

基于光脉冲源的标准脉冲法的 宽带取样示波器校准技术研究

朱江森¹, 赵琳潇¹, 缪京元², 杨 洁¹

(1. 北京工业大学信息学部, 北京 100124; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 本文构建了基于光脉冲源的示波器校准系统, 用标准脉冲法实现了对宽带取样示波器 Agilent 86100C 的 70GHz 取样模块 86118A 的校准. 在校准实现过程中, 首次综合研究了三种时基误差对校准结果的影响, 并采用互相关算法去除时基漂移, 最小二乘法修正时基失真, 利用反卷积去除时基抖动. 实验结果表明, 本文方法实现了对 70GHz 宽带取样示波器的校准, 有效地去除了时基误差, 满足校准精度的要求.

关键词: 脉冲测量; 标准脉冲法; 光脉冲源; 反卷积; 互相关算法

中图分类号: TM935 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)04-0945-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.04.024

Research on the Calibration Technology of Broadband Sampling Oscilloscope Based on the Standard Pulse Method of an Optical Pulse Source

ZHU Jiang-miao¹, ZHAO Lin-xiao¹, MIAO Jing-yuan², YANG Jie¹

(1. Faculty of Information Technology of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: This paper constructed a calibration system of oscilloscope based on the optical pulse source. The 70GHz sampling module 86118A of Agilent 86100C was calibrated based on optical pulse source using the standard pulse method. In the calibration process, the influences on calibration results of three kinds of time base errors were researched for the first time, e. g., time base drift was removed using a cross-correlation algorithm, time base distortion was corrected using the least squares method, and jitter was removed by using PDF deconvolution. Experiment results showed that calibration of 70GHz broadband oscilloscope was realized, the time base errors could be effectively removed by this method, and the accuracy of the calibration was satisfied.

Key words: pulse measurement; optical pulse source; standard pulse method; deconvolution; cross correlation algorithm

1 引言

校准宽带取样示波器主要是校准上升时间或带宽, 这通常是一件困难而复杂的工作. 目前校准宽带取样示波器的方法主要有四种: 取样电路详尽模型法、正弦扫频源法、NTN 校准法和标准脉冲源法.

取样电路详尽模型法^[1]是基于对取样电路尺寸的精密测量, 但是目前很难获取宽带取样示波器取样电路的尺寸, 这种方法已很难适应目前的校准需求. 正弦扫频源法^[2]只能测出宽带取样示波器系统的幅频信息, 不能测得系统的相频信息, 无法得到准确的宽带取

样示波器时域的冲激响应. NTN 校准法^[3-7]用于某些特定结构 (HP54123X、Agilent86100 系列) 的宽带取样示波器. 而标准脉冲源法^[8]简单直接, 适用范围广, 只要脉冲源的上升时间比被校示波器的上升时间快 2~3 倍就可实现校准, 如不满足这一条件可以通过反卷积算法^[9-11]进而实现校准.

本文采用源于光脉冲的标准脉冲源法^[12] (简称为光脉冲标准法) 校准 Agilent 86100C 的宽带 70GHz 取样模块 86118A. 对于光脉冲标准法校准宽带取样示波器技术, 国内航天二院 203 所搭建了基于光电技术的超快电脉冲产生及其波形测量系统. 该系统采用激光器产

生飞秒级光脉冲,通过光电转换器转化成 7.5ps 的电脉冲,以此实现了对 Agilent86100C 的 86106A(20GHz)模块和 86117A(30GHz)模块的校准.美国 NIST 利用此技术实现了带宽达到 110GHz 的宽带取样示波器的校准^[13]的光脉冲标准法也可以达到美国 NIST 的校准水平,甚至更高,无奈国内宽带取样示波器的最高带宽仅为 70GHz,未能在更高带宽上得到实验验证,只对 70GHz 示波器进行了校准研究.

宽带取样示波器获取的数据不可避免地受到时基漂移、时基抖动和时基失真的影响.针对时基抖动和时基失真影响的去除国内外都进行了大量的研究^[14-16],于时基漂移的去除,其研究尚不充分.本文利用互相关算法对去除时基漂移进行了重点研究,并编写了去除程序.特别是,对宽带取样示波器采集数据依次采用互相关算法去除时基漂移,以最小二乘法^[17]时基失真,用 PDF 反卷积算法^[18]时基抖动;最后,由于光脉冲源经过光电转换器转化的可用电脉冲带宽为 90GHz,不满足传统标准脉冲法的要求,因此本文采用反卷积系统辨识技术,能够克服这一局限性,较好地实现了宽带取样示波器校准,如此较为完善的工作目前还没有查到相关文献.

