

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108097

一种应用于脉冲探地雷达前端的探测子系统

葛津津 周浩 凌天庆
(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 高幅度窄脉冲时域脉冲信号源及超宽带低振铃时域脉冲天线是脉冲探地雷达(GPR)的关键部件。通过挖槽技术有效的减少了电磁辐射干扰,设计并研制了脉冲幅度为 156.2 V,脉冲宽度为 1.6 ns 的 MARX 级联脉冲信号源。同时首次提出了半圆形天线臂电阻加载天线,相比于传统三角形天线臂电阻加载天线,0.5~7 GHz 带宽内驻波系数控制在 3.5 以内,天线时域脉冲的拖尾幅度由 17.5% 下降到 8.3%,具有超宽带、低振铃的特点。最终开展了隐藏目标的探测实验,雷达探测结果成像清晰、浅层目标分辨率高,有力地验证了本文所研究的脉冲探地雷达前端探测子系统的优越性能及潜在的使用价值。

关键词: 脉冲探地雷达;脉冲信号源;半圆形天线臂;电阻加载

中图分类号: TN957.2 **文献标识码:** **国家标准学科分类代码:** 510.70

Design of pulse ground-penetrating radar front-end detecting subsystem

Ge Jinjin Zhou Hao Ling Tianqing
(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: High magnitude, narrow pulse time domain pulse signal sources and ultra-wide band, low later-time ring time domain pulse antennas are the important components of the pulse ground-penetrating radar. The electro-magnetic interference can be decreased by using ducking technology. High amplitude time domain pulse signal sources with 156.2 V pulse amplitude, 1.6 ns pulse width are designed. Besides this, a novel UWB time domain pulse antenna with semi-circle arms has been proposed. Compared to the traditional bow-tie antenna with triangular arms, the VSWR of the UWB time domain pulse antenna is less than 3.5 from 0.5~7 GHz. And the later-time ring decreased from 17.5% to 8.3%. Lastly, an experiment for detecting the buried targets is carried out using the integrated radar system, the experiment demonstrated high resolution ratio especially for shallow targets. Superior performances and huge value of the pulse ground-penetrating radar front-end detecting subsystem designed in this thesis have been further verified.

Keywords: pulse ground-penetrating radar; pulse signal source; semi-circle antenna arms; resistive loading

0 引言

超宽带窄脉冲信号源是探地雷达探测子系统的关键部件之一,相关的研究一直得到广泛关注^[1-8]。利用 Marx 级联电路,在提供较高的电源电压时,能产生纳秒级的上升时间,千伏级窄脉冲幅度的脉冲。文献[1]设计了一种基于雪崩二极管的两级 Marx 脉冲产生电路,得到了底宽 3.3 ns,峰峰值 70 V 左右的负脉冲。文献[2]采用了驱动电路用以锐化触发脉冲以及晶体管子级联结构产生大幅度的高斯脉冲,并利用并联端接电阻网络和肖特基二极管减小信号反射,在 100 kV 脉冲重频时可以输出一对峰峰值为 230 V、

前沿为 1.3 ns 的平衡脉冲。2017 年张岩松等^[3]提出了一种基于场效应管和阶跃恢复二极管相结合的皮秒级脉冲源设计方案,设计制作了幅度可达百伏级的皮秒级脉冲源。文献[4]针对负载阻抗的多样性,研制了一种基于 MARX 和直线型变压器驱动源拓扑的复合模式脉冲源,可以降低对隔离电源模块、触发同步性的要求,负载适应能力强。文献[5]设计了一种基于功率金属氧化物半导体场效应晶体管的高压脉冲电源,搭建了高速场效应管串联的脉冲发生器实验装置,在 500 Ω 负载上获得前沿小于 5 ns、幅度大于 10 kV、脉宽约 100 ns、瞬态频率达 400 kHz 的高压脉冲。

