

一种宽带全量程示波器信道保护器研制

李海涛¹, 李斌康^{1,2}, 陈彦丽¹, 田耕^{1,2}, 赵前¹, 阮林波^{1,2}

(1.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2.强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 基于 THS3491 运算放大器芯片研制示波器信道保护器, 应用在脉冲辐射场诊断测试之中。研究测试了 SOIC、VQFN 两种封装的 THS3491 的幅频特性曲线, 采用 VQFN 封装的 THS3491 作为保护器的核心芯片; 研制的保护器输出电压幅值范围为 ± 10 V (50Ω 负载), 等效电噪声峰峰值约为 2 mV; -3 dB 小信号带宽约为 850 MHz, 0.3 dB 平坦度带宽约为 710 MHz, 发现并理论解释了保护器输出电压的峰移现象。通过 δ 脉冲信号源对保护器进行测试, 对比输入输出电压波形, 实现了无失真的 δ 响应; 在输出信号电压幅值范围超过 ± 10 V 时, 保护器进入到输出保护状态, 输出恢复时间小于 7 ns, 可以很好满足脉冲辐射场诊断中的示波器信道保护要求。

关键词: 信道保护; 小信号带宽; 带内平坦度; 输出摆率; 恢复时间

中图分类号: TN79

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201138

中文引用格式: 李海涛, 李斌康, 陈彦丽, 等. 一种宽带全量程示波器信道保护器研制[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 106-110.

英文引用格式: Li Haitao, Li Binkang, Chen Yanli, et al. Development of a wide-bandwidth full-range oscilloscope channel protector[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 106-110.

Development of a wide-bandwidth full-range oscilloscope channel protector

Li Haitao¹, Li Binkang^{1,2}, Chen Yanli¹, Tian Geng^{1,2}, Zhao Qian¹, Ruan Linbo^{1,2}

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Effect for Intense Pulse Radiation, Xi'an 710024, China)

Abstract: An oscilloscope channel protector is developed based on the THS3491 operational amplifier, which is used in the diagnosis of pulse radiation field. By comparing and analyzing the bode plots of THS3491 in SOIC and VQFN packages, the THS3491 in VQFN package is used as the core chip of the protector. The output voltage range of the developed protector is ± 10 V (50Ω load), the peak-to-peak voltage noise is about 2 mV; the -3 dB small signal bandwidth is about 850 MHz, and the 0.3 dB flatness bandwidth is about 710 MHz. The paper discovered and theoretically explained the peak shift phenomenon of the protector output voltage. The protector was tested by a δ signal source to achieve a distortion-free δ response. When the output voltage amplitude range exceeds ± 10 V, the protector enters the output protection state, and the recovery time is less than 7 ns, which can well meet the oscilloscope channel protection requirements in the pulse radiation field diagnosis.

Key words: channel protection; small signal bandwidth; in-band flatness; output slew rate; recovery time

0 引言

在强脉冲辐射场信号测量时, 待测脉冲信号动态范围大, 测试时需要兼顾大动态范围测量和波形细节测量, 一般采用示波器信道量程搭接的方法来实现^[1-2]。常用示波器垂直分辨率有限(8 bit 或者 12 bit, 2~3 个数等级), 在进行信道量程搭接测量时(50Ω 负载), 每个信道受到的脉冲信号的冲击是一致的, 对高灵敏度信道而言, 高强度的脉冲信号冲击可能会造成示波器信道性能超差、损坏, 甚至导致示波器测量数据丢失。因此, 在进行脉冲辐射场信号测量时, 需要对示波器信道进行保护, 防止出现信道损坏、数据丢失等后果。

一直以来, 研制性能优良的示波器信道保护器是一个迫切需求^[3-4]。为了实现对输入脉冲信号的无失真输出和对示波器信道的保护功能, 保护器应该具备以下的功能: (1) 输入输出线性度高、无失真, 输出信号低噪声, 确保脉冲信号在传输链路上不引入额外干扰、性能不降低, 确保输出信号对示波器量程全覆盖(50Ω 负载)。(2) 具有输出饱和能力, 即在输入信号超过一定幅度时, 输入阻抗保持不变, 输出信号幅值饱和, 且该幅值处于示波器信道的可承受的幅值范围之内。(3) 具有优良的 δ 响应, 对大摆率的 δ 信号, 实现无失真跟随输出, 实现对大幅度信号的宽带无失真响应。(4) 具有快恢

