

双路超快沿同步取样信号设计与实现

赵俊鹏^{1,2}, 景宁^{1,2*}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051)

摘要: 取样信号的质量是等效时间采样技术的关键。在对多个高频信号同时进行采集时,需要同步度较高的超快沿脉冲作为触发取样信号。本文利用阶跃恢复二极管的反向恢复时间极短的特性,设计了超快沿窄脉冲压缩电路以及三阶威尔金森功分器,将时基信号进行增益放大与下降沿压缩后进行等功率分配,最终驱动两路微波取样器对高速信号进行采集。实验结果表明,输出的两路脉冲信号下降沿均幅度达到了7 V,且下降沿时间可以达到150 ps以内,双路间延迟小于20 ps。

关键词: 等效时间采样;超快沿窄脉冲;阶跃恢复二极管;功分器

中图分类号: TN789.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2395(2024)02-0409-07

Design and Implementation of Dual-channel Ultrafast Edge Synchronous Sampling

ZHAO Junpeng^{1,2}, JING Ning^{1,2*}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Institute of Frontier Interdisciplinary Sciences, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The quality of the sampling signal is key to the equivalent-time sampling technique. When multiple high-frequency signals are acquired simultaneously, ultrafast edge pulses with a high degree of synchronization are required as trigger sampling signals. In this paper, taking advantage of the extremely short reverse recovery time of the step recovery diode, we designed an ultrafast edge narrow pulse compression circuit and a third-order Wilkinson power divider to amplify the gain of the time-based signal and compress the falling edge for equal power distribution, and finally drive two microwave samplers to collect the high-speed signal. The experimental results show that the average amplitude of the falling edge of the two pulse signals reaches 7 V, and the falling edge time can be less than 150 ps, and the delay between the two channels is less than 20 ps.

Key words: equivalent-time sampling; ultrafast narrow pulse; step recovery diode; power divider

0 引言

多通道信号同步采集,被广泛应用于现代探测、通信、雷达、生物医学等领域中,其特点是利用频率较低的取样脉冲同时对多个高速周期信

号进行不失真采样^[1-3]。对于高速信号采集,取样脉冲信号需要具备快速跳变特性^[4]。由于同步数据采集系统中取样器获取的信号质量取决于取样脉冲信号的质量。为满足取样器对被测信号高带宽的输入要求,取样脉冲信号需要达

收稿日期:2023-10-17;接受日期:2023-12-04

基金项目:国家自然科学基金(2016012);山西省基础研究计划资助项目(202203021221114)

作者简介:赵俊鹏(1997-),男,山西晋中人,硕士,研究方向为信号与处理。E-mail:644205822@qq.com

* 通信作者:景宁(JING Ning),E-mail:jingning@nuc.edu.cn

引文格式:赵俊鹏,景宁.双路超快沿同步取样信号设计与实现[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(2):409-415.

DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023170

到皮秒数量级的下降时间^[5-7]。采集 20 GHz 信号时,需要触发脉冲满足跳变时间小于 150 ps,跳变幅值大于 5 V,且通道间同步延迟小于 30 ps^[8]。因此,需要对取样脉冲信号进行放大、压缩,以用于满足取样器的高带宽输入要求。

目前,Keysight (是德)和 Tektronix (泰克)等^[9-13]国外仪器公司,已成功将超快沿技术应用于数字通信分析仪^[14](Digital Communications Analyzer, DCA)、时域反射计(Time Domain Reflectometry, TDR)等产品中。其中泰克公司旗下 4015 的系列的取样脉冲边沿跳变时间可达到 10 ps,并且幅值可达到 5 V 以上^[15-16]。受制于商业公司的保密技术以及专利受限等因素,国内自主研发的超快沿技术也在不断发展。其中电子科技大学孙冬在 2011 年提出的基于阶跃恢复二极管(Step Recovery Diode, SRD)的取样脉冲技术研究^[17],实现的脉冲跳变时间为 200 ps,脉冲跳变幅值为 3.2 V。而后电子科技大学刘军在 2019 年提出了极窄脉冲合成与超快沿产生电路设计^[18],该文所设计的脉冲跳变时间虽然达到 50 ps 以内,跳变幅值为 400 mV,驱动负载能力有很大进步空间。

