t)$ 和单位冲激响应 $h(t)$ 之间必然满足以下卷积积分方程。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau) h(\tau) d\tau$$

$$= x(t) * h(t) = h(t) * x(t) \quad (1)$$

其中“*”表示卷积积分运算。但是在实际应用中经常是已知线性时不变系统的输入 $x(t)$ 、输出 $y(t)$ 求单位冲激响应 $h(t)$ 或已知输出 $y(t)$ 、单位冲激响应 $h(t)$ 求输入 $x(t)$ 求解 $x(t)$ 属于信号重构问题,求解 $h(t)$ 属于系统辨识问题。这些在数学上是属于同类问题,都属于反卷积问题。求解这两个问题都需要反卷积计算,即

$$h(t) = y(t) (1/*) x(t) \quad (2)$$

$$x(t) = y(t) (1/*) h(t) \quad (3)$$

其中“1/*”表示反卷积运算。

反卷积的常用方法有时域法和频域法^[4],时域法即用卷积实现反卷积,频域法一般指傅里叶变换法(DFT),因为 DFT 具有快速算法 FFT,所以一般采用 DFT 来进行反卷积运算。对(1)式求 FFT,从时域变换到频域,时域中的卷积运算在频域中为乘积运算,如(4)式所示,信号重构如(5)式所示,系统辨识如(6)式所示。

$$Y(w) = X(w) \cdot H(w) \quad (4)$$

$$\begin{cases} X(w) = \frac{Y(w)}{H(w)} \\ x(t) = IFFT[X(w)] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} H(w) = \frac{Y(w)}{X(w)} \\ h(t) = IFFT[H(w)] \end{cases} \quad (6)$$

3 反卷积算法在信号重构方面的应用

反卷积算法在脉冲信号的分析中较为常见,但是本文的研究对象 Picosecond4016 是阶跃信号,对阶跃信号采用反卷积会出现较大的误差,结果甚至不可用。本文对反卷积算法在阶跃信号的分析进行了改进,即在反卷积运算之前,首先进行微分运算,将阶跃波形转化成脉冲波形,进行常规的反卷积计算,之后,再进行一次积分运算,将脉冲波形的反卷积结果转化成阶跃波形,最后在阶跃波形上利用直方图分析法计算其过渡时间。并将此方法引入到 Picosecond4016 校准数据处理中。完整的算法流程如图 1 所示。

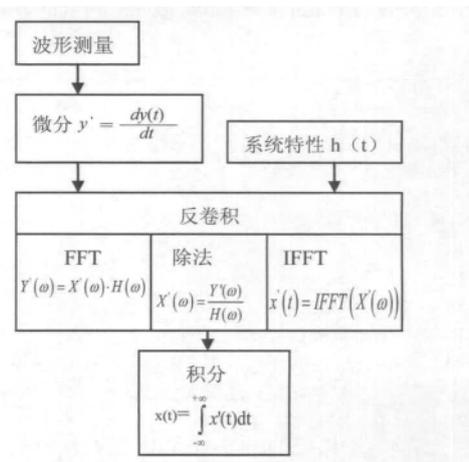


图 1 阶跃信号反卷积算法流程

Fig. 1 Deconvolution algorithm processes of step signal

按照图 1 所示的算法流程对图 2 所示的用脉冲参数国家基准获得的 Picosecond4016 的负阶跃脉冲的测量波形进行处理,得到最终的结果重构出了 Picosecond4016 负阶跃脉冲源的时域波形,图 5 是该信号源的幅频特性曲线。

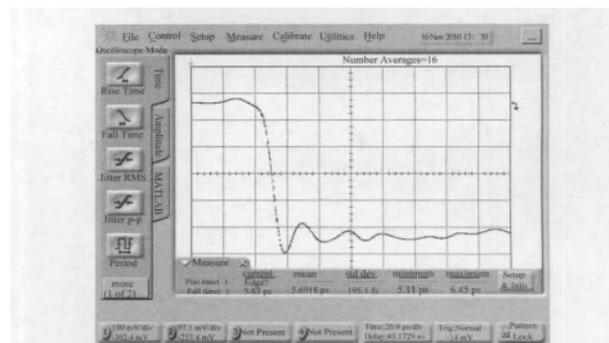


图 2 脉冲参数国家基准对 Picosecond4016 的测量波形

Fig. 2 The measurement waveform of Picosecond4016 using pulse parameter national standard