2 互相关算法原理

众所周知,宽带取样示波器测量脉冲信号时通常存在时基漂移,若将在某一时间段内先后测得的脉冲信号视作两个不同信号,则可以用相关技术对其进行处理.互相关函数可考察两个信号的相关程度,相关程度越大,表明两个信号越相似.基于互相关这一特性,通过求取漂移前后的两脉冲信号的互相关函数,可以求得两信号之间的漂移量.

用互相关技术去除时基漂移的基本原理可概括如下:首先把第一次测量波形作为参考波形,计算它与其他测量波形的互相关函数以得到每个被测波形与参考波形的漂移量;然后用每个漂移量通过频域法补偿对应的被测波形,则完成了所有波形在时间上与参考波形对齐,也即去除了时基漂移.

基于上述原理的去除时基漂移算法归纳为:

首先,设 $y_1(t), y_2(t), y_3(t), \dots, y_M(t)$ 分别为对信号 $y(t)$ 的 M 次测量,对每次测量波形都进行 N 点采样: $y_i(0), y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(N-1)$, 其中 $i=0, 1, 2, \dots, M-1$.

然后,选取第一次测量信号 $y_1(n)$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) 作为参考信号,设 τ 是第 i 次测量信号的位移量,则 $y_i(n)$ 与参考信号的互相关函数表示如下:

$$R_i(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} y_1(n)y_i(n+\tau)^{[19]} \quad (1)$$

式中 $\tau=0, 1, 2, \dots, 2N-1$.

最后,通过计算得到 $R_i(\tau)$ 的最大绝对值与对应的 τ_i ,考虑到测量一次需要时间为 N (设以采样间隔为时间单位),则有

$$d_i = \tau_i - N \quad (2)$$

式中 d_i 是对 $y_i(n)$ 的补偿量.补偿方法具体介绍如下:假定 $y_i(n+d_i)$ 相对于 $y_1(n)$ 左移了 d_i 个单位,设 $Y_1(f)$ 是 $y_1(n)$ 的傅里叶变换,则 $Y_i(f) = \exp(-j2\pi fd_i)Y_i(f)$ 是 $y_i(n+d_i)$ 的傅里叶变换,显然要想使得 $y_i(n+d_i)$ 与 $y_1(n)$ 对齐,只需要 $Y_i(f)$ 乘以 $\exp(j2\pi fd_i)$,再进行傅里叶反变换得到相应的时域信号,这样就实现了 $y_i(n+d_i)$ 和 $y_1(n)$ 两信号的对齐,也实现了时基漂移的去除.

设计的算法流程图如图 1 所示.针对同一脉冲波形多次测量的数据 $y_i(n)$,选择第一次测量波形 $y_1(n)$ 作为参考波形,计算其他测量波形相对参考波形的漂移量 d_i ,最后根据计算得到的漂移量 d_i 通过频域法来对齐波形,即去除时基漂移.

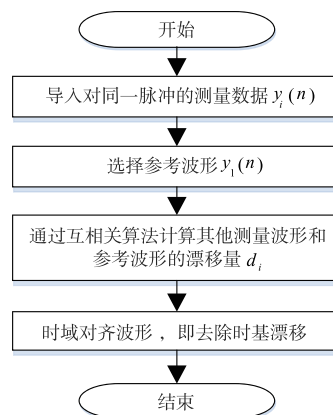


图1 互相关算法去除时基漂移流程

3 实验数据采集

本文完成了用光脉冲标准法校准宽带取样示波器 Agilent 86100C 的 70GHz 取样模块 86118A 的实验,其设备连接原理框图如图 2 所示.

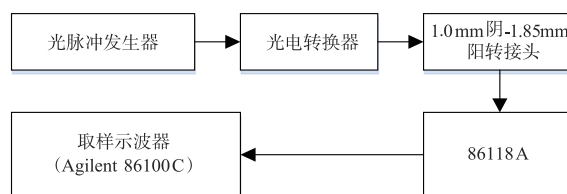


图2 光脉冲法校准示波器的连接原理框图

如图 2 所示,光脉冲发生器输出飞秒级光脉冲连接带宽可达 90GHz 的光电转换器转化成电脉冲,考虑到光电转换器的输出端是 1.0mm 阳头,示波器取样模块 86118A 的电输入端是 1.85mm 阴头,口径不一致,阴阳性也不一致,因此需要一个 1.0mm 阴-1.85mm 阳的转接

头,来连接光电转换器与示波器取样模块;其中 1.0mm 阴端与光电转换器输出端连接,1.85mm 阳端与 86118A 的电输入端连接;以实现示波器取样模块对转接头的输出电脉冲进行采样.实际设备的连接如图 3 所示.