复能力,当脉冲信号幅值下降到示波器的可测幅值范围内时,保护器需要及时从保护状态恢复至正常工作状态,确保在量程范围内实现对脉冲信号的无失真跟随等。

保护器的核心是模拟信号调理链路,实现对输入脉冲信号的宽带全量程、低噪声、无失真输出和对示波器信道的实时保护等功能。文献[5]提出的一种通用示波器信道保护器,采用1片TI公司的THS3201作为核心运算放大器芯片,输出电压幅度范围为 $\pm 3\text{ V}$ ($50\ \Omega$ 负载), -3 dB 带宽约为 750 MHz ,该保护器不能无失真输出 3 V 以上的脉冲信号,对 δ 信号的响应不够及时准确;文献[3]使用2片TI公司的THS3091运算放大器芯片,基于负载共享技术路线实现了对示波器信道的全量程保护功能,但是,双运放之间的不平衡导致该型保护器的 -3 dB 带宽约为 200 MHz ,带内平坦度较差,对 δ 信号的响应不够及时准确。

1 设计研制

为了实现对示波器的宽带全量程保护($50\ \Omega$ 负载)、对 δ 信号的无失真响应的功能,需要选取高输出驱动电流、高带宽、高线性的运算放大器芯片。本文选用了TI公司推出的THS3491运算放大器芯片,设计了宽带全量程的保护器^[6],如图1所示。

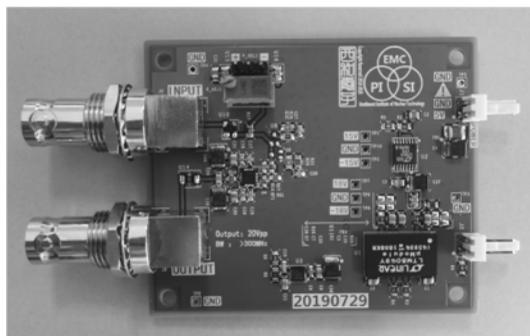


图1 示波器信道保护器实物

THS3491运算放大器是电流反馈型(Current Feed Back, CFB)运算放大器, -3 dB 带宽 900 MHz ,摆率 $8\ 000\text{ V}/\mu\text{s}$,线性输出电流典型值 $\pm 420\text{ mA}$,可实现输出电流限制和输出电压轨到轨,THS3491运算放大器芯片提供了SOIC和VQFN两种封装模式以供选择。本文利用THS3491的高带宽和高输出驱动电流实现对示波器信道的宽带全量程覆盖和 δ 信号的无失真响应,利用输出驱动电流饱和限制实现对示波器信道的有源保护功能。通过实现板级的信号完整性设计(Signal Integrity, SI)、电源完整性设计(Power Integrity, PI)等,优化系统整体性能,达到了对脉冲信号的宽带全量程无失真跟随输出功能。

1.1 信号完整性设计

信号完整性设计基于射频信号理论、传输线理论等,主要采用阻抗控制、端接等方法,确保信号传输链路上的特征阻抗连续,解决因阻抗不连续等导致的信号畸变

问题^[7-9]。电源完整性设计的主要目的是实现对低噪声电压的分配和快电流的及时响应,信号完整性设计的主要目的是解决信号传输过程中的畸变问题;两者的实现方法不同,实现的基本理论亦不同,具体如表1所示。

表1 信号完整性和电源完整性区别

基本理论	信号完整性	电源完整性
目的	传输线理论 确保信号传输路径上特征	滤波、去耦理论 低噪声电压分配、
实现方法	阻抗连续,消除信号畸变 阻抗控制、端接等	快电流及时高效响应 滤波、去耦等

在PCB设计时,需要注意模拟信号链路上的信号完整性设计,以求能够发挥出系统的最佳性能,包括:输入输出路径隔离与匹配、运算放大器芯片引脚连接、PCB层开窗等。

在模拟信号的输入输出路径上增加隔离串联电阻,一方面能确保信号传输路径上的特征阻抗连续;第二能确保传输路径上前后端隔离,防止寄生参数恶化系统性能,确保系统带宽内的平坦度等^[10-11]。

