

适用于探地雷达应用的低过冲平衡脉冲发生器*

刘晋伟^{1,2} 叶盛波¹ 张群英¹ 尹德^{1,2} 方广有¹

(1. 中国科学院电子学研究所 电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 设计了一种新型的超宽带 ns 级低过冲平衡脉冲发生器。该脉冲发生器包含驱动电路、雪崩三极管脉冲电路和脉冲整形电路 3 部分,驱动电路用以锐化触发脉冲;雪崩三极管脉冲电路采用独特的晶体管级联结构产生大幅度的高斯脉冲;脉冲整形电路利用并联端接电阻网络和肖特基二极管减小信号反射,最后使用巴仑产生平衡的高斯脉冲,该电路最高可以在 300 KV 脉冲重复频率下正常工作。测量结果表明,在 100 KV 脉冲重频时该脉冲发生器可以输出一对峰峰值为 230 V、前沿为 1.3 ns 的平衡脉冲,并有着极小的振铃和过冲。这些特征说明,该脉冲发生器在探地雷达应用中有着更深探测距离和更快数据处理速度的优势。

关键词: 探地雷达;超宽带;雪崩三极管;低过冲;脉冲整形电路

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Lowovershoot balanced pulse generator for GPR application

Liu Jinwei^{1,2} Ye Shengbo¹ Zhang Qunying¹ Yin De^{1,2} Fang Guangyou¹

(1. Key Laboratory of Radiation and Detection Technology, Institute of Electronics,

Chinese Academic of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A novel nano-seconds ultra-wideband (UWB) balanced pulse generator is designed and demonstrated in this paper. It contains a pulse drive circuit, an avalanche transistor pulse circuit and a pulse forming circuit. The pulse drive circuit produces a sharper trigger pulse and the avalanche transistor pulse circuit uses a novel transistor cascade construction to produce a high amplitude gauss pulse. At last, the pulse forming circuit utilizes parallel butt joint resistor network and schottky diode to eliminate the signal reflection and uses balun to produce a balanced gauss pulse. It can operate well at the pulse repetition frequency (PRF) up to 300 kHz. Measurement results are presented, which show the output of the generator are balanced pulses with peak values of 230 V at 100 kHz PRF and 1.3 ns in pulse leading edge with very small ringing and overshoot. These characters of the balanced gauss pulses are advantageous for obtaining deeper detection range and costing less data computation time when it is applied to ground penetrating radar applications.

Keywords: ground penetrating radar; ultra-wide-band; avalanche transistor; low overshoot; pulse forming circuit

0 引言

超宽带技术由于在无线电通信、雷达、精确定位、成像等领域潜在的应用前景而受到人们的日益关注。与常规无线电技术相比,超宽带技术具有抗衰落、抗干扰、容量大、速率高、功率低等突出优点。超宽带系统利用纳秒或皮秒级的窄脉冲传输数据并获取信息,因此超宽带技术也被很多学者及专家认为是无线领域具有革命性影响的技术^[1-3]。

脉冲发生器是超宽带系统的重要组成部分,窄脉冲产生技术是关键技术之一。在实际应用中,如何获得具有较

高脉冲重复频率、充足峰值功率、极低过冲以及极短脉冲上升沿或者下降沿时间的脉冲信号是现行超宽带技术发展的一个核心内容。绝大多数的脉冲发生器产生的平衡高斯脉冲信号后端跟随有不同水平的过冲,当这些脉冲信号为偶极子天线提供馈电时,其远离主脉冲的过冲容易与一定深度地下目标的回波重合,在探地雷达探测应用中掩埋微弱目标信息^[4-6]。