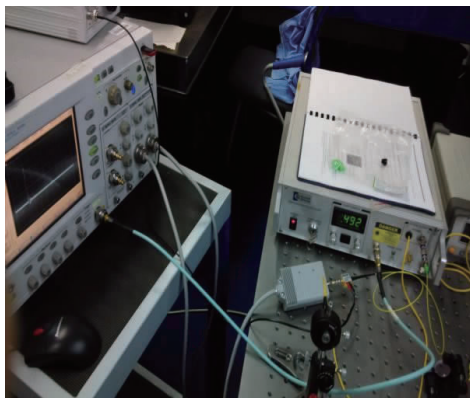


图3 光脉冲法校准示波器设备连接图

4 数据处理

4.1 用反卷积实现系统辨识

如图 2 所示,设 $h_1(t)$ 、 $h_2(t)$ 、 $h(t)$ 分别是光电转换器,转接头与取样模块(代表宽带示波器)的冲激响应; $x_1(t)$ 为光脉冲发生器的输出即光电转换器的输入光脉冲; $x(t)$ 为光电转换器输出电脉冲, $y(t)$ 是宽带取样示波器测得的脉冲信号,则有

$$x(t) = x_1(t) * h_1(t) \quad (3)$$

$$y(t) = x(t) * h_2(t) * h(t) \quad (4)$$

由于光脉冲的上升时间是飞秒级要比光电转换器的上升时间皮秒级快两个数量级,因此相对于光电转换器的冲激响应 $h_1(t)$,光脉冲 $x_1(t)$ 相当于一个狄拉克函数 $\delta(t)$,因此式(3)可写作

$$x(t) = \delta(t) * h_1(t) = h_1(t) \quad (5)$$

式(5)表明,若光脉冲的上升时间足够快,则光电转换器的输出电脉冲在数值上等于其冲激响应.联立式(3)到式(5)则得

$$h(t) = y(t) (1/*) h_1(t) (1/*) h_2(t) \quad (6)$$

式(6)的频域表示式为

$$H(w) = \frac{Y(w)}{H_1(w)H_2(w)} \quad (7)$$

其中, $H(w)$ 为取样模块的频率响应, $Y(w)$ 、 $H_1(w)$ 和 $H_2(w)$ 分别表示宽带取样示波器测量脉冲信号、光电转换器和转接头的频率响应.式(7)就是在频域用反卷积对示波器取样模块进行系统辨识的式子.由 $H(w)$ 可直接求得示波器的带宽,对 $H(w)$ 进行傅里叶反变换、再积分可得到其阶跃响应进而求得上升时间.

4.2 求取光电转换器输出电脉冲

如 3.1 节所述光电转换器输出电脉冲在数值上等

于光电转器的冲激响应.光电转换器的频率响应是已知的,因此通过 IFFT 变换可以得到电脉冲的时域信号(或波形),如图 4 所示.电脉冲的幅频响应和带宽如图 5 所示,阶跃响应和上升时间如图 6 所示.