关于运算放大器芯片引脚连接,设计时电源引脚和信号引脚两类分别考虑。针对电源引脚的去耦,研制保护器PCB上包含独立的电源/地层,高效及时响应系统的电压电流需求,为最优化系统性能实现奠定基础。信号引脚上的信号线一般采用最短走线原则,这样可以有效确保芯片对负反馈控制的及时响应,降低传输路径上的寄生参数。

关于PCB层的开窗,一般要求对芯片及走线正下方的PCB层开窗,这样可以降低信号路径上引入的寄生参数干扰,优化系统的高频性能。有多种开窗方式可供选择,可以把芯片正下方区域全部开窗,也可以只把芯片敏感引脚正下方区域部分开窗;可以把芯片正下方区域PCB层全部开窗,也可以把芯片正下方区域的60%的PCB层开窗;本文采用了在芯片及敏感走线的正下方区域的60%的PCB层开窗的方式,实测指标较优。根据THS3491的封装不同研制了两种保护器。

1.2 电源完整性设计

电源完整性设计基于电源芯片选型、电源滤波、电源去耦等理论,通过对电源的产生、分配、回流、去耦等链路控制,实现系统对低噪声电压的分配和快电流的及时响应等功能^[12-15]。

为保护器设计的电源分配网络如图2所示,综合考

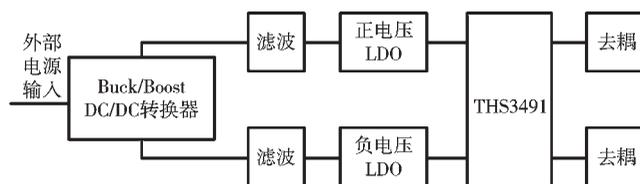


图2 设计的电源分配网络

虑了电源利用率和电源噪声等因素,采用“DC/DC+LDO”的模式为 THS3491 提供正负电源。DC/DC 转换器采用了 ADI 公司的 LTM8049 芯片,把输入的 5 V 电压,通过 Buck/Boost 转换后输出 +18 V、-18 V 电压;±18 V 电压噪声较大,经过滤波可以降低其中的开关频率噪声和低频噪声,滤波功能通过在链路上增加磁珠、RC Snubber 等方式实现;滤波后的±18 V 电压分别输入到正负电压的 LDO 中,正电压 LDO 选择 ADI 公司的 LT1764,负电压 LDO 选择 ADI 公司的 LT3015,经过降压转换后,输出±15 V 电压,作为 THS3491 的工作电压。

LDO 的输出电压能够完成系统对 100 kHz 以下的电流需求的及时响应,对超过该频率的系统电流需求无法及时响应。去耦功能可是实现系统对高频电流需求的及时响应,去耦功能主要是通过去耦电容等实现,去耦电容的封装选择、容值选择、摆放位置等可以通过去耦半径^[12,14]的概念进行分析。

在 PCB 上,电源/地不仅为系统的电子元器件提供工作电压,而且还为电源、信号提供了最短的回流路径。在高频电路设计时,无论是电源还是信号,其回流路径是最低感抗回流路径。为了确保高速信号回流,设计的保护器为 4 层板,设计专门的电源/地层,且地层紧靠高速信号的走线层,降低其回流路径上的感抗和阻抗,降低噪声。在顶层(Top)和底层(Bottom)走线完成之后,进行表面敷铜接地处理,可以减小地线阻抗,提高抗干扰能力;降低电压传输压降,提高电源效率;与地线相连,还可以减小回流环路面积。此外,电源/地还作为 PCB 上元器件的散热路径,降低热阻,提高系统的散热速度,保证系统工作稳定。

2 性能测试

对研制的示波器信道保护器进行测试,首先比较了两种封装的保护器的幅频特性曲线,标定保护器的小信号带宽和带内平坦度。其次标定其输入输出线性度,测试其输出噪声。接着实测了保护器的 delta 响应,发现并理论解释了保护器输出的峰移现象。最后测试了保护器的输出保护功能和输出恢复时间。文中如无特别说明,性能测试中的保护器输出电压幅值是针对 50 Ω 负载测量得到的。

采用 Keisight 的网络分析仪测试了两种封装规格的保护器,分别采用了 SOIC、VQFN 封装的 THS3491 作为运算放大器芯片,自研示波器信道保护器,其波特图如图 3、图 4 所示。可以看到,采用 SOIC 封装 THS3491 的保护器在低于 670 MHz 的频带内平坦度约为 0.6 dB, -3 dB 带宽约为 800 MHz,在 300 MHz~500 MHz 频率区间内有一个极点导致了波特曲线的上冲,分析应该是 SOIC 封装的芯片引脚寄生参数较大导致的;采用 VQFN 封装 THS3491 的保护器在低于 710 MHz 频带内的平坦度约为 0.3 dB, -3 dB 带宽约为 860 MHz。对比看到,采用 VQFN 封

