

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205446

数字示波器宽带探头系统的校准研究*

朱江森¹ 郑香蕊¹ 赵科佳² 万昭彤¹ 郭森林¹ 姜燕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:微波射频芯片进行时域测量时,数字示波器的宽带探头是测试芯片的一个关键子系统,为准确测量芯片,必须要清楚示波器探头系统的传输性能。为此,设计了一种包含接地共面波导的数字示波器宽带探头校准系统,依据校准系统的信号传输特性,用反卷积求出数字示波器宽带探头系统的频率响应,并计算其带宽,以实现对该探头系统的校准。之后用该方法对 Keysight Infiniimax 高频差分有源探头系统进行了校准,得到其带宽数值约为 12 GHz 与标称带宽 12 GHz 相符,表明设计的校准系统合理可行。

关键词: 数字示波器宽带探头系统;接地共面波导;反卷积;时域测量

中图分类号: TB973 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Calibration of broadband probe system of digital oscilloscope

Zhu Jiangmiao¹ Zheng Xiangrui¹ Zhao Kejia² Wan Zhaotong¹ Guo Senlin¹ Jiang Yan¹

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

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

Abstract: When microwave RF chips are measured in the time domain, the broadband probe of digital oscilloscope is a key subsystem used to test the chip, and the transmission performance of the oscilloscope probe system must be clear for accurate measurement of the chip. So, the calibration system containing a grounded coplanar waveguide is designed to calibrate a broadband probe of digital oscilloscope. According to the signal transmission characteristics of the calibration system, the frequency response of the digital oscilloscope broadband probe system is obtained by deconvolution, and its bandwidth is calculated, which realizes the calibration of the probe system. The Keysight Infiniimax high-frequency differential active probe system is calibrated by this method, and the bandwidth value of about 12 GHz is in accordance with the nominal bandwidth of 12 GHz, indicating that the calibration system is reasonable and feasible.

Keywords: digital oscilloscope broadband probe system; grounded coplanar waveguide; deconvolution; time domain measurements

0 引言

随着 5 G 时代的到来,微波射频芯片的应用愈发广泛,对微波射频芯片的精准测量自然也引起了人们的关注。在时域测量微波射频芯片时,包括探头系统的数字示波器是芯片测量的重要仪器^[1-2],且两者带宽均需大于被测信号的带宽^[3],若探头的带宽不足,则会直接影响测量结果。示波器探头的主要作用是将被测信号完整可靠

地传输到示波器上^[4],作为连接示波器输入端和被测信号的关键器件,其性能会直接影响测量结果的准确性^[5]。在实际测量工作中,人们往往忽略探头的影响,导致测量结果不够精准^[6],显然探头的校准十分必要,特别是对探头带宽的校准研究。由于射频芯片技术高速高频化发展,对探头带宽的要求也越来越宽,使探头系统的校准难度也随之增加^[7]。

根据测量对象的不同,数字示波器宽带探头系统的前端结构有多种选择,而测量微波射频芯片的探头前端

收稿日期: 2022-05-02 Received Date: 2022-05-02

* 基金项目: 中国计量科学研究院基本科研业务费重点领域项目资助

必须是探针^[8]。故本文重点研究的是前端为探针的数字示波器宽带探头系统的传输特性。

国内外对于数字示波器宽带探头系统的校准,一般有两种方式,DC 校准和 AC 校准。DC 校准主要是校正数字示波器探头的直流电压增益与偏置误差^[9],而 AC 校准通常是指校准示波器对信号的传输特性,也就是校准示波器频率响应和带宽。AC 校准一般借助矢量网络分析仪测量数字示波器探头的 S 参数以实现校准^[10],但部分数字示波器探头的接口比较特殊,用矢量网络分析仪校准时操作比较复杂,更重要的是这种方式无法进行溯源。于是本文基于数字示波器构建了宽带探头的时域校准系统,实现对探头校准的溯源。

本文首先构建了数字示波器宽带探头的校准系统,包括脉冲信号源、接地共面波导、数字示波器以及被测探头;然后针对校准系统的级联特性,用反卷积求出被测数字示波器宽带探头系统的频率响应和带宽;最后用本文方法对 Keysight Infiniimax 高频差分有源探头系统进行了校准验证,从得到的探头频率响应,求得其带宽约为 12 GHz,与其标称带宽 12 GHz 相符,证明本文的校准方法有效。本文的时域校准方法操作相对简便,同时可以溯源到我国的脉冲参数国家基准,实现了数字示波器宽带探头系统的校准溯源。