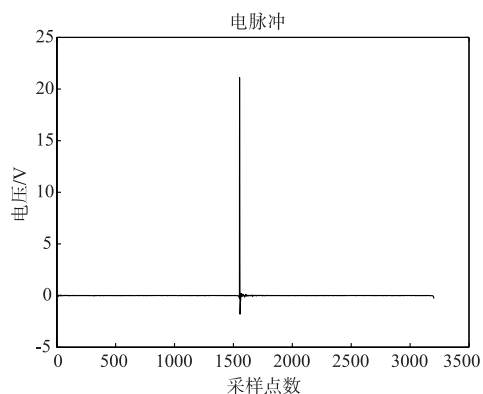


图4 电脉冲的时域波形

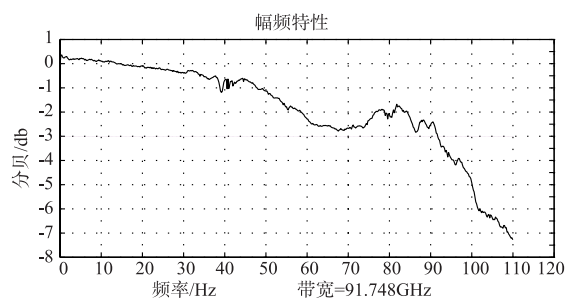


图5 电脉冲的幅频响应和带宽

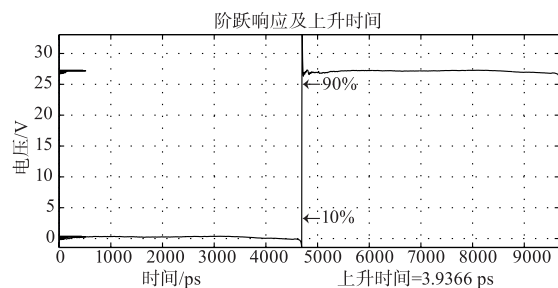


图6 电脉冲的阶跃响应和上升时间

4.3 求取转接头的系统特性

转接头是完成校准实验不可或缺连接件,但它对校准的影响必须扣除.因此必须知道它的系统特性.本文中实验所采用的转接头是 1.0mm 阴 - 1.85mm 阳,为了获取此转接头的系统特性,本文设计了实验,其实验原理框图如图 7 所示.

由于取样模块 86117A 和 83484A 的输入端均为 2.4mm 的阳头,1.0mm - 1.85mm 转接头的阴阳性除了阳 - 阴的没有,其他都有.因此设计了如图 7 所示的 NTN 对接试验来获取转接头 1.0mm 阴 - 1.85mm 阳的系统特性.其中 86117A,83484A 和 2.4mm 阴 - 1.85mm 阳转接头的频率响应都是已知的,转接头 2.4mm 阴

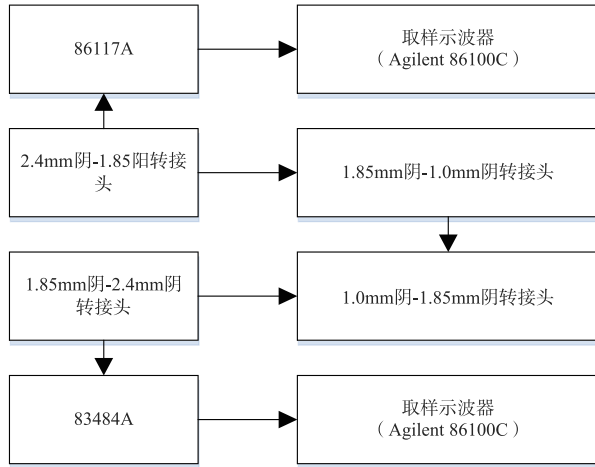


图7 获取转接头系统特性的实验原理图

-1.85mm 阳和转接头 2.4mm 阴 -1.85mm 阴的频率响应几乎相同,实验中用到的两个 1.0mm - 1.85mm 的转接头的频率响应也是几乎相同。

设置宽带取样示波器 Agilent 86100A 的直流偏置电压不为零,输出 kick-out 脉冲为 $k(t)$,已知 $k(t)$ 与 86117A 的冲激响应成正比,设 2.4mm - 1.85mm 转接头的冲激响应为 $h_2(t)$,1.0mm - 1.85mm 的转接头的冲激响应为 $h_3(t)$,86117A 与 83484A 的冲激响应分别为 $h_1(t)$ 和 $h_4(t)$,Agilent 86100B 的响应脉冲为 $y(t)$,其中 $k(t) = ah_1(t)$,其中 a 可以求出。由此得:

$$y(t) = k(t) * h_2(t) * h_3(t) * h_3(t) * h_2(t) * h_4(t) \quad (8)$$

式中 $k(t)$, $h_2(t)$, $h_4(t)$ 均为已知,对式(8)进行傅里叶变换,则

$$Y(w) = K(w) \cdot H_2(w) \cdot H_3(w) \cdot H_3(w) \cdot H_2(w) \cdot H_4(w) \quad (9)$$

由此可得到 1.0mm - 1.85mm 转接头的频率响应:

$$H_3(w) = \sqrt{\frac{Y(w)}{K(w) \cdot H_2(w) \cdot H_2(w) \cdot H_4(w)}} \quad (10)$$