收稿日期:2021-10-14

目前,随着半导体技术的迅猛发展,对脉冲信号源的发展起到了巨大的推动作用。但是在脉冲探地雷达前端探测系统中,脉冲产生电路与超宽带天线的匹配与集成问题仍然是目前脉冲信号源发展的瓶颈。

时域脉冲超宽带天线作为脉冲探地雷达探测系统另外一个关键部件,也得到了广泛的关注和研究^[9,13]。文献[9]提出了一种双扭线辐射臂平面印制天线,采用阻性加载技术有效拓展了天线带宽、降低了时域振铃,并实现了便携式探地雷达的工程化应用;在文献[10]中,利用半椭圆天线臂并通过分布式连续电阻加载有效地改善了输入阻抗特性,拓宽了天线的工作带宽。2017年,尹德等^[11]采用指数渐变结构及加载技术,对超宽带 TEM 喇叭天线进行了设计和优化,并最终应用于高速公路探地雷达,取得了较好的效果。

本文通过分析脉冲叠加原理,采用印制板挖空及金属腔体挖槽技术有效地减少 PCB 板上的电磁辐射干扰,实现了高幅度窄脉冲 MARX 级联脉冲信号源设计。同时首次提出了半圆形天线臂电阻加载超宽带天线,驻波系数在 0.5~7 GHz 带宽内控制在 3.5 以内,天线时域脉冲的拖尾幅度控制到了 8.3%,实现了超宽带、低振铃的特性。最终通过地下目标探测实验,进一步验证了本文研制的探地雷达前端子系统潜在的应用价值。

1 脉冲信号源设计与验证

1.1 脉冲叠加原理

在文献[14]中给出了脉冲幅度及脉冲宽度的不同定义方式,本文采用脉冲的上升沿和下降沿在 10% 峰值幅度位置时所对应的时间长度来定义脉冲宽度,它决定了信号频谱分量的丰富程度,是探地雷达系统探测分辨率的重要指标。本文中所提到的脉冲幅度均指电压的峰峰值,单位为伏特。脉冲幅度是探测系统灵敏度决定因素,是决定探地雷达系统探测深度的关键指标。

本文通过采用 MARX 级联电路来实现高脉冲幅度。如图 1 所示为两个等幅等脉宽脉冲不同延时情况下的叠加情况。由图 1(c)可知,在最理想的情况下,脉冲宽度不改变的情况下,脉冲幅度达到了原始脉冲的 2 倍。由此可见级联电路的级间延迟时间 Δt 是影响脉冲宽度的关键因素,且级数越多,影响越大,因此,在设计电路时电子元器件的空间布局需要重点考虑。

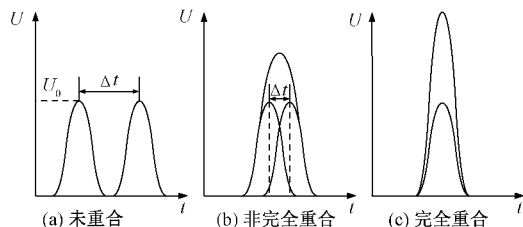


图 1 脉冲叠加原理

本文选用 PCB 制作软件 Altium designer 进行 PCB 绘制,图 2 所示为 MARX 级联电路的 PCB 版图。

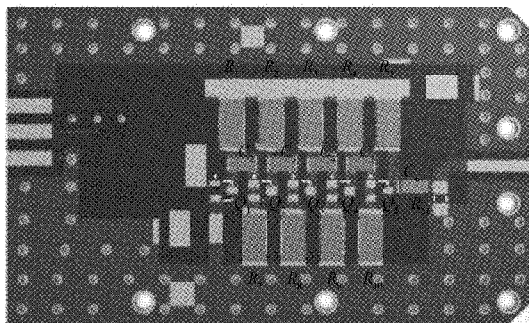


图 2 MARX 级联电路 PCB 版图

考虑到脉冲产生电路是高频高速电路,为了减少元器件之间的电磁干扰,本文对 PCB 板焊接电阻的底部做了挖空处理,同时在金属腔体对应的部分进行挖槽处理。通过破坏印制板表面的电磁环境来有效地减少 PCB 板上的电磁辐射干扰。