1 数字示波器宽带探头系统的校准方法

由于信号源的输出端口一般为同轴接口,与前端为探针的数字示波器宽带探头相连时,必须借助一个与探针接触的平面结构。本文校准的数字示波器宽带探头系统传输的信号频率到了微波阶段甚至更高,所以与探针接触的平面结构需是一个微波平面传输线。本文选用接地共面波导来连接标准信号源与前端为探针的数字示波器宽带探头系统,主要因为相比其他平面传输线,接地共面波导加工制造简单、成本较低^[11],且辐射损耗^[12]较小,特征阻抗易于控制,更重要的是其中心导体和接地外导体在同一平面^[13],能更方便与数字示波器宽带探头系统的探针相连。本文最终用标准脉冲信号源、接地共面波导、探头以及数字示波器共同构建了数字示波器宽带探头的校准系统,如图 1 所示。

整个校准系统是一个二次测量系统,图 1(a)第 1 次测量是标准脉冲信号源直接与数字示波器相连,设此时数字示波器显示的测量结果为 $y_1(t)$,图 1(b)第 2 次测量是标准脉冲信号源经过接地共面波导与探头及数字示波器相连,设此时数字示波器显示的测量结果为 $y_2(t)$ 。标准脉冲信号源的输出两路相同信号设为 $x(t)$,接地共面波导的冲激响应应设为 $h_{GCPW}(t)$,数字示波器探头的冲激响应应设为 $h_p(t)$,数字示波器主机的冲激响应应设为

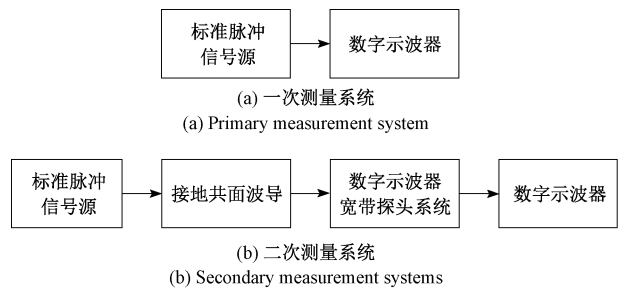


图 1 数字示波器宽带探头系统校准系统框图

Fig. 1 Digital oscilloscope broadband probe system calibration system block diagram

$h_{osc}(t)$,则数字示波器显示的测量结果 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$,用式(1)和(2)表示。

$$y_1(t) = x(t) \cdot h_{osc}(t) \quad (1)$$

$$y_2(t) = x(t) \cdot h_{GCPW}(t) \cdot h_p(t) \cdot h_{osc}(t) \quad (2)$$

从式(1)和(2)看出,若标准信号源输出信号 $x(t)$ 、数字示波器的冲激响应 $h_{osc}(t)$ 、数字示波器测量显示的脉冲信号 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 和接地共面波导的冲激响应 $h_{GCPW}(t)$ 都为已知量,则可以用反卷积求出探头的冲激响应 $h_p(t)$ 。为了简化,通常在频域求解。

通过傅里叶变换将式(1)和(2)从时域转换到频域,可以得到 $Y_1(\omega)$ 和 $Y_2(\omega)$,如式(3)和(4)所示。

$$Y_1(\omega) = X(\omega) \cdot H_{osc}(\omega) \quad (3)$$

$$Y_2(\omega) = X(\omega) \cdot H_{GCPW}(\omega) \cdot H_p(\omega) \cdot H_{osc}(\omega) \quad (4)$$

计算求得 $H_p(\omega)$,如式(5)所示。

$$H_p(\omega) = \frac{Y_2(\omega)}{Y_1(\omega) \cdot H_{GCPW}(\omega)} \quad (5)$$

式(5)表示数字示波器宽带探头系统的频率响应,从而获得数字示波器宽带探头系统的幅频特性和带宽。再将式(5)通过傅里叶逆变换到时域,可以得到数字示波器宽带探头系统的时域特性:

$$h_p(t) = FFT^{-1}(H_p(\omega)) \quad (6)$$

式(6)表示数字示波器宽带探头系统的冲激响应,对冲激响应进行积分即可求得数字示波器宽带探头系统的阶跃响应和上升时间。由于带宽和上升时间之间的换算关系,获得其中一个参数即实现校准,本文则主要研究对数字示波器宽带探头系统幅频响应和带宽的校准。