为满足更高带宽微波取样器的特性要求,本文基于阶跃恢复二极管产生超快沿窄脉冲信号,利用先进设计系统软件(Advanced-designs system, ADS)设计双路威尔金森(Wilkinson)片上集成功分器,完成了一款低功耗、小体积的双通道触发模块,集超快沿极窄脉冲发生和功率分配于一体,不仅提高便携性和节省能源成本,同时实现了多通道触发脉冲的低延迟同步输出,其产生的两路脉冲均可以驱动宽带微波取样器对 20 GHz 高频信号取样。

1 基本原理

对于高速微波信号采集,本文采用混频技术,即利用高频被测信号与低频取样脉冲信号相乘,输出信号表示为:

$$f_s(t) = f(t) \times g(T_n), \quad (1)$$

其中 $f(t)$ 表示被测信号函数, $g(T_n)$ 表示取样脉冲信号函数, $f_s(t)$ 为含有被测信号包络信息的混频信号。当取样脉冲 $g(T_n)$ 到来时,取样器采样门打开并与被测信号 $f(t)$ 实现混频处理。

在取样过程中,取样脉冲信号质量对采样器的带宽指标起着决定性作用,其下降沿的陡度和幅值都会影响混频信号 $f_s(t)$ 的质量。理想情况下,取样脉冲是一个跳变时间为零的脉冲信号,但实际产生的取样脉冲信号跳变时间不可能为 0,其通常呈现三角脉冲的形状。因此必须要尽可能地提升三角脉冲的窄度,通过将采样门关闭速度加快的方式,以提高取样器的工作带宽。同时保证取样脉冲幅值不小于 5 V 以导通二极管驱动取样器实现混频取样。

为了调整时基电路所产生的触发信号的边沿,利用了具有正向和反向偏置的阶跃恢复二极管所产生的阻抗转换特性。通过向阶跃恢复二极管施加反向偏置电压,可产生瞬时反向跳变电流,该电流保持一段时间后立即归零并被完全阻断。与普通二极管相比,阶跃恢复二极管的反向恢复时间极短,仅为几十皮秒。然而时基电路产生的步进延时触发信号存在幅值小、下降时间长、带负载能力弱等缺点,如果直接通过阶跃恢复二极管压缩,产生的脉冲无法打开采样开关进行采样。因此必须先经过前级调理电路进行初步压缩、放大等调理后才能进行阶跃恢复二极管压缩。电路原理图如图 1 所示。

电路前级是由三极管放大电路构成,对脉冲信号进行幅度调理,后级为阶跃恢复二极管组成的脉冲压缩电路,用于对取样脉冲信号进行脉冲压缩。本文利用高带宽的三极管设计的反向放大器进行放大压缩,由于输入取样器的取样脉冲信号为负脉冲,则需要再次反向处理,为保证两级电路的隔离,在两级电路中间添加射级跟随器,不仅保证了电路的良好隔离度,还利用射级跟随器高输入阻抗低输出阻抗的特性,提高了取样脉冲的带负载能力。

为了产生高度同步的双路超快沿脉冲信号,针对前级电路的输出特性,本文设计了威尔金森功分器。由于单阶威尔金森功分器的工作带宽较短,无法保证超快沿脉冲信号的所有谐波分量全部通过,在这种情况下需要利用多节阻抗变换器,将产生的反射波相互抵消以扩展功分器的工作带宽。因此,采用增加导入功分器的阶数的方式实现工作带宽的扩展。此方式同时还会增加插入损耗和电路尺寸。综合考

电路进行仿真验证。将高带宽型号的三极管 BFT93、BFR96、BFG135 以及阶跃恢复二极管的 SPICE 模型导入 LTspice 器件库中,并根据电路原理图连接所有器件,将输入信号设置为一个脉宽 10 ns,跳变幅值 0.9 V 的负脉冲信号。仿真创建的电路模型,观察输出信号,调试电路中电容 C8 的参数,改变电容值,比较仿真结果,以确定输出电容的最佳参数。结果表明,要获得下降沿更为陡峭的输出信号,需要尽可能减小电容 C8 的值。当电容 C8 为 5 pF 时,可以产生下降沿小于 150 ps,幅值超过 5 V 的超快沿极窄脉冲。