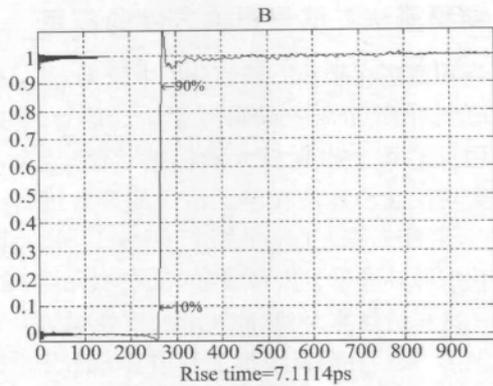


图 3 脉冲参数国家标准的过渡时间

Fig. 3 Transition duration of pulse parameter national standard

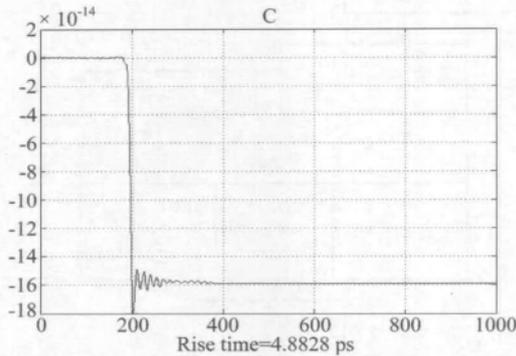


图 4 重构的 Picosecond4016 的时域波形

Fig. 4 Reconstruction the time domain waveform of Picosecond4016

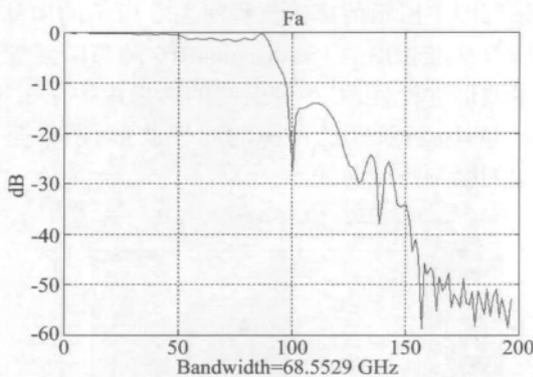


图 5 重构的 Picosecond4016 的幅频响应曲线

Fig. 5 Reconstruction of the amplitude frequency response waveform of Picosecond4016

通过上述实验验证,重构的 Picosecond4016 的过渡时间为 4.8828ps,带宽为 68.5529GHz,改进后的反卷积算法可以有效的重构阶跃信号。

4 反卷积算法在系统辨识方面的应用

我国脉冲参数国家基准是由 2 台 Agilent86100B 主机和 3 个取样示波器模块组成,其中 2 个 Agilent86117 模块,1 个 Agilent83484 模块,标称带宽均为 50GHz。利用 NTN 技术可以实现对三个模块的校准,用 $u_{kA}(t)$ 、 $u_{kB}(t)$ 、 $u_{kC}(t)$ 分别表示 A、B、C 三台取样示波器对直流采样输出的 kick-out 脉冲,用 k_A 、 k_B 、 k_C 分别表示 A、B、C 三台取样示波器 kick-out 脉冲与冲激响应之间的比例系数,用 $y_{AB}(t)$ 、 $y_{BC}(t)$ 、 $y_{CA}(t)$ 分别表示示波器 B 对 A 产生的 kick-out 脉冲进行测量的响应波形、示波器 C 对 B 产生的 kick-out 脉冲进行测量的响应波形、示波器 A 对 C 产生的 kick-out 脉冲进行测量的响应波形,得到:

$$\begin{cases} y_{AB}(t) = k_A \cdot u_{kA}(t) \cdot h_B(t) = k_A \cdot h_A(t) * h_B(t) \\ y_{BC}(t) = k_B \cdot u_{kB}(t) \cdot h_C(t) = k_B \cdot h_B(t) * h_C(t) \\ y_{CA}(t) = k_C \cdot u_{kC}(t) \cdot h_A(t) = k_C \cdot h_C(t) * h_A(t) \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式通过反卷积计算可以得到 A、B、C 三台取样示波器的频域响应函数。

$$\begin{cases} H_A(\omega) = \sqrt{\frac{Y_{CA}(\omega) \cdot Y_{AB}(\omega)}{Y_{BC}(\omega)} \cdot \frac{k_B}{k_C \cdot k_A}} \\ H_B(\omega) = \sqrt{\frac{Y_{AB}(\omega) \cdot Y_{BC}(\omega)}{Y_{CA}(\omega)} \cdot \frac{k_C}{k_A \cdot k_B}} \\ H_C(\omega) = \sqrt{\frac{Y_{BC}(\omega) \cdot Y_{CA}(\omega)}{Y_{AB}(\omega)} \cdot \frac{k_A}{k_B \cdot k_C}} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以得到 A、B、C 三台取样示波器的幅频、相频响应函数以及单位激响应 $h_A(t)$ 、 $h_B(t)$ 和 $h_C(t)$ [6][7]。