在对数字示波器宽带探头系统的校准研究中,根据校准要求,各分子子系统的带宽需大于或等于示波器探头带宽^[14],才能保证不会因带宽的限制而影响校准结果。同时各子系统之间的阻抗一定要匹配,否则会产生巨大反射导致校准结果不准确。需特别注意,接地共面波导作为校准系统中的关键器件,除了要求接地共面波导带宽大于或等于探头带宽以及特征阻抗与探头输入端口阻抗匹配外,还要求接地共面波导有一定的机械稳定

性,以确保在探针接触接地共面波导被测点时不会使其变形,从而影响信号传输。

在满足校准要求的情况下,本文对数字示波器宽带探头系统的校准研究,关键在于获得各部分子系统的传输特性,然后用反卷积进行“系统辨识”求出数字示波器宽带探头系统的传输特性,实现对数字示波器宽带探头系统带宽参数的校准。

2 校准系统的实现

如上所述,要实现宽带探头系统的校准,必须知道或准确测量出数字示波器主机和接地共面波导的传输特性,以保证校准的准确可靠。

本文要校准的探头系统是 Keysight Infiniimax 中 1169A 型号探头放大器和 E2669B 型号前端探针组成的高频差分有源探头系统,如图 2 所示。该探头系统接口特殊,如图 3 所示,除 BNC 主接口外还有一排用于内部供电的九针引脚,故只能使用与之适配的 Keysight Infiniium DSA91204A 数字示波器进行实验,两者的标称带宽均为 12 GHz。



图 2 Keysight Infiniimax 高频差分有源探头系统

Fig. 2 Keysight Infiniimax high frequency differential active probe system

该数字示波器主机在连接校准系统前已被校准,并获得幅频响应和带宽,如图 4 所示,可知该数字示波器在测量频带内传输性能良好,带宽约为 12.55 GHz。同样,本文用矢量网络分析仪对校准系统中所用的接地共面波导进行了测量^[15],得到其 S 参数曲线,如图 5 所示。

图 5 中,圆点折线表示接地共面波导的传输线系数 S_{21} ,方点折线表示接地共面波导的反射系数 S_{11} ,由图 5 可见,该接地共面波导的传输系数 S_{21} 在 DC-50 GHz 频率范围内均小于 -3 dB,所以其带宽是被校准探头带宽的 4 倍以上,故该接地共面波导对本次探头校准的影响可忽略不计。图 5 中接地共面波导的反射系数 S_{11} 也比较小,而 S_{11} 越小表示与所设阻抗 50 Ω 越接近,所以保证了与校准系统中端口阻抗为 50 Ω 的各个仪器的阻抗匹配。



图 3 Keysight Infiniimax 1169A 型号探头放大器接口
Fig. 3 Keysight Infiniimax 1169A probe amplifier interface