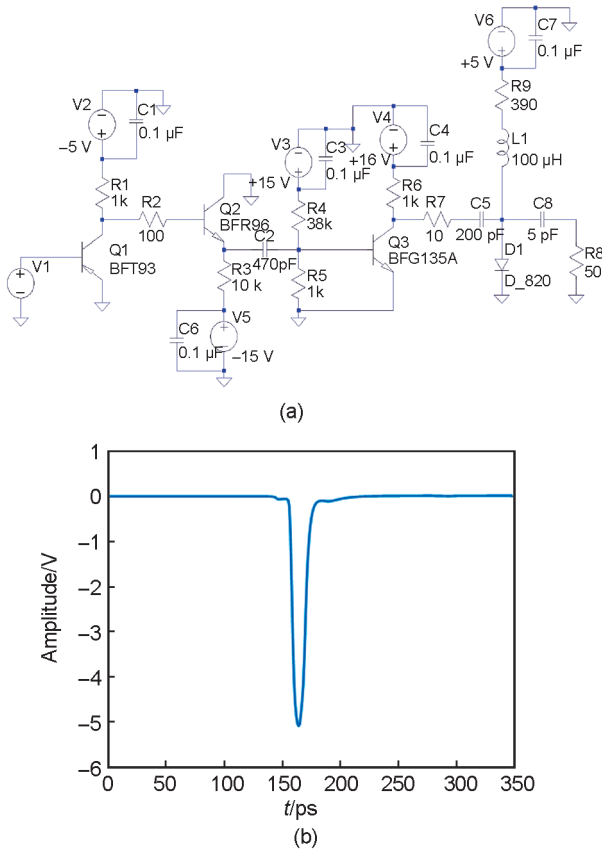


图3 超快沿窄脉冲电路模型(a)与仿真结果(b)

Fig. 3 Ultrafast edge narrow pulse circuit model (a) and simulation results (b)

超快沿窄脉冲电路仿真实验结果如图3所示。仿真结果表明,脉冲跳变幅值达到了5 V,下降沿时间小于150 ps,完全满足设计需求。实际电路可能因为分布参数、PCB设计等因素无法达到仿真效果。为了进一步检验以上电路的实际性能,本文在第3节进行了板级验证。

2.2 威尔金森功分器仿真

通过 ADS2020 的无源电路综合功能对威尔金森功分器进行仿真设计。首先搭建仿真环境,本文选用聚四氟乙烯(F4B)板材,F4B高频板是一种特殊材料制成的电路板,具有优异的高频特性。它采用了先进的技术和精密的制造工艺,能够在高频环境下提供低损耗和稳定的信号传输。设置板材控件参数:基板电介质常数 E_r 为 2.65,基板厚度 H 为 1 mm,损耗角正切值 $TanD$ 设置为 0.009。利用 LineCalc 工具根据微带线输入阻抗特性计算出功分器的各级微带线宽、线长等参数,并不断的对其进行调谐,最终得到的功分器调谐版图如图4所示。