1.2 MARX 级联电路设计与验证

本文测试采用实时带宽达 6 GHz 的 LeCroy wave pro 7Zi 数字滤波器,以保证尽量大的带宽。图 3 所示为雪崩晶体管 MARX 级联电路实物图。

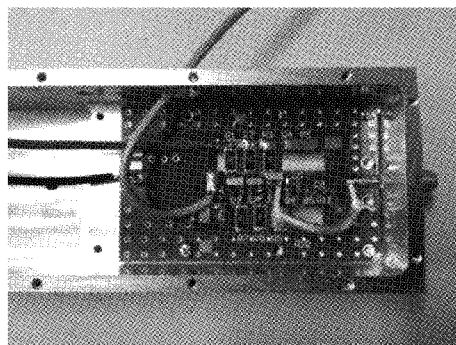


图 3 MARX 级联电路实物图

为了确保测试安全性,这里测试加入了 60 dB 的衰减器。图 4 所示为多级雪崩管的脉冲产生电路输出结果,输出脉冲的幅度测试值达到了 156.2 mV,由于 60 dB 的衰减,实际脉冲幅度为 156.2 V,脉冲宽度为 1.6 ns。测试结果表面,元器件之间的电磁干扰得到了有效控制,脉冲波形保持较好。

2 时域超宽带天线仿真与设计

2.1 时域超宽带天线概述

1965年,Wu 和 King 提出了一种沿天线臂无反射电阻分布加载的天线,该天线采用坡变电阻,从馈电端口开始到天线末端,电阻加载量按一定的规律增大。理想情况下,天线末端的电阻加载量接近无穷大,此时天线的电流近似呈现行波分布。本文设计的时域超宽带天线同样采用加载电

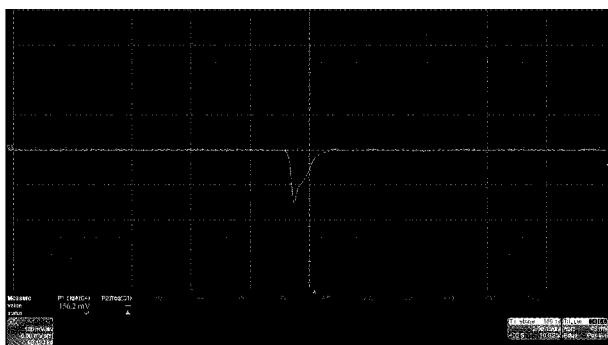


图4 MARX级联电路输出结果

阻的方式,阻值从馈电端到天线臂末端电阻逐渐增大。从而使天线的主要辐射场波形在天线前部就形成,以减小能量损耗。本文电阻加载的蝶形天线示意图如图5所示,电阻的加载量 R 按照式(1)计算得到^[14]。

$$R(l) = \frac{60\psi}{a - |l|} \quad (1)$$

其中, $\psi = 2\ln \frac{2a}{b} - 3$ 。

图5中, l 为电阻加载的位置到天线馈电点的距离, $R(l)$ 为 l 处的电阻阻抗值, b 是电阻加载的位置处天线臂的宽度, a 是天线臂的长度。

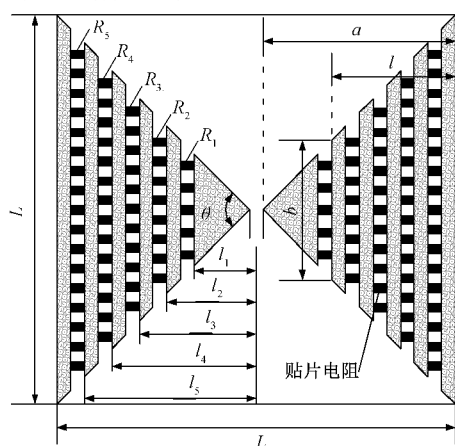


图5 蝶形天线电阻加载示意图

2.2 改进型背腔式电阻加载蝶形天线

本文则采用了改进后的半圆形天线臂,如图6所示,半圆形天线臂可以拓宽天线臂末端的宽度,并且进一步缩小横向尺寸,电流的路径更长变化更缓慢,从而达到更好的宽带匹配性能^[15]。