因此,在实际应用中,急需一种低过冲的平衡输出脉冲源。传统的脉冲发生器采用的器件是火花开关或 IGBT^[7-9],利用这样的功率半导体器件可以产生高达

10 KV的脉冲,但其稳定性差、波形一致性不好以及体积大等因素都不能满足实际实验的高要求。文献[10-13]提出了利用阶跃恢复二极管(SRD)产生窄脉冲,脉冲重频可以达到10 MHz级别,但输出幅度只有几伏,无法满足较深度的探测需求。

考虑到雪崩三极管在小型化、稳定性和快速响应等方面的优势,本文选用了基于雪崩三极管电路的脉冲发生器。文献[14-18]提出了基于Marx电路结构的脉冲发生器,常见方案是5-20个雪崩三极管级联而成,可以产生KV级甚至更高级别的脉冲,但其脉冲重复频率一般只有几KV到几十KV左右,同时振铃和过冲较大。文献[19-20]利用雪崩三极管产生脉冲并使用SRD对脉冲整形,输出幅度最高到几十伏,重复频率从几百千赫到几兆赫,但并没有考虑到产生远端过冲的原因——雪崩三极管通断时的阻抗不匹配。本文提出了一种新颖的雪崩三极管级联的结构,使用较少数量的雪崩三极管串联保证较高的重频,同时另选高耐压三极管作为雪崩管基极电压的开关,尽可能提高雪崩电流,保证在同样管子数量下更高的输出功率,最后提出了利用端接网络匹配电路的方法,极大的减小了脉冲的远端过冲。

1 系统结构设计

本文提出了一种低过冲的脉冲信号发生器,通过驱动电路锐化触发脉冲;经由雪崩三极管脉冲电路得到大幅度的高斯脉冲;最后通过脉冲整形电路变成具有极低振铃和过冲的平衡高斯脉冲,以匹配探地雷达平衡天线的需求脉冲发生器系统结构如图1所示。

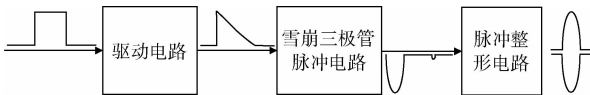


图1 脉冲发生器系统结构

2 电路设计分析

2.1 脉冲形成电路分析

本电路包含两个部分:1)驱动电路,触发脉冲输入端,用于对触发信号的整形处理;2)雪崩三极管脉冲电路,其前端电性连接至驱动电路输出端,用于将整形后的触发信转变为大幅度不平衡高斯脉冲信号。电路如图2所示。

该电路运行原理为: Q_3 、 Q_4 两个雪崩三极管属于串联连接,而 Q_1 、 Q_2 两个高耐压三极管的存在令高压电源可以输出远高于雪崩三极管 Q_3 、 Q_4 的击穿电压的电压,这样在 Q_3 、 Q_4 进入雪崩状态时,可以获得比寻常更大的雪崩电流,因此可以获得更高的脉冲输出功率。

当触发信号为低电平时,三极管 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均处于关闭状态,电源电压对充放电电容 C_1 和 C_6 充电;当触发信号为高电平时,首先整形电容 C_1 使脉冲锐化,然后利用巴仑 T_1 ,将单极性触发信号变为双极性触发信号。随后雪崩

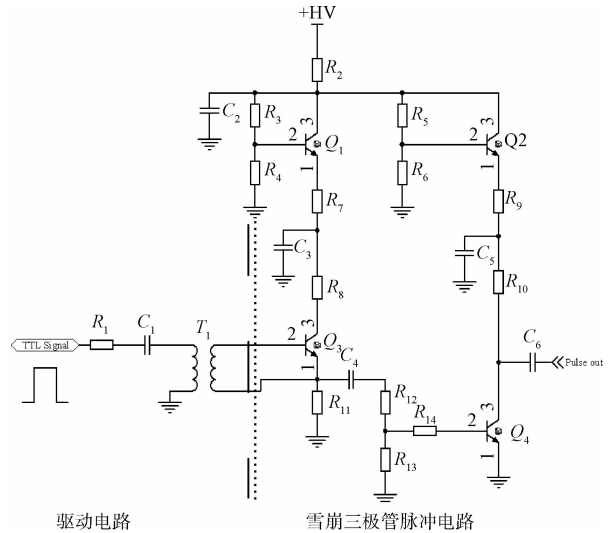


图2 脉冲形成电路

三极管 Q_3 在触发信号的作用下进入雪崩状态,此时 Q_3 的发射结导通,导致 Q_1 的发射极电压下降, Q_1 同时被导通,电流从电源通过 Q_1 、 Q_3 流向地,通过对 C_1 的充放电, Q_3 的发射极产生了正极性脉冲信号作为下一级雪崩三极管电路的驱动信号。该驱动信号经由 R_{12} 、 R_{13} 、 R_{14} 的分压网络进入到 Q_4 基极,同时使 Q_4 、 Q_2 导通并重复 Q_3 、 Q_1 的过程,两级的雪崩电流汇聚之后在负载上形成了大幅度负极性高斯脉冲信号。