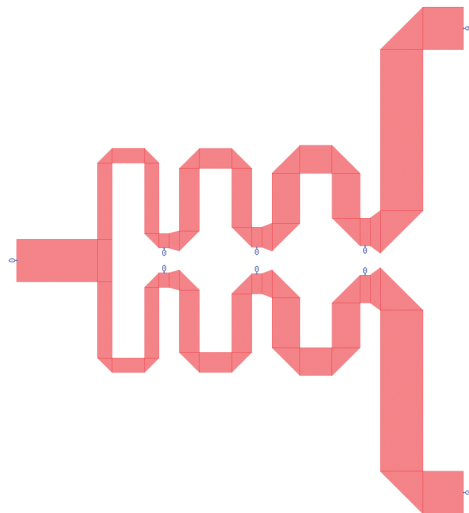


图4 三阶威尔金森功分器调谐版图

Fig. 4 Third-order Wilkinson power divider tuning layout

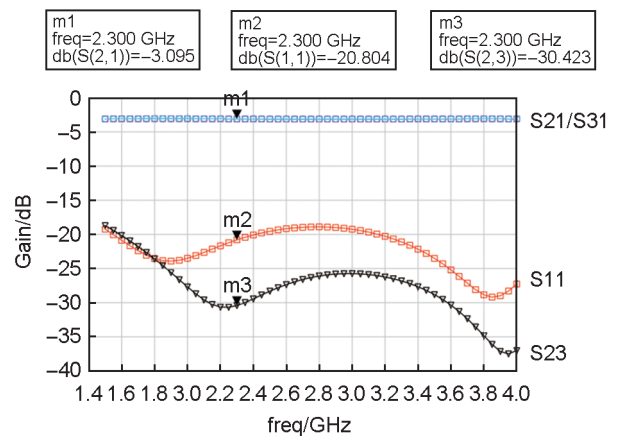


图5 联合散射参数仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of joint scattering parameter

最后根据仿真原理图进行联合仿真,得到最终的散射参数结果如图5所示。从散射参数

可以看出,在 2 GHz~4 GHz 的频率范围内,回波损耗可以达到 20 dB 以上,两个端口之间的隔离度在 25 dB 以上。插入损耗的计算为散射参数图中 S21 或 S23 数值减去理论分配损耗 (3 dB)。在 2 GHz~4 GHz 频率范围内插入损耗均小于 0.1 dB。

由联合散射参数仿真结果可知,该功分器在脉冲信号所在的工作频率范围内具有损耗小、两路输出隔离度高的特点,满足电路设计需求。

3 实验结果与分析

为检验前文所设计的电路性能,将功分器

仿真版图导入并联合前级脉冲压缩电路绘制印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB),并与其他部件进行板级联合调试。在对 PCB 进行布线时,信号走线应尽可能短,且对整个电路信号走线进行了 50 欧姆阻抗匹配设计,以保证信号完整性。

测试前搭建硬件测试平台如图 6 所示,主要包括超快沿脉冲压缩电路板、触发信号产生电路、信号发生器、示波器等几部分构成。设置超快沿脉冲压缩电路输入为频率为 50 kHz、脉宽为 10 ns、跳变幅值为 0.9 V 的时基触发信号。电路两路输出端通过等长的 50 欧