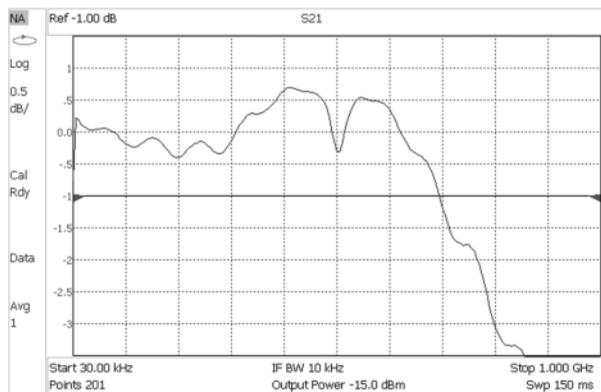


图 3 自研示波器信道保护器波特图(SOIC 封装)

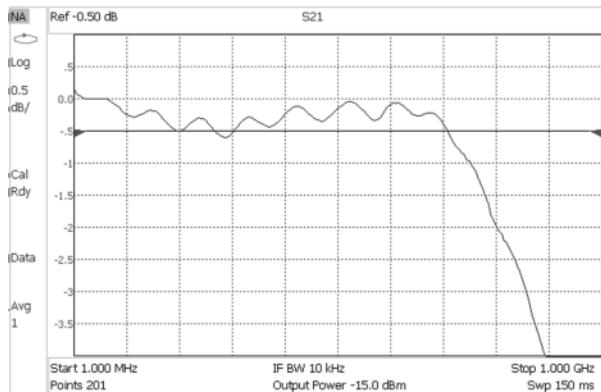


图 4 自研示波器信道保护器波特图(VQFN 封装)

装 THS3491 的保护器的波特图全面占优,是因为该封装整体尺寸更小、引脚间距更近,寄生参数更小。图 5 所示为 TI 公司提供的 VQFN 封装 THS3491 的开发板的波特图,开发板的信道增益约为 -13.5 dB,在 500 MHz 以下频带内的平坦度约为 0.6 dB, -3 dB 带宽约为 640 MHz。对比可以看到,自研的保护器的带宽更高、带内平坦度更好。

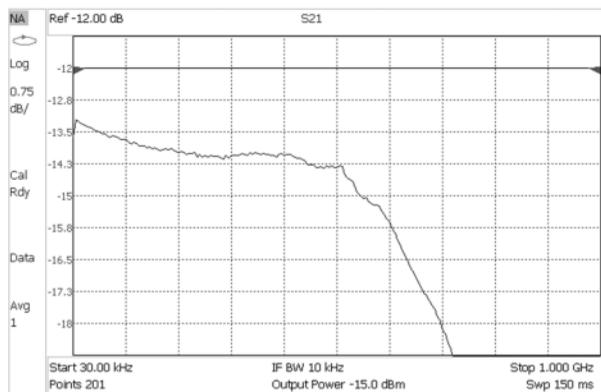


图 5 TI 官方开发板波特图(SOIC)

采用标准信号源和示波器实测 VQFN THS3491 封装的保护器的输入输出线性度,脉冲信号频率 100 kHz 的,脉宽 5 μs,保护器的输入输出线性曲线如图 6 所示,放大 1.25 倍,拟合优度近似为 1,可见在 ±10 V 输出量程