由此可得冲激响应:

$$h_3(t) = \text{DFT}^{-1}(H_3(w)) \quad (11)$$

最后得到转接头的幅频特性和带宽如图 8 所示,阶跃响应和上升时间如图 9 所示。

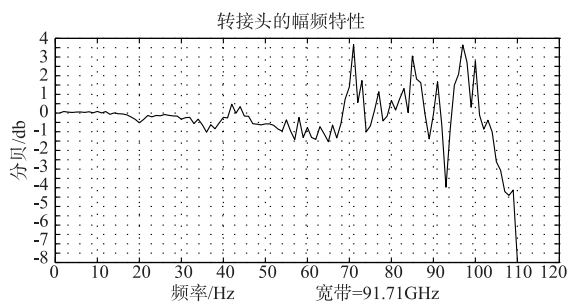


图8 转接头的幅频响应和带宽

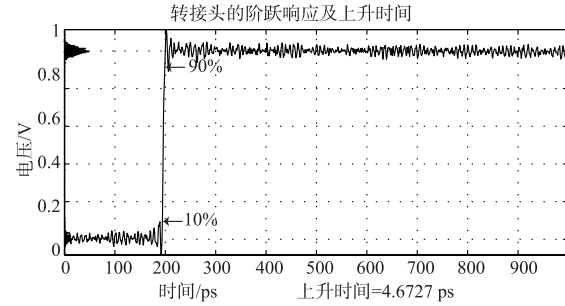


图9 转接头的阶跃响应和上升时间

4.4 实验数据的获取

本文实验设置采样点数为 4050,时间窗为 1000ps,在同一个地点对宽带取样示波器测得的脉冲信号波形每隔 30 分钟进行一次实时采样(4050 点),总共进行 200 次,随机分成十组,将每组采集数据存入 txt 文档中。这里只展示其中一组时基误差处理结果,将这组中的 20 个实时采样数据波形放在一个图中,如图 10 所示。

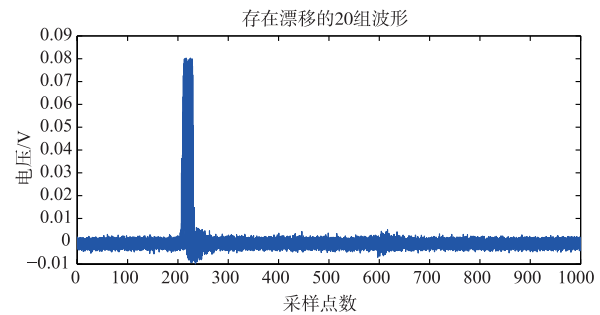


图10 20组实时采样波形

4.5 去除时基漂移

从图 10 中可以看出,波形间的漂移是不能忽视的,若没有进行时基漂移去除直接对 20 组信号进行平均,得到的平均信号如图 11 所示。从图 11 中可以看出,平均后的脉冲信号已经严重变形,因此在平均之前,必须对波形进行时基漂移的去除。

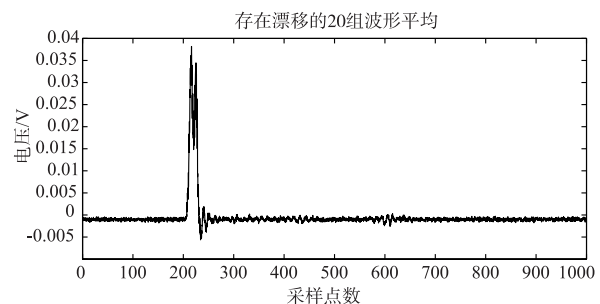


图11 存在漂移的20组实时测量信号的平均

通过本文互相关算法处理这 20 组波形,其处理结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出,与图 10 相比波形之间的漂移得到了有效去除。去除时基漂移之后,20 组波形进行平均得到的结果如图 13 所示。