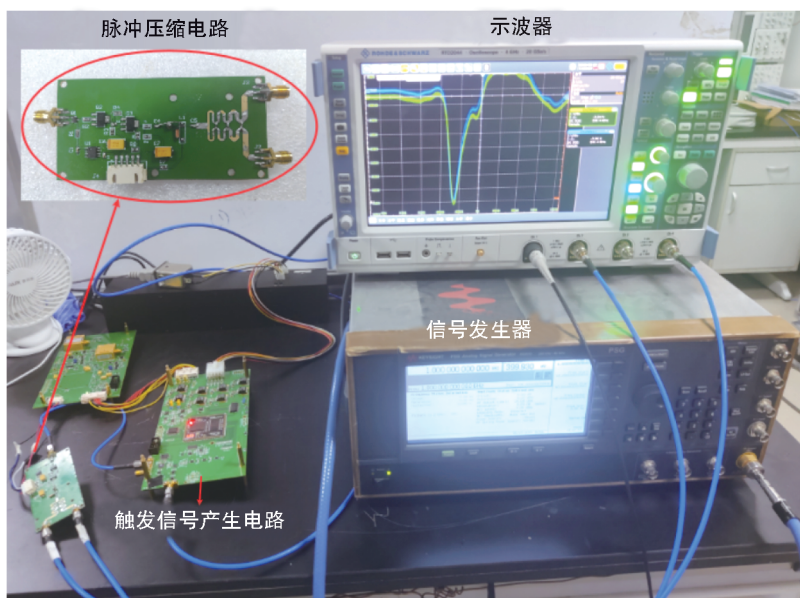


图 6 硬件测试实验平台

Fig. 6 Hardware of test platform

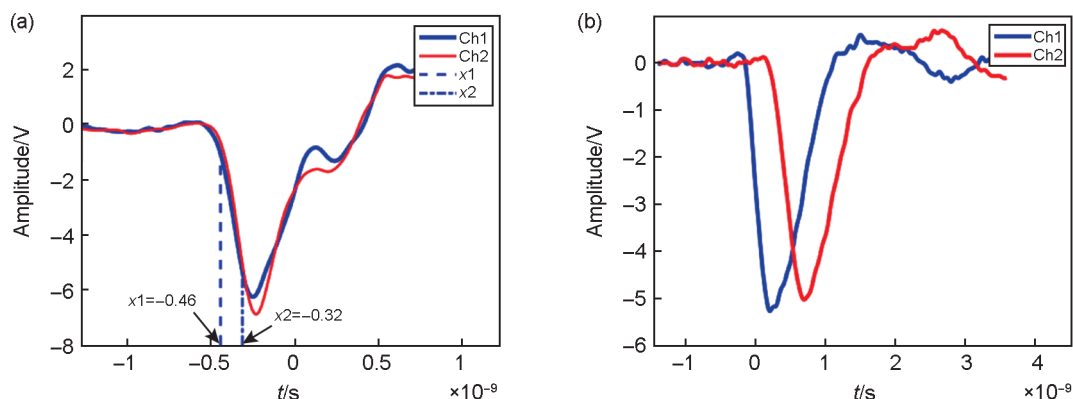


图 7 本文电路(a)与对比组电路(b)输出波形

(a) 电路的双通道间延迟小于 20 ps; (b) 电路双通道间存在 500 ps 延迟

Fig. 7 Output waveforms of circuit (a) in this paper and circuit (b) in the comparison group

(a) The circuit has a delay of less than 20 ps between the two channels; (b) there is a delay of 500 ps between the two channels of the circuit

姆阻抗线连接示波器,观察输出波形。通过带宽为4 GHz的实时示波器对超快沿脉冲信号跳变时间、幅值进行测量。

本文复现了文献[2]设计的电路作为对比组进行实验。测试结果如图7所示,本文所设计电路产生的两路输出信号幅值均达到了7 V,边沿跳变时间小于取样器设计需求的150 ps,两通道间信号延迟低于20 ps。其相较于对比组,本文所设计的电路双通道间具有更高的同步性。

本文与文献[17]、文献[18]电路性能指标对比结果如表1所示。从表中可以直观地看出,本文所设计的超快沿脉冲电路,在保证跳变时间为皮秒级且两路信号保持高度同步性的同时,其脉冲信号具有更高的幅值,驱动负载能力更高。

表1 本文与其他文献电路关键性能指标比较

Table 1 Comparison of this paper with other literature circuits in terms of key performance indicators

文献	边沿跳变时间/ps	脉冲信号幅值/V	通道数量
本文	150	7	2
[17]	200	3.2	1
[18]	40	0.4	1

4 结论

本文基于阶跃恢复二极管与高隔离度的威尔金森功分器,完成了两路超快沿脉冲信号的同步实现。与现有的方法相比,本文产生的两路超快沿脉冲信号具有更高的同步性,大大降低了电磁串扰对电路信号完整性的影响。此外,该方法设计简单,体积小重量轻,易于实现与集成。下一步的研究重点将是解决超快沿脉冲信号过冲较大的现象,进一步提高取样脉冲的质量,从而实现对更高频率的信号采样。

参考文献:

[1] 蔡志匡,石国伟,齐轩晨,等.基于等效采样的超宽带窄脉冲接收电路设计[J].电子器件,2019,42(3):600-603. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.03.012.
CAI Z K, SHI G W, QI X C, et al. Design of UWB Narrow Pulse Receiver Circuit Based on Equivalent Sampling[J]. *Chin J Electron Devices*, 2019, 42(3): 600-603. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.03.012.

[2] 刘震.取样示波器精密延时及窄脉冲触发技术的研究与实现[D].太原:中北大学,2022.
LIU Z. Research and implementation of precise delay and narrow pulse trigger technology for sampling oscilloscope [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.

[3] 王春华.基于类等效采样的导波雷达物位计的研究设计[D].济南:济南大学,2021.
WANG C H. Research and Design of Guided Wave Radar Level Meter Based on Similar Equivalent Sampling [D]. Jinan: University of Jinan, 2021.