2.2 脉冲整形电路分析

在对2.1中所述脉冲形成电路的测试过程中发现,该电路生成的高斯脉冲在主脉冲之后一段时间间隔上,存在过冲。在超宽带雷达地下探测应用中,直达波后的远端过冲与浅层目标回波信号混叠后,不利于目标信号的提取。

为了探究过冲产生的原因,利用微波电路仿真软件ADS对雪崩三极管的基本电路进行仿真。将晶体管的Spice参数文件导入到软件中,得到雪崩三极管的模型,仿真电路图如图3所示。

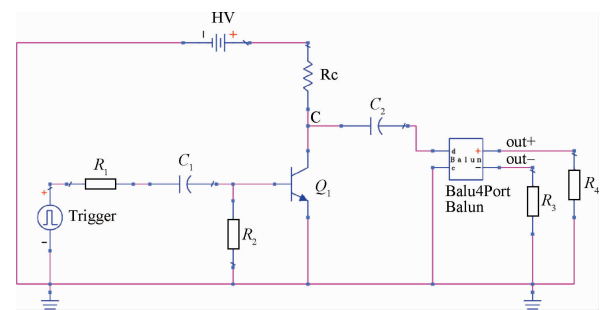


图3 基本仿真电路

仿真参数: $Q_1 = ZTX415$; $C_1 = 10 \text{ nF}$; $C_2 = 80 \text{ pF}$; $R_1 = 10 \text{ } \Omega$; $R_c = 2.2 \text{ } \Omega$; $R_2 = 27 \text{ } \Omega = 140 \text{ V}$ 。

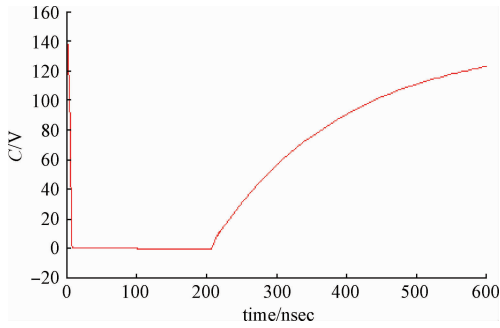


图 4 三极管集电极电压

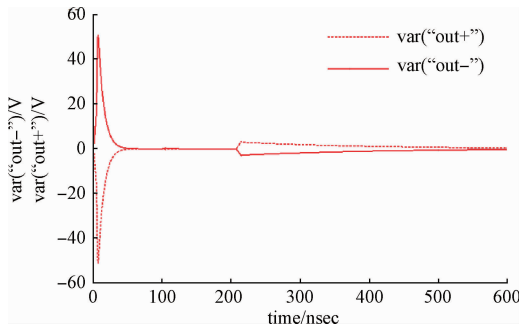


图 5 输出脉冲

如图 4、图 5 所示,过冲是在三极管雪崩状态结束时产生的。雪崩击穿过程中晶体管的阻抗是从雪崩前的高阻状态到雪崩时的负阻状态再到雪崩结束时的高阻状态的过程,因而反射会不可避免的产生,该反射就是导致过冲产生的关键原因。

为了将过冲抑制或消除,可以利用端接方案吸收过冲。端接方案一般分为两种:

1)源端接,即串联端接,将电阻串联在驱动缓冲器端实现源阻抗匹配,使源端反射系数为零从而抑制从负载反射回来的信号再从源端反射回负载端,其满足关系 $R_s + R_D = Z_0$, R_D 为源输出阻抗,如图 6 所示。

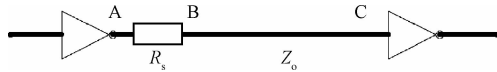


图 6 源端接示意图

2)负载端接,即并联端接,在靠近负载的位置加上拉或下拉电阻实现终端的阻抗匹配,其满足关系端接电阻 $R = Z_0$,如图 7 所示。

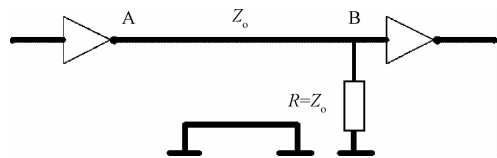


图 7 负载端接示意图

本文中选取负载端端接的方案,因为串联端接虽然只

需要一个电阻就可以完成匹配,同时对驱动高容性负载时帮助减小地弹噪声,但是由于串联了电阻,增加了 RC 时间常数,不利于高频信号通路设计;负载端端接方案设计简单易行,容易在已有电路板上操作,同时可以提高对反射电流的吸收能力,有利于过冲抑制,并加入肖特基二极管 1N4148 吸收反向过冲。对本方案进行 ADS 仿真,仿真电路图如图 8 所示。