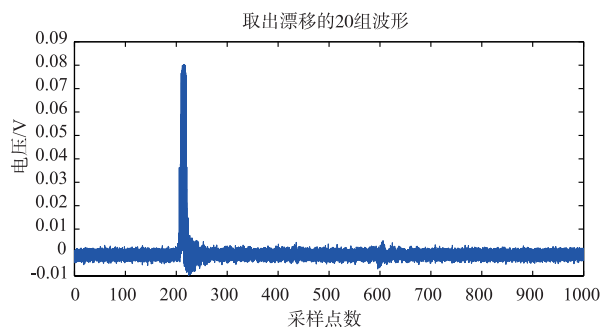


图12 去除漂移后的20组实时测量波形图

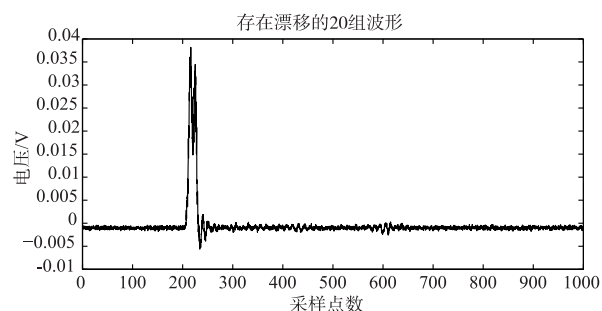


图13 存在漂移的20组实时测量信号的平均

从图 13 可以看出,互相关算法去除波形的时基漂移效果还是较好的.表 1 给出了时基漂移去除前与去除后取样模块 86118A 带宽和上升时间的校准结果.通过表 1 可以发现,去除前得到的数据不可用,去除时基漂移后,校准 Agilent 86100C 的 86118A 取样模块的准确度得到了很大程度的提高.

表 1 时基漂移去除前后 86118A 带宽和上升时间比较

	带宽 (GHz)	上升时间 (ps)
时基漂移去除前	27.0641	7.8679
时基漂移去除后	66.7835	5.9235

4.6 修正时基失真

修正时基失真,首先要搭建时基失真获取系统,本课题应用一台宽带示波器主机 Agilent 86100 C,一个取样模块 (86118A 模块),信号源 (N5183B) 和信号源 (E8257D),在中国计量科学研究院脉冲参数实验室进行硬件对接实验,硬件设备的连接如图 14 所示.

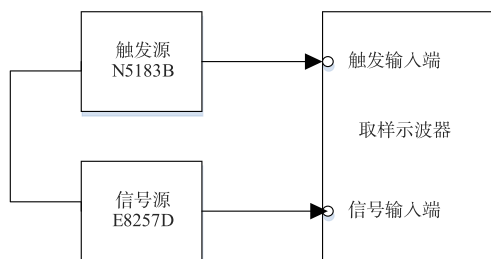


图14 时基失真获取系统硬件连接框图

对采集的 20 组正交数据,采用基于最小二乘法的高斯牛顿迭代法处理得到每个采样点的时基失真估计结果,如图 15 所示.

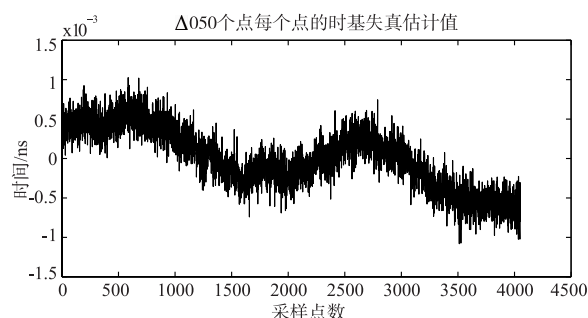


图15 每个采样点的时基失真估计值

根据每个采样点的时基失真估计值采用插值算法对图 13 所示的平均测量信号进行时基失真修正,修正结果如图 16 所示.

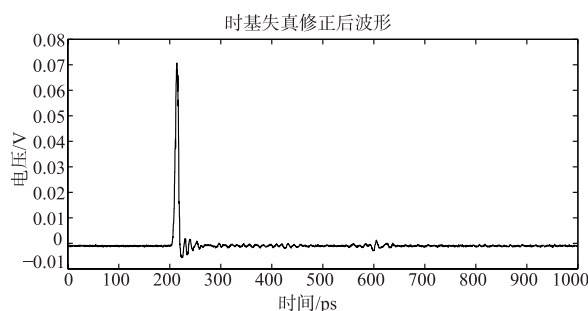


图16 时基失真修正后的波形图

图 16 与图 13 相比,修正时基失真后的波形平滑了.表 2 给出了时基失真修正前后的取样模块 86118A 带宽和上升时间的校准结果.通过表 2 可以发现,修正时基失真后,校准 Agilent 86100C 的 86118A 取样模块的准确度得到了提高.

表 2 时基失真修正前后 86118A 带宽和上升时间比较

	带宽 (GHz)	上升时间 (ps)
时基失真修正前	66.7835	5.9235
时基失真修正后	67.2431	5.3102

4.7 去除时基抖动

利用取样示波器的直方图功能直接测出时基抖动的标准偏差 δ (9ps),然后采用 PDF 反卷积算法去除时基抖动,去除时基抖动后的脉冲波形如图 17 所示.

图 17 与图 16 相比,去除时基抖动后的波形平滑程度有改善.表 3 给出了时基抖动去除前后取样模块 86118A 带宽和上升时间的校准结果.通过表 3 可以发现,去除时基抖动后,校准 Agilent 86100C 的 86118A 取样模块的准确度得到了提高.