70GHz 的 Agilent86100C 示波器的校准需对原有系统的基础上进行扩展,实现三台不同带宽的示波器的校准 [8]。

本文设计的实验方案是应用一个 Agilent86100B 和一个 Agilent86100C 主机,分别用作取样示波器 I 和取样示波器 II,两个 Agilent86117 模块标称带宽为 50GHz 和一个 Agilent86118 模块标称带宽为 70GHz,分别记为 A、B 和 C,进行两两对接的三次测量。

图 6 给出了 Agilent86118 的过渡时间的计算结果,为 4.8142ps,图 7 是该模块的带宽计算结果,为

70.5111GHz。可以看出本文中提出的反卷积算法对标称值为70GHz的示波器实现了校准,实现了系统辨识和量值传递。

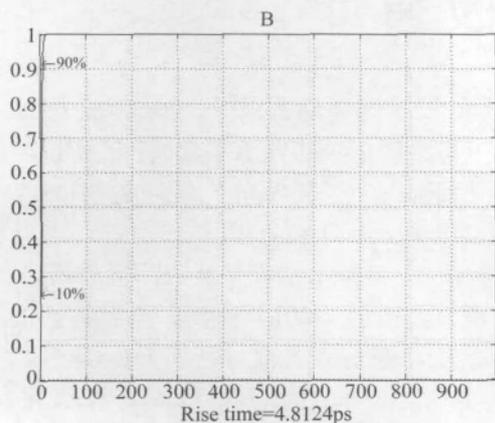


图6 Agilent86118 模块的过渡时间

Fig.6 Transition duration of Agilent86118

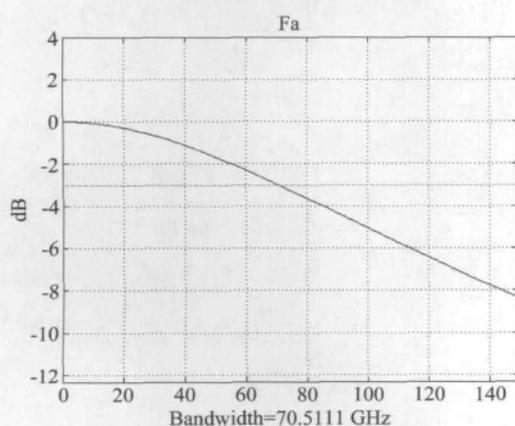


图7 Agilent86118 模块的带宽

Fig.7 Bandwidth of Agilent86118

5 总结

本文研究了反卷积算法在脉冲计量中的应用,通过对标称值为70GHz的Agilent86100C高速取样示波器以及过渡时间为5ps的Picosecond4016负阶跃脉冲源的校准方法的研究和实现,证实反卷积算法在传统校准方法受局限的计量中可以有效地实现校准,本文还对传统的反卷积算法进行了改进,解决了阶跃信号的反卷积计算问题。本文从理论分析到实验验证都进行了详细的说明,证明了反卷积算法在脉冲计量中的有效性。

参考文献

- [1] ZHU Jiang-miao, GUO Kai, LIU Ming-liang, et al. Research of root sum of the square criterion in pulse transition duration metrology [J]. CJE, 2011 (4): 697-700.
- [2] 朱江淼,刘明亮,郝月华,李洋. 脉冲波形参数国家新基准的复现性和稳定性研究[J]. 现代学术研究杂志. 2006年12月第4期: 10-12.
- [3] National institute of metrology and Beijing university of technology, Report of "National Standard of Pulse Parameter Based on NTN Technology", June 2006.
- [4] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M], 国防工业出版社, 2001 56-122.
- [5] 刘明亮,施正豪. 用补偿法获得数字反卷积稳定解[J]. 电子测量与仪器学报, 1987, 1(1): 8-14. Liu Ming-Liang, Shi Zheng-Hao, The Stable Solution of Digital Deconvolution with the Method of Compensation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 1987, 1(1): 8-14. (in Chinese)
- [6] LIU Ming-liang, WANG Yuetong, YU Yuehua and MIAO Jingyuan. The Extended Nose-to-Nose Calibration Procedure [C]//ICEMI' 2005. 2: 641-645.
- [7] 朱江淼,刘明亮,卢峰. Nose-to-nose 校准技术的理论分析[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 480-483. ZHU Jiang-Miao, LIU Ming-liang, LU Feng, The Theoretical Analysis of Nose-to-nose Calibration Procedure [J]. Electronica Sinica, 2005, 33(3): 480-483. (in Chinese)
- [8] VERSPECHT Jan, RUSH Ken. Individual Characterization of Broadband Sampling Oscilloscopes with a "Nose-to-Nose" Calibration Procedure [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(2): 347-354.

作者简介



王园女, 1987年生于河北省保定市, 北京工业大学电子信息与控制工程学院电路与系统专业硕士研究生。E-mail: vwangyuan8712@163.com

朱江淼女, 1972年生于山西省太原市, 北京工业大学电子信息与控制工程学院教师, 副教授, 博士。E-mail: zhujiangmiao@bjut.edu.cn