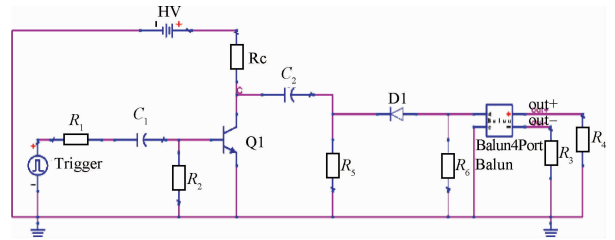


图 8 加入过冲抑制模块后的仿真电路

端接模块仿真参数: $R_5 = R_6 = 50 \Omega$; $D_1 = 1N4148$

仿真结果表明过冲抑制模块对脉冲的主要作用是抑制过冲并压缩主脉冲的脉宽和幅度。

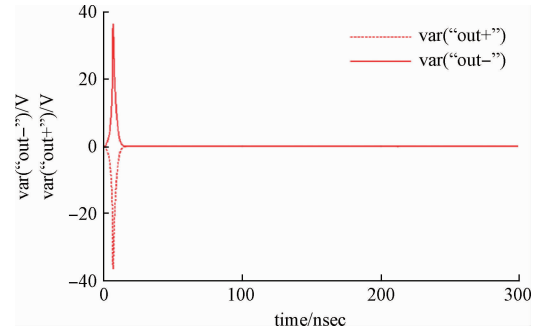


图 9 通过过冲抑制模块的波形

由图 9 可知,该过冲抑制模块对吸收产生的过冲有良好的效果,因此将其应用到本文提出的脉冲源电路中,与巴仑一起构成脉冲整形电路,电路原理图如图 10 所示。

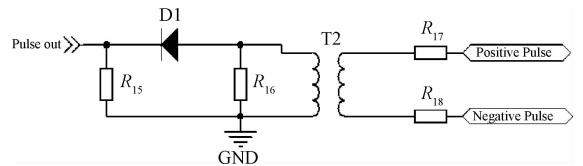


图 10 脉冲整形电路

该电路运行原理为:经由雪崩三极管脉冲电路产生的负极性高斯脉冲,通过端接电阻 R_{15} 、 R_{16} 与肖特基二极管 D_1 组成过冲抑制模块,过冲抑制后的脉冲通过巴仑 T_2 ,产生了双极性的平衡高斯脉冲信号。

3 实验结果与分析

该脉冲发生器制作在相对介电常数为 4.5,厚度为

1.6 mm的FR4环氧树脂玻璃印制电路板上,电路板尺寸为6.9 cm×3.0 cm,如图11所示。

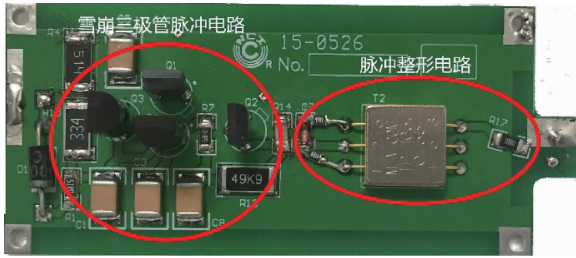


图11 脉冲源实物图

触发信号由美国泰克公司的AFG3102信号源提供,该脉冲发射机的触发信号重复频率由10 KHz到300 KHz连续可调。在平衡脉冲发射机的输出端使用采样频率为16 Gsps的Tek DSA71604C宽带示波器观察输出的脉冲波形,测量时,输出端选择50 Ω作为负载。电源供电电压为380 V,射频三极管 Q_1 、 Q_2 型号为MPSW42,其 V_{CE0} 为300 V,雪崩三极管 Q_3 、 Q_4 型号为ZTX415,其 V_{CE0} 为260 V。