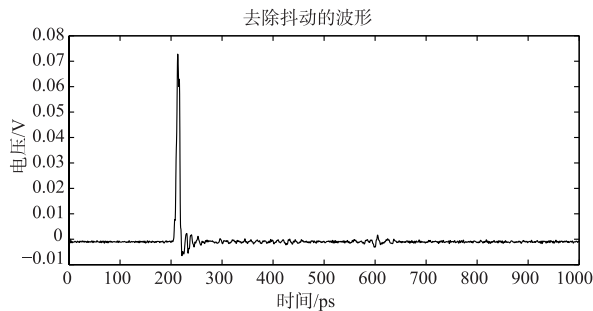


图17 时基抖动去除后波形图

表3 时基抖动去除前后 86118A 宽带和上升时间比较

	带宽(GHz)	上升时间(ps)
时基抖动去除前	67.2431	5.3102
时基抖动去除后	67.6377	5.1351

4.8 最终数据处理结果

按照 3.5 ~ 3.7 节的方法,对另外九组数据进行了相同处理,由十组脉冲测量数据得到取样模块 86118A 带宽和上升时间的校准结果如表 4 所示。

表4 取样模块 86118A 的带宽和上升时间

编号	带宽(GHz)	上升时间(ps)
1	67.6377	5.1351
2	67.7025	5.1300
3	65.6341	5.2916
4	68.8025	5.0480
5	66.6528	5.2108
6	67.6718	5.1324
7	70.6868	4.9134
8	66.5382	5.2198
9	67.7405	5.1271
10	66.0781	5.2561
均值	67.5145	5.2000
标准差	1.4584	0.1093

从表 4 可以看出光脉冲标准法校准宽带取样示波器 Agilent 86100C 的 70GHz 取样模块 86118A 的带宽是 67.5145GHz,上升时间是 5.2000ps。完整的宽带取样示波器校准还包括不确定度评定,由于不确定度的评定是一个十分复杂的内容,包括 A 类不确定度(也即重复性不确定度)和 B 类不确定度,A 类不确定度是用实验标准偏差表征不确定度的方法,B 类不确定度是用非统计分析来评定不确定度的方法,需要专人专题论述,现在的数据结果与研究内容只能初步对 A 类不确定度进行评定。经计算,本文实验的校准带宽的 A 类不确定度是 $\pm 2.14\%$,校准上升时间的 A 类不确定度是 $\pm 2.10\%$ 。A 类不确定度的评定结果表明,光脉冲标准

法对标称值为 70GHz 的宽带取样示波器实现了校准。

5 结论

本文针对宽带示波器 Agilent 86100C 的 70GHz 取样模块 86118A,研究了基于光脉冲源的标准脉冲法校准技术,并且首次针对宽带示波器的三种时基误差进行了综合研究。研究结果表明光脉冲标准法成功实现了 Agilent 86100C 的 70GHz 取样模块 86118A 的校准,并且校准准确度高,为建立新的脉冲参数国家基准奠定了理论和实践基础。

参考文献

- [1] 刘明亮,陆福敏,朱江森,郁月华. 现代脉冲计量[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 李梅. 改进的扫频源校准法[J]. 中国仪器仪表学报, 2004,25(2):10-11.
LI Mei. An improved sweeping calibration method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,25(2):10-11. (in Chinese)
- [3] 朱江森,刘明亮,卢峰. Nose-to-nose 校准技术的理论分析[J]. 电子学报,2003,33(3):480-483.
ZHU Jiang-miao, LIU Ming-liang, LU Feng. The theoretical analysis of nose-to-nose calibration procedure [J]. Acta Electronica Sinica, 2003,33(3):480-483. (in Chinese)
- [4] 刘明亮,林茂六,贺云辉,高剑. 基于“NTN”技术的宽带取样示波器的校准[J]. 计量学报,2002,23(1):65-68.
LIU Ming-liang, LIN Mao-liu, HE Yun-hui, GAO Jian. Calibration of broad-band sampling oscilloscopes based on a nose-to-nose procedure[J]. Acta Metrologica Sinica, 2002, 23(1):65-68. (in Chinese)
- [5] 刘明亮,朱江森,邓超. 适用于 NTN 校准技术的最佳滤波器[J]. 电子学报,2003,31(12):1804-1806.
LIU Ming-liang, ZHU Jiang-miao, DENG Chao. Optimum filter applied to nose-to-nose calibration procedure[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12):1804-1806. (in Chinese)
- [6] 朱江森,李然. 应用脉冲参数国家基准校准 Agilent 86100C 宽带取样示波器的研究[J]. 北京工业大学学报, 2012,38(12):1798-1803.
ZHU Jiang-miao, LI Ran. Calibrating agilent 86100C broadband sampling oscilloscope using pulse parameter national standard[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012,38(12):1798-1803. (in Chinese)
- [7] 朱江森,刘明亮. 用于宽带取样示波器的 Nose-to-nose 校准技术[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(1):94-97.
- [8] 王跃佟,刘明亮,等. 基于 NTN 校准技术的脉冲标准法[J]. 计量学报,2006,27(3):266-268.