[4] 王亚杰,何鹏军,荆晓鹏,等.基于漂移阶跃恢复二极管开关的脉冲源仿真计算[J].强激光与粒子束,2018,30(9):170398. DOI: 10.11884/HPLPB201830.170398.
WANG Y J, HE P J, JING X P, et al. Simulation and Calculation of Pulsed Power Source Based on Drift Step Recovery Diode Switching[J]. *High Power Laser Part Beams*, 2018, 30(9): 170398. DOI: 10.11884/HPLPB201830.170398.

[5] WANG S T, SUN Y W, HU L, et al. High-speed and Broadband Digital Receiver Based on Optical Sampling Pulse Waveform Matching[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(6): 1338. DOI: 10.1364/ol.385657.

[6] ZHOU J M, LU Q Y, LIU F, et al. A Novel Picosecond Pulse Generation Circuit Based on SRD and NLTL[J]. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0149645. DOI: 10.1371/journal.pone.0149645.

[7] WANG X K, TIAN L, WANG H L, et al. Design of an Ultra-wideband Picosecond Pulse Generator Based on Step Recovery Diodes with an Improved SPICE Model[J]. *Circuit Theory & Apps*, 2023, 51(8): 3585-3595. DOI: 10.1002/cta.3592.

[8] 黄坤超,张靖悉,周焯.实时宽带示波器在快沿脉冲测量中的应用[J].电讯技术,2013,53(11):1532-1536. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.024.
HUANG K C, ZHANG J X, ZHOU Y. Application of Real-time Wideband Oscilloscope in Fast-edge Pulse Measurement[J]. *Telecommun Eng*, 2013, 53(11): 1532-1536. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.024.

[9] SONG L L, ZHAO M H. The Research of W-band High Order Frequency Multiplier Based on Avalanche Diode[J]. *PIER Lett*, 2018, 72: 45-53. DOI: 10.2528/ pier117092109.

[10] 沈俊杰.高速电路信号完整性分析与设计[J].电子制作,2018(22):15-16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5059.2018.22.006.
SHEN J J. Signal Integrity Analysis and Design of High-speed Circuit[J]. *Pract Electron*, 2018(22): 15-16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5059.2018.22.006.

[11] 赵科佳,刘明亮,郁月华,等.宽带取样示波器上升时间与带宽的转换系数的研究[J].计量学报,2006(2):160-163. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1158.2006.02.017.
ZHAO K J, LIU M L, YU Y H, et al. Research on the

- Conversion Factors Between Risetime and Bandwidth of Broadband Sampling Oscilloscope[J]. *Acta Metrol Sin*, 2006 (2): 160-163. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1158.2006.02.017.
- [12] ZHU W F, ZHANG S B, DAI X. Design of a Broadband Microwave Sampler Applied to VNA[C]//2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Qingdao: IEEE, 2016: 943-947. DOI: 10.1109/ICEMI.2015.7494361.
- [13] 邱渡裕. 宽带等效取样示波器关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- QIU D Y. Research on Key Technologies of Broadband Equivalent Sampling Oscilloscope[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [14] 郭宇, 朱国富. 超宽带穿墙雷达取样脉冲产生器设计[J]. 电讯技术, 2014, 54(9): 1280-1285. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.020.
- GUO Y, ZHU G F. Design of a Novel Sampling Pulse Generator for Ultra-wideband Through-wall Radar[J]. *Telecommun Eng*, 2014, 54(9): 1280-1285. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.020.
- [15] 杨坤, 张敏娟. 宽带微波取样器的信号调理电路设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(24): 48-53. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2210100.
- YANG K, ZHANG M J. Design of Signal Conditioning Circuit for Broadband Microwave Sampler[J]. *Electron Meas Technol*, 2022, 45(24): 48-53. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2210100.
- [16] TANKELIUN T, ZAYTSEV O, URBANAVICIUS V. Hybrid Time-base Device for Coherent Sampling Oscilloscope[J]. *Meas Sci Rev*, 2019, 19(3): 93-100. DOI: 10.2478/msr-2019-0015.
- [17] 孙冬. TDR脉冲源和采样关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- SUN D. Research on TDR pulse source and sampling key technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [18] 刘军. 极窄脉冲合成与超快沿产生电路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- LIU J. Circuit Design of Ultra-narrow Pulse Synthesis and Ultra-fast Edge Generation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.