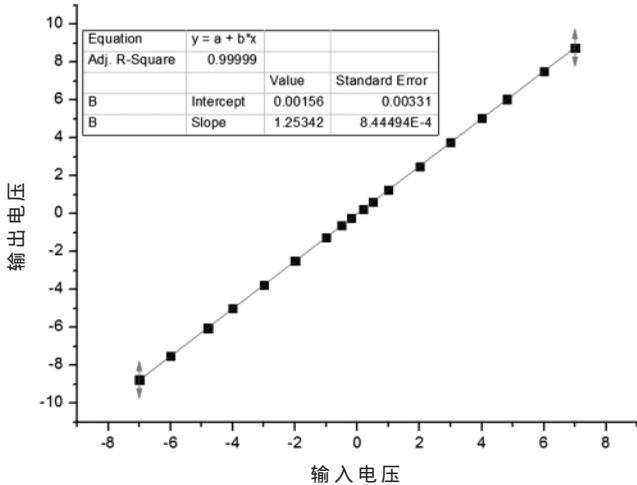


图6 自研保护器输入输出特性

范围内整体线性度较好,满足±10 V(50 Ω 负载)的输出驱动。实测 VQFN 封装 THS3491 的保护器在 50 Ω 接地时的空载噪声,如图 7 所示,在 2 μs 扫速、1 mV/div 挡位下,带有保护器的示波器信道峰峰值约 2 mV(下方深灰色),示波器 50 Ω 空载本底噪声峰峰值约 1 mV(上方浅灰色);对比两个信道幅值,示波器显示的幅值是所有采样点幅值的平均值^[16],可以看到,带有保护器的示波器信道和空载示波器信道的幅值相当,带有保护器的示波器信道分散性更大。

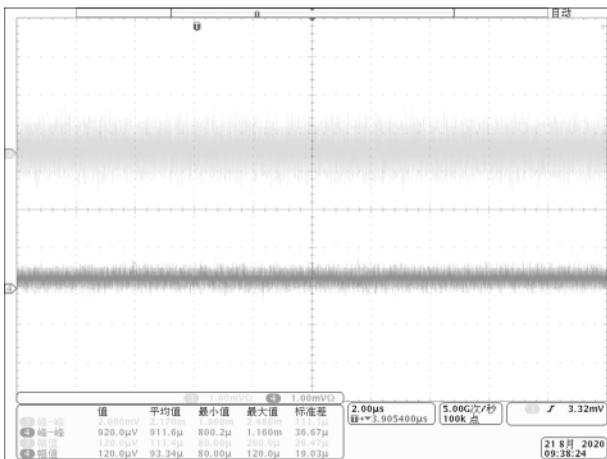


图7 电压噪声比较

采用 delta 信号源和示波器实测 SOIC 封装、VQFN 封装的保护器的 delta 响应,包括小信号 delta 响应、大信号 delta 响应,delta 信号的上升时间 t_r 、下降时间 t_f 约 1 ns,脉宽小于 2 ns,根据带宽和上升时间 t_r 的估算公式,delta 信号的能量近似均匀分布在 350 MHz 带宽以下。如图 8 所示,1 信道为直接进入示波器的对比信号,3 信道为保护器输出进入到示波器信道的信号,delta 信号幅度约为 600 mV,保护器的输出信号和对比信号波形接近,实现了 1:1 无失真跟随输出。如图 9 所示,delta 信号幅度约