- WANG Yue-tong, LIU Ming-liang. The pulse standard method based on "Nose-to-Nose" calibration procedure [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, 27(3): 266 - 268. (in Chinese)
- [9] 王园, 朱江森. 应用反卷积实现脉冲计量中的信号重构与系统辨识[J]. *信号处理学报*, 2013, 29(4): 532 - 535.
WANG Yuan, ZHU Jiang-miao. Signal reconstruction and system identification using the deconvolution in pulse metrology[J]. *Journal of Signal Processing* 2013, 29(4): 532 - 535. (in Chinese)
- [10] 刘明亮, 蔡永良, 等. 用卷积运算实现反卷积[J]. *电子学报*, 2000, 28(5): 111 - 112.
LIU Ming-liang, CAI Yong-liang, et al. Deconvolution via convolution operation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(5): 111 - 112. (in Chinese)
- [11] 刘明亮, 等. 频域反卷积滤波器的因果性研究[J]. *电子学报*, 2001, 29(12A): 1947 - 1949.
LIU Ming-liang, et al. The research of causality for frequency domain deconvolution filter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(12A): 1947 - 1949. (in Chinese)
- [12] 刘杰, 安琪, 等. 太赫兹脉冲技术及其在宽带示波器计量方面的研究[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(1): 63 - 65.
- [13] Paul D HALE, Tracy S CLEMENT. Calibration of sampling oscilloscopes with high-speed photodiodes[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(8): 3173 - 3181.
- [14] 龚鹏伟, 等. 取样示波器时基抖动的修正[J]. *宇航计测技术*, 2011, 31(1): 17 - 20.
GONG Peng-wei, et al. Correction of time-base jitter of sampling oscilloscopes[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2011, 31(1): 17 - 20. (in Chinese)
- [15] 朱江森, 等. 高速取样示波器时基失真数据获取系统的构建[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(4): 509 - 513.
ZHU Jiang-miao, et al. Construction of data acquisition system of time-based distortion for high-speed sampling oscilloscope[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(4): 509 - 513. (in Chinese)
- [16] 林茂六, 等. 高速采样示波器中的时基失真及其估计[J]. *计量学报*, 2004, 25(3): 266 - 269.
LIN Mao-liu, et al. The TBD introduction and estimation of high-speed sampling oscilloscope[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(3): 266 - 269. (in Chinese)
- [17] WANG C M, Paul D HALE. Least-squares estimation of time-base distortion of sampling oscilloscopes[J]. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(6): 1324 - 1332.
- [18] LIU mingliang, ZHAO Yi, et al. A new probability density function PDF deconvolution method to remove the effect of timing jitter[A]. *Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication [C]*. USA: IEEE, 2004. 413 - 416.
- [19] 杨墨, 孙文, 等. 相关检测在周期信号检测中的应用[J]. *承德石油高等专科学校学报*, 2007, 9(1): 25 - 27.
YANG Mo, SUN Wen, et al. Correlation function based algorithm for detecting periodic signal[J]. *Journal of Chengde Petroleum College*, 2007, 9(1): 25 - 27. (in Chinese)

作者简介



朱江森 女. 现为北京工业大学信息学部副教授, 硕士生导师. 她与国家计量测量研究所合作, 参与建立脉冲参数和时间频率参数国家标准. 她目前的研究兴趣包括数字信号处理、现代测量、时域测量和数字去卷积应用.
E-mail: zhujiangmiao@bjut.edu.cn



赵琳潇 女. 1991年11月出生, 河南三门峡人. 2010年-2014年就读于华东交通大学, 并获得学士学位. 现为北京工业大学信息学部硕士研究生. 目前的研究方向为脉冲测量、不确定度评定等.
E-mail: 18201323270@126.com