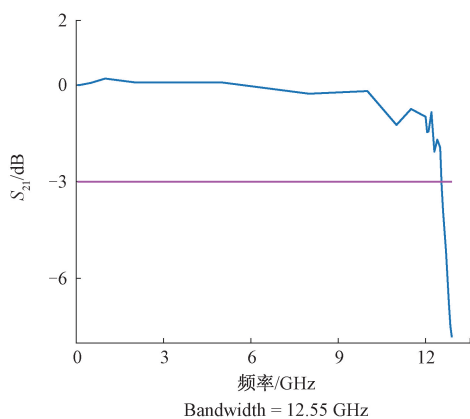


图 4 数字示波器的幅频响应

Fig. 4 Amplitude and frequency response of digital oscilloscope

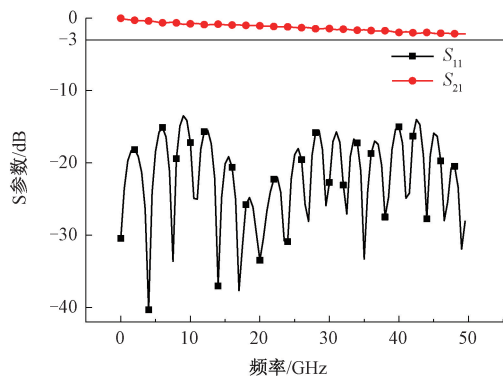


图 5 接地共面波导的实测 S 参数

Fig. 5 Measured S-parameters of the grounded coplanar waveguide

此外,在确保接地共面波导与探针接触时不会变形的情况下,选用厚度为 0.203 mm 的接地共面波导。

本文用的标准脉冲发生器是德科技公司生产的型号

为 N2806A 的一类差分脉冲发生器,其上升时间不到 9 ps,由一个远端探头和一个控制机组成,远端探头可以发出幅度相同、相位相反的两路脉冲方波信号,非常适合用于本文数字示波器宽带探头系统的校准。

最终本文用 Keysight N2806A 标准脉冲发生器、Keysight Infiniium DSA91204A 数字示波器、Keysight Infiniimax 高频差分有源探头系统以及接地共面波导构建了数字示波器宽带探头的校准系统,如图 6 所示。

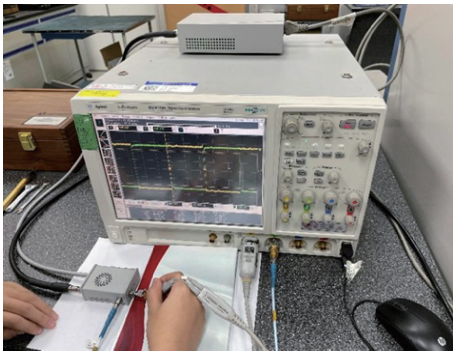


图 6 数字示波器宽带探头校准实验装置的连接图
Fig. 6 Connection diagram of the digital oscilloscope broadband probe calibration experiment transposition

本次校准实验由标准脉冲发生器发出两路幅度相同、相位相反的脉冲方波信号,一路信号直通数字示波器,显示值为 $y_1(t)$;另一路信号经过接地共面波导和数字示波器宽带探头系统到达示波器,显示值为 $y_2(t)$,采集这两路脉冲方波信号,并转换到频域得到 $Y_1(\omega)$ 和 $Y_2(\omega)$ 。因接地共面波导的带宽约为 50 GHz,大于被校探头带宽的 4 倍以上,对校准结果的影响可以忽略,从而获得数字示波器宽带探头系统的频率响应 $H_p(\omega) = \frac{Y_2(\omega)}{Y_1(\omega)}$,并计算其带宽。

本文对 Keysight Infiniimax 高频差分有源探头系统进行 4 次重复校准,根据上述数据处理方法,得到其幅频响应和带宽,如图 7(a)~(d)所示。

由图 7(a)~(d)可知,在 9~10 GHz 频率范围内有波动的误差点,图 7(a) 两个误差点的衰减分别为 -5.5 和 -4.8 dB,图 7(b) 两个误差点的衰减分别为 -4.2 和 -3.7 dB,图 7(c) 两个误差点最大衰减为 -5.9 和 -4.1 dB,图 7(d) 在频率为 9 GHz 时的误差点最大衰减为 -5.1 和 -5.0 dB,可见这些误差点波动较小,衰减值都在可接受范围。最终得到的数字示波器宽带探头系统带宽约为 12 GHz,与其标称带宽 12 GHz 相符。