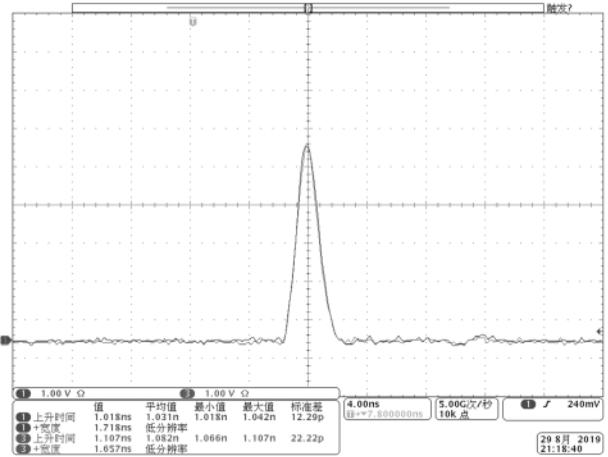


图8 600 mV δ 脉冲信号响应

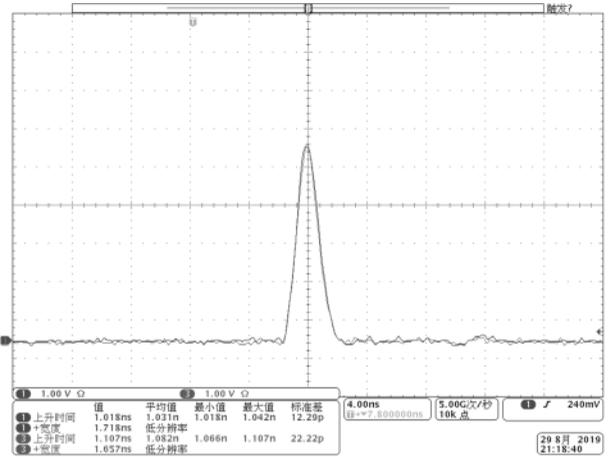


图9 5 V δ 脉冲信号响应

为 5 V,保护器的输出信号和对比信号波形接近,实现了 1:1 无失真跟随输出。如图 10 所示,delta 信号幅度大于 6 V 时,保护器的输出信号和对比信号在幅值约 5 V 处开始偏离,出现了峰移现象,峰时刻向后移动约 0.5 ns。出现这个现象有两个原因,一是 THS3491 芯片本身的压

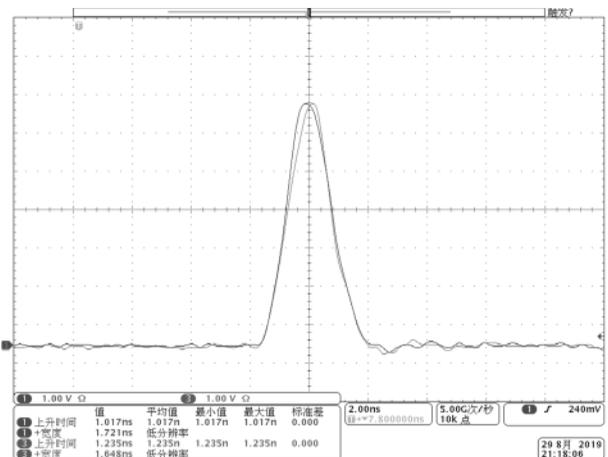


图10 6 V δ 脉冲信号响应

摆率有限,为 $8\ 000\ \text{V}/\mu\text{s}$,无法跟随输入信号的特快电压变化;二是为了隔离需要,在输出链路上串联了一个 $12.5\ \Omega$ 电阻,进一步降低了保护器对特快电压变化的跟随能力。根据文献[3]中压摆率计算公式,在输出链路上串联了一个 $12.5\ \Omega$ 电阻,针对 $50\ \Omega$ 负载,相当于把 THS3491 的压摆率降低到了 $6\ 400\ \text{V}/\mu\text{s}$ ($8\ 000\ \text{V}/\mu\text{s} \times 12.5 / (12.5 + 50)$)。已知 delta 信号的上升时间 t_r 约为 $1\ \text{ns}$,则其能够无失真跟随的 delta 脉冲电压幅值约为 $6\ 400\ \text{V}/\mu\text{s} \times 1\ \text{ns} = 6.4\ \text{V}$,考虑到信号传输路径上的损耗等因素,理论和实测波形符合较好,即输出信号电压幅度在 $6\ \text{V}$ 时就会发生明显的峰移现象。如果在保护器输出链路上串联了一个 $0\ \Omega$ 电阻,那么保护器能够无失真跟随的 delta 信号电压幅值约为 $8\ 000\ \text{V}/\mu\text{s} \times 1\ \text{ns} = 8\ \text{V}$,即保护器输出信号电压幅值高于 $8\ \text{V}$ 才会出现峰移现象;随着信号的上升时间 t_r 的增加,保护器能够无失真跟随的信号电压幅值也正比成倍增加。

delta 信号源输出经过长电缆传输后分路进入示波器信道和保护器,用以测试保护器的输出保护功能和输出恢复时间,得到波形如图 11 所示,1 信道为直接进入示波器的对比信号,2 信道为采用 SOIC 封装 THS3491 的保护器输出进入到示波器的信号,3 信道为采用 VQFN 封装 THS3491 的保护器输出进入到示波器的信号。可以看到,VQFN 封装的保护器跟随效果较好,SOIC 封装的保护器恢复过程中的幅值震荡较小,是因为受到 SOIC 封装的寄生参数影响。在输出电压约 $6\ \text{V}$ 时,保护器的输出波形不能无失真跟随输入波形,发生峰移现象;在输入信号电压幅值超过 $10\ \text{V}$ 时,保护器进入到输出保护状态;当输入信号电压幅值下降到 $10\ \text{V}$ 以下时,经过约 $7\ \text{ns}$,保护器可以继续无失真跟随输入电压信号幅值,这个时间称为保护器的输出恢复时间。