本文所设计的蝶形天线尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 基材为相对介电常数为 4.4 的 FR-4。设计的工作带宽为 $0.5 \sim 7 \text{ GHz}$,如图6所示为改进后的蝶形天线外形示意图。每一个天线臂上共开有五条宽度为 1.5 mm 的缝隙,缝隙 A_1, A_2, \dots, A_5 加载的总电阻分别对应为 R_1, R_2, \dots, R_5 。按照式(1)计算得到相应的加载电阻的阻值,每个缝

隙都采用均匀并联 0805 封装的贴片电阻来实现电阻的加载,具体电阻加载量如表1所示。

表1 改进型电阻加载蝶形天线电阻加载量

缝隙编号	缝隙位置/ mm	电阻加载量/ Ω	贴片电阻 阻值
Δ_1	20	3.1	$39 \Omega \times 13$
Δ_2	25	5.0	$62 \Omega \times 13$
A_3	30	7.7	$120 \Omega \times 16$
A_4	35	12.5	$240 \Omega \times 21$
A_5	41	24.7	$560 \Omega \times 23$

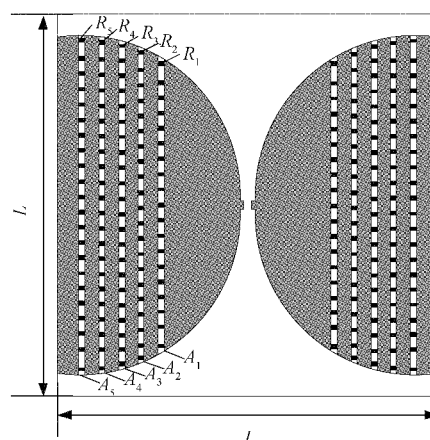


图6 改进型电阻加载蝶形天线外形示意图

改进型电阻加载蝶形天线利用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 15.0 中进行先期的优化仿真。

图7针对不同形状天线臂梯形背腔天线,对 VSWR 仿真结果进行了对比,实线为传统三角形天线臂背腔天线的驻波系数曲线,虚线为改进后半圆形天线臂背腔天线的驻波系数曲线,通过对比看出,改进后的背腔天线的驻波系数在频率 $0.5 \sim 3.5 \text{ GHz}$ 范围内要明显优于传统三角形天线臂背腔天线,而且改进后的背腔天线的驻波系数在整个带宽内都控制在 3.5 以内,这意味着改进后的天线在整个带宽内具有较好的辐射性能。

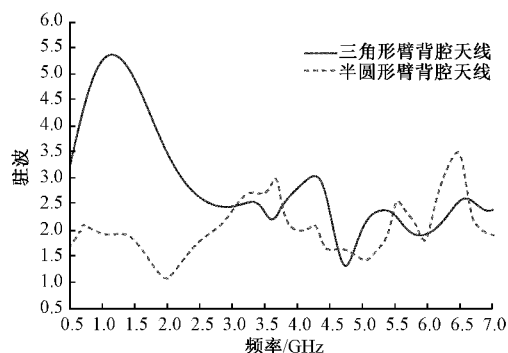


图7 VSWR 仿真结果比较

2.3 背腔式电阻加载蝶形天线的时域仿真与分析

时域信号的拖尾特性是衡量时域超宽带天线性能的一个重要指标。这里采用基于时域有限差分法 (finite-integral time-domain, FITD) 的电磁仿真软件 CST MICROWAVE STUDIO, 来研究时域超宽带天线的信号拖尾性能。