关于造成误差点的分析原因如下:本文用的接地共面波导在 DC 到 50 GHz 频率范围内的传输性能良好,但反射可能较大,导致数字示波器宽带探头系统校准时存

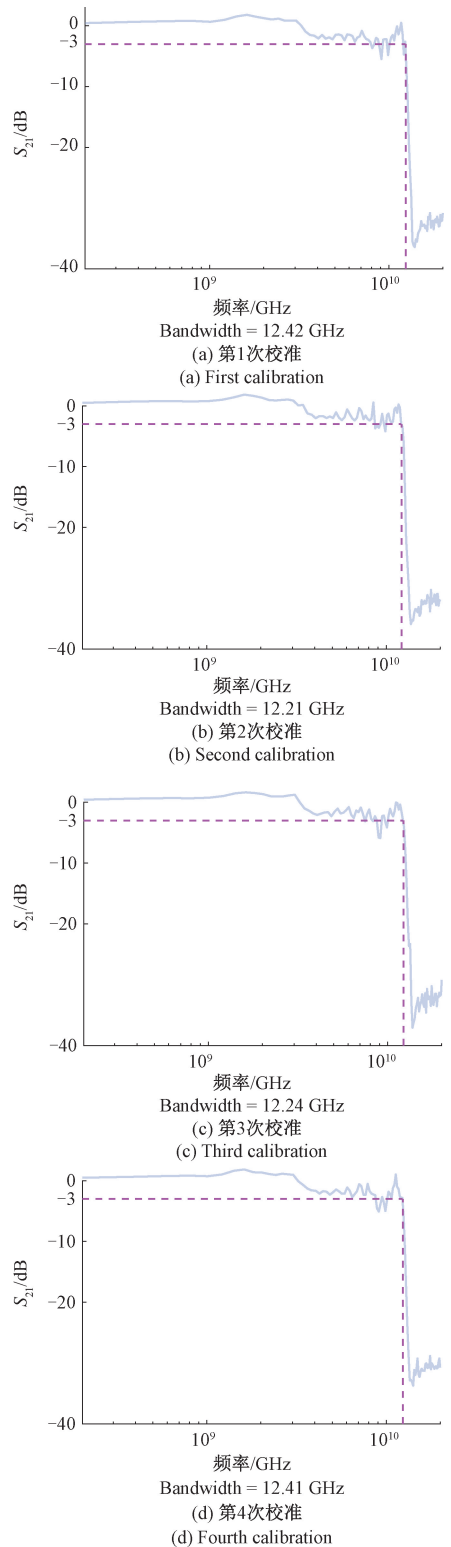


图 7 数字示波器探头的幅频响应图
Fig. 7 Amplitude and frequency response graph of digital oscilloscope probe

在一定误差。或由于该数字示波器宽带探头系统日常使用的磨损和老化,目前探头的性能可能已与出厂时不同,

其在 9~10 GHz 频率范围内的传输性能已经有损。

为了进一步验证原因,本文用另一种反射更小的接地共面波导来校准数字示波器宽带探头系统,得到探头的幅频响应,如图 8 所示。

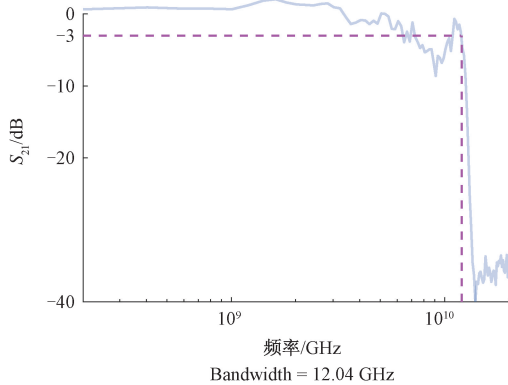


图 8 另一种接地共面波导校准
数字示波器宽带探头系统

Fig. 8 Another grounded coplanar waveguide calibration
digital oscilloscope broadband probe

由图 8 可知,用另一种接地共面波导校准数字示波器宽带探头系统时,获得数字示波器宽带探头系统的带宽约为 12 GHz,在 9~10 GHz 频率范围内,传输性能有损,最大衰减为-8.6 dB。进一步证明误差点出现与反射关系不大,而更可能是探头的传输性能在 9~10 GHz 频率范围内已经有损。

通过对该实验的结果进行简单的测量不确定度评定,求得由测量重复性引入的 A 类不确定度为 0.3%,由标准脉冲信号源和数字示波器引入的 B 类不确定度为 2.3%,最终得到其相对扩展不确定度 4.6%。

3 结 论

本文构建了数字示波器宽带探头的校准系统,包括标准脉冲信号源、接地共面波导、数字示波器和被测探头,并采用反卷积对探头系统进行辨识,获得被校数字示波器宽带探头系统的幅频响应及带宽。然后对 Keysight Infiniimax 高频差分有源探头系统进行校准实验,并基于反卷积处理数据,得到该探头系统的幅频响应和带宽,校准结果表明其带宽约为 12 GHz,与标称带宽 12 GHz 相符,同时对 9~10 GHz 频率范围内存在的误差点进行了分析。最终证明本文所研究的数字示波器宽带探头系统校准方法的可行性与有效性。