当不接入过冲抑制模块时,放大后显示的波形如图12所示;当接入过冲抑制模块后,放大后显示的波形如图13所示。

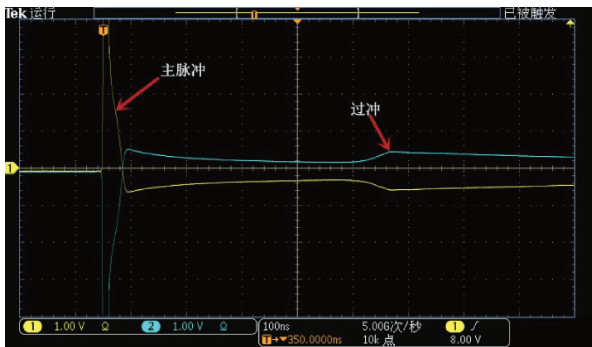


图12 过冲波形图

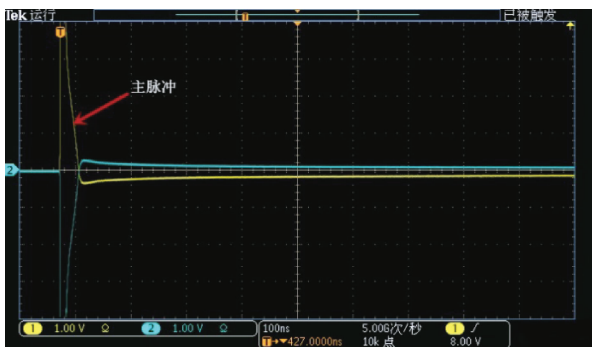


图13 无过冲波形图

图12与图13的对比表明,当加入过冲抑制模块后,时窗较远处的过冲被完全抑制,只剩下距离主脉冲很近的微小过冲,其经过天线的高通滤波作用,不会在辐射后端引起

振荡,不影响实际探测效果,仿真方案较为符合实际情况,同时波形振铃水平极低,拖尾极小,性能符合设计要求。

当PRF为100 KV时,脉冲源输出的完整波形如图14(a)所示;当PRF为300 KV时,脉冲源输出的完整波形如图14(b)所示。



(a) PRF=100 kHz



(b) PRF=300 kHz

图14 低过冲脉冲源在不同PRF下的输出波形

低过冲平衡脉冲源在不同重复频率下输出波形如图14所示,其前沿时间、后沿时间、脉冲宽、以及峰值幅度如表1所示。当PRF为100 KV时,脉冲源输出的完整波形如图14(a)所示;输出纳秒级脉冲信号正负脉冲电压值分别为+115.3 V和-117.5 V,脉冲前沿均为1.3 ns,后沿均为6.3 ns,脉冲半高宽分别为4.1 ns;当PRF为300 KV时,脉冲源输出的完整波形如图14(b)所示,输出纳秒级脉冲信号正负脉冲电压值分别为+96.3 V和-98.6 V,脉冲前沿均为1.3 ns,后沿均为6.3 ns,脉冲半高宽均为4.1 ns,对应的归一化频谱如图15所示,其-10 dB带宽为150 MHz。可知,当脉冲信号重频提高,输出脉冲幅度减小1.5 dB,但脉冲宽度不变,适用于对重复频率要求较高的脉冲雷达系统。

表1 脉冲发射机输出脉冲波形的参数

PRF/kHz	极性	t_r /ns	t_f /ns	τ_p /ns	V_{pp} /V
100	正脉冲	1.3	6.3	4.1	+115.3
	负脉冲	1.3	6.3	4.1	-117.5
300	正脉冲	1.3	6.3	4.1	+96.3
	负脉冲	1.3	6.3	4.1	-98.6