本文分别对三角形及半圆形天线臂梯形背腔天线做了仿真以验证改进型天线的信号拖尾性能, 采用高斯脉冲进行激励, 比较接收到的时域波形情况。

由图 8 仿真结果看出, 改进后的梯形背腔天线做收发时, 接收信号的主脉冲幅度为 2.51×10^{-2} V, 最大的拖尾脉冲峰值为 2.45×10^{-3} V, 脉冲拖尾幅度为 9.8%; 同样对于传统三角形天线臂梯形背腔天线做收发时, 接收信号的主脉冲幅度为 2.82×10^{-2} V, 最大的脉冲拖尾峰值为 4.37×10^{-3} V, 脉冲拖尾幅度为 15.5%; 相比而言, 改进后的梯形背腔天线的脉冲拖尾幅度得到了明显的抑制, 天线臂做成半圆形之后, 电流的流经路径变长, 因此拖尾得到了更好地抑制, 改进后的天线对信号的保形性有明显提升作用。

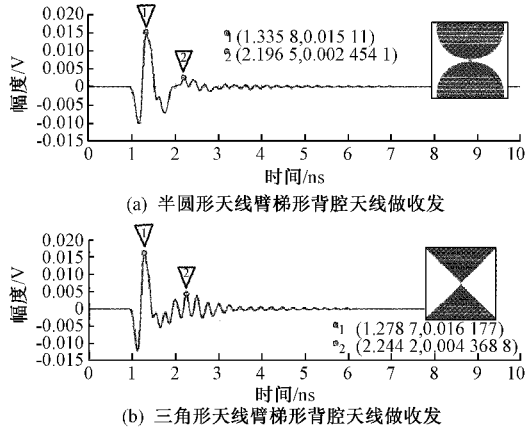


图 8 不同天线臂背腔天线接收时域波形

2.4 背腔式电阻加载蝶形天线测试

背腔式电阻加载蝶形天线的实物图如图 9 所示。图 10 所示为三角形天线臂背腔天线和半圆形天线臂背腔天线的驻波系数测试结果做了对比。

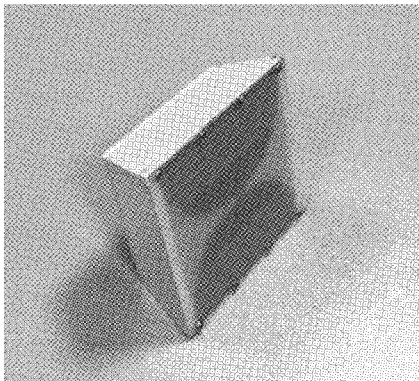


图 9 背腔式电阻加载蝶形天线实物图

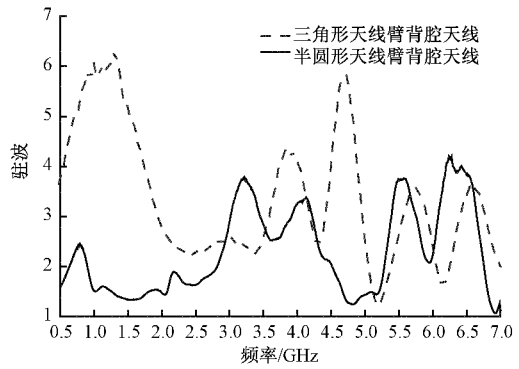


图 10 不同天线臂时天线驻波测试结果

测试结果看出改进后的天线的驻波系数整体要更平坦且带宽内基本控制在 4 以内, 尤其在低频和中频部分较为明显, 这也就意味着改进后的天线具备更好的辐射性能。

改进后的天线的辐射特性进行测试, 测试的主要指标是方向图。图 11 所示为天线的辐射方向图, 分别对频点 1、3、5、7 GHz 进行测试, 图 11(a)~(d) 分别对应频率 1、3、5、7 GHz。图中短虚线和点虚线分别对应 E 面和 H 面方向图测试结果, 虚线和实线分别对应是 E 面和 H 面方向图仿真结果。