本文采用的时域校准数字示波器宽带探头系统的方法,操作比较简便,且可溯源到我国的脉冲参数国家基准上,使校准结果更加可靠。将来会校准其他探头来进一

步确定本文使用的校准方法是有效的。

参考文献

- [1] 刘光德. 示波器探头的选择与校准[J]. 仪器仪表用户, 2006, 13(3): 128-130.
LIU G D. Selection and calibration of oscilloscope probes [J]. Instrument User, 2006, 13(3): 128-130.
- [2] GAUDO P M, BERNAL C. Phase shift deskew of oscilloscope current and voltage sensing probes by means of energy balance [C]. 2008 71st ARFTG Microwave Measurement Conference. IEEE, 2008: 1-4.
- [3] 常志文. 示波器探头在测量中的重要性[J]. 现代电子技术, 2005 (23): 73-75.
CHANG ZH W. The importance of oscilloscope probes in measurement [J]. Modern Electronic Technology, 2005 (23): 73-75.
- [4] 陈晓华. 示波器探头的使用及测量结果的误差分析[J]. 半导体技术, 2010, 35(7): 634-636.
CHEN X H. The use of oscilloscope probes and error analysis of measurement results [J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(7): 634-636.
- [5] ALI N T, MCEWAN N J, EL-KHAZMI E A. Simple current waveform probe for microwave amplifiers [C]. The 8th International Conference on Communication Systems, 2002. ICCS 2002. IEEE, 2002, 1: 38-41.
- [6] JOHNSON K, MALINIAK D. Oscilloscope probes for power electronics: Be sure to choose the right probe for accurate measurements [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2018, 5(1): 37-44.
- [7] 孙灯亮. 数字示波器探头技术[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 4-12.
SUN D L. Digital oscilloscope probe technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2011, 30(7): 4-12.
- [8] 沈春阳. 示波器探头的使用及测量结果误差分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2018, 8(14): 85-86.
SHEN CH Y. The use of oscilloscope probes and analysis of measurement result errors [J]. Modern Industrial Economy and Information Technology, 2018, 8(14): 85-86.
- [9] 李凯. 现代示波器高级应用: 测试及使用技巧[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
LI K. Advanced Applications of Modern Oscilloscopes: Testing and Usage Techniques [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [10] 谢文, 龚鹏伟, 姜河, 等. 一种宽带示波器探头传输特性校准方法和系统 [P]. 北京: CN110361685A,

2019-10-22.

XIE W, GONG P W, JIANG H, et al. A method and system for calibration of transmission characteristics of broadband oscilloscope probes [P]. Beijing: CN110361685A, 2019-10-22.

- [11] CASSIVI Y, WU K. Low cost microwave oscillator using substrate integrated waveguide cavity [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2003, 13(2): 48-50.
- [12] CAI Y, ZHANG Y, DING C, et al. Design of multilayer SIW cavity-backed slot antenna array [C]. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, 2017: 1189-1193.
- [13] WEN C P. Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyro-magnetic device applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1969, 17(12): 1087-1090.
- [14] 刘明亮, 陆福敏, 朱江森, 等. 现代脉冲计量 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LIU M L, LU F M, ZHU J M, et al. Modern Pulse Metrology [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [15] ZHU J, ZHENG X, ZHAO K, et al. Research on grounded coplanar waveguide for calibration of digital real-time oscilloscope probe [C]. 2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE, 2021: 194-199.

作者简介



朱江森, 北京工业大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数字信号处理、现代测量、时域测量和数字去卷积应用。

Email: zhujiangmiao@bjut.edu.cn

Zhu Jiangmiao is now an associate professor and Master's tutor in the Beijing University of Technology. Her main research interests include digital signal processing, modern measurement, time domain measurement.



郑香蕊 (通信作者), 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为现代时域测量、示波器校准。

E-mail: 1010247416@qq.com

Zheng Xiangrui (Corresponding author) is now a M. Sc. candidate in Beijing University of Technology. Her main research interests include modern time domain measurement and oscilloscope calibration.



赵科佳, 中国计量科学研究院的研究员, 主要研究方向为数字调制信号处理、现代测量、脉冲参数和时域测量等。

Zhao Kejia is now an associate researcher in the National Institute of Metrology. His main research interests include digital signal processing, modern measurement, pulse parameter and time domain measurement.