由以上测试结果得知,利用该脉冲发生器电路,可以获

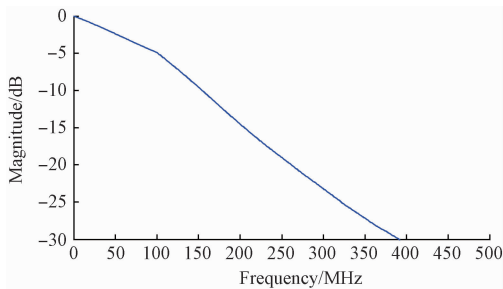


图15 峰值归一化的输出脉冲频谱图

得极低振铃和过冲的窄脉冲信号。实测得到的脉冲波形对称性好、脉冲重频高、过冲小、幅度大,符合预期设计要求。

4 结 论

本文提供了一种高脉冲重频、低过冲的纳秒级脉冲信号发生器,利用新颖的雪崩三极管级联结构产生更高幅度和重复频率的脉冲。该脉冲发生器产生一对前沿1.3 ns,后沿相对平缓的脉冲,输出幅度在100 KV脉冲重频下可达到230 V,且最高可在300 KV脉冲重频下正常工作。本文中利用端接匹配的技术削弱过冲的幅度,且振铃极小,可以匹配探地雷达天线。该脉冲发生器具有很好的实用价值:1)具有较高的脉冲重复频率,有效增加了雷达的数据处理效率。2)具有极低的过冲,大大加强了雷达对微弱目标回波的识别能力。3)结构简单、布局紧凑,只需要一个统一的高压电源管理模块就可以实现供电,适合雷达的小型化生产。因此,该脉冲发生器非常适合应用在各种用途的探地雷达系统应用中。

参考文献

- [1] 许会, 任建, 李邦宇, 等. 应用于超宽带呼吸检测的压缩感知算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 56-62.
- [2] 赵丽丽, 王莉, 苏丽娜, 等. 浅谈超宽带无线通信技术的发展[J]. 数字技术与应用, 2011(3): 31.
- [3] 韩江安, 马凯学. 微波高功率固态放大器技术综述[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2017(1): 8-14.
- [4] 夏新凡, 刘丽华, 张群英, 等. 一种新颖的适用于探地雷达应用的平衡脉冲发生器[J]. 微波学报, 2016, 32(2): 25-29.
- [5] 夏涛, 吴云峰, 王胜利, 等. 基于功率 MOSFET 的高压纳秒脉冲源研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1852-1861.
- [6] 邹晓兵, 朱宏林, 曾乃工, 等. 纳秒级高压快脉冲发生器的研制[J]. 高电压技术, 2011(3): 787-792.
- [7] 毛志国, 邹晓兵, 刘锐, 等. 一种 10 kV 方波电压发生器[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 41-44.
- [8] 熊兰, 杨子康, 胡国辉, 等. 一种采用全固态开关的高

- 压双极性脉冲源[J]. 电机与控制学报, 2015(9): 73-80.
- [9] 朱太云, 师晓岩, 李舟, 等. 模块化全固态高压 ns 脉冲开关技术[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 76-78.
- [10] LIU L H, XIA X F, YE SH B, et al. Development of a novel, compact, balanced, micropower impulse radar for nondestructive applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 855-863.
- [11] 高云泽, 叶盛波, 张晓娟, 等. 基于电磁感应和超宽带雷达的新型探测系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 128-134.
- [12] Greg Jue, Sangkyo Shin. 灵活的 5G 波形及超宽带信号生成和分析测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 16-21.
- [13] JIANG SH Y, GAO T CH, LIU X CH. The simulation and error analysis of raindrop size distribution obtained by micro rain radar [J]. Instrumentation, 2015(3): 43-54.
- [14] 周星, 赵敏, 范丽思, 等. 基于 Marx 电路的小型电磁脉冲发生器[J]. 高电压技术, 2013, 39(10): 2403-2408.
- [15] 赵敏, 王庆国, 周星, 等. 高稳定度全固态脉冲源的优化设计与评估[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 1015-1020.
- [16] 杨清熙, 王庆国, 周星, 等. 固态快前沿双指数脉冲源设计与仿真[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 237-241.
- [17] YUAN X L, DING ZH J, YU J G, et al. Research on high stability pulser based on avalanche transistor Marx circuit [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 757-760.
- [18] 李江涛, 钟旭, 薛静, 等. 全固态模块化 MARX 电路及脉冲同步叠加设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 228-234.
- [19] XIA X F, LIU L H, YE SH B, et al. Balanced impulse radar system for ultra-wideband (UWB) applications[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2014, 7(2): 145-148.
- [20] XIA X F, LIU L H, GUAN H F, et al. Balanced pulse generator for ultra-wideband radar application[J]. Electronics Letters, 2013, 49(4): 293-295.

作者简介

刘晋伟, 1993年生, 中国科学院电子学研究所读硕士研究生, 主要研究方向: 探地雷达收发技术研究。

E-mail: eeeljw@163.com

叶盛波, 1983年生, 中国科学院电子学研究所副研究员, 主要研究方向: 超宽带雷达系统、探地雷达研制、雷达信号处理方法研究。

张群英, 1972年生, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 微波探测新方法研究、超宽带雷达系统、雷达信号处理。