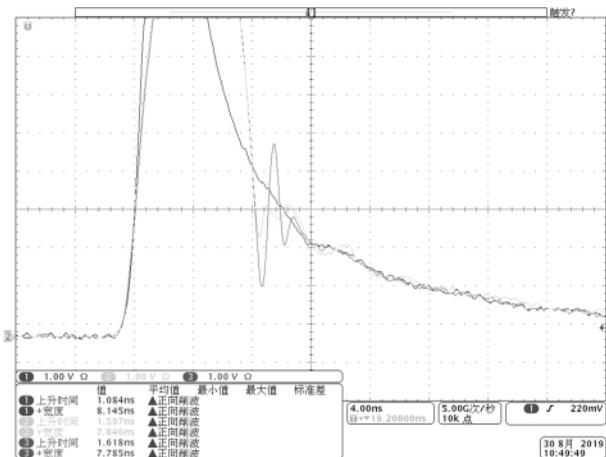


图 11 保护器输出恢复时间

3 结论

基于 TI 公司 VQFN 封装的 THS3491 芯片,研制宽带全量程示波器信道保护器,经过测试,保护器输出电

压幅值范围为 $\pm 10\ \text{V}$,噪声峰峰值约为 $2\ \text{mV}$; $-3\ \text{dB}$ 带宽约为 $860\ \text{MHz}$, $0.3\ \text{dB}$ 平坦度带宽约为 $710\ \text{MHz}$;可以实现对 delta 信号(上升时间 t_r 约 $1\ \text{ns}$,电压幅值低于 $8\ \text{V}$)的无失真响应;在输入信号电压幅值超过 $10\ \text{V}$ 时,保护器进入输出保护状态,输出恢复时间约为 $7\ \text{ns}$,满足了脉冲辐射场诊断中的示波器信道保护要求,现场应用也取得了很好的效果,既确保测试数据安全,又确保示波器信道物理安全。本文的结果可以应用到微弱信号的放大方面,对研究宽带超低噪声的模拟信号调理技术具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 刘庆兆.脉冲辐射场诊断技术[M].北京:科学出版社,1994.
- [2] 田耕.脉冲辐射场的电流型计数测量方法关键技术[D].西安:西北核技术研究所,2015.
- [3] 李海涛,阮林波,田耕,等.大动态范围示波器信道保护器研制[J].现代应用物理,2017,8(4):96-100.
- [4] 张凤世,于丽娟.两种示波器输入保护模式的实验探究[C].2008 计量与测试学术交流暨无线电校准技术研讨会,呼和浩特,2008.
- [5] 李金宝,阮林波,田耕,等.低噪声宽带前置放大器 ZL2009-10023217.3[P].2010-07-28.
- [6] ZHCSHX6B.TH3491 high-power CFB OP AMP[EB/OL].http://www.ti.com.2018.
- [7] JOHNSON H, GRAHAM M.高速数字设计[M].沈立,朱来文,陈宏伟,等,译.北京:电子工业出版社,2007.
- [8] 奥本海姆,谢弗.信号与系统[M].刘树棠,译.西安:西安交通大学出版社,2005.
- [9] BOGATIN E.信号完整性分析[M].李玉山,李丽平,译.北京:电子工业出版社,2005.
- [10] 高瑜宏,李俊龙.一种低压恒跨导轨对轨 CMOS 运算放大器设计[J].电子技术应用,2020,46(1):48-51,56.
- [11] 李贺,梁坤,刘敏,等.20 MHz~520 MHz 宽带功率放大器的研制[J].电子技术应用,2020(8):1-4.
- [12] AN574.Printed circuit board power delivery network design methodology[EB/OL].[2020-11-20].http://www.altera.com.
- [13] Mark Alexander.Power distribution system design—using bypass capacitors[EB/OL].[2020-11-20].http://www.xilinx.com.
- [14] 于博士.电源完整性[EB/OL].[2020-11-20].http://www.sig007.com.
- [15] 孟祥胜,车凯,栗晓峰,等.高速 PCB 电路电源完整性仿真分析[J].电子技术应用,2019,45(9):50-53.
- [16] MT-047.运算放大器噪声[EB/OL].[2020-11-20].http://www.adi.com.

(收稿日期:2020-11-20)

作者简介:

李海涛(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向:高速数据采集等。

李斌康(1966-),男,研究员,主要研究方向:脉冲射线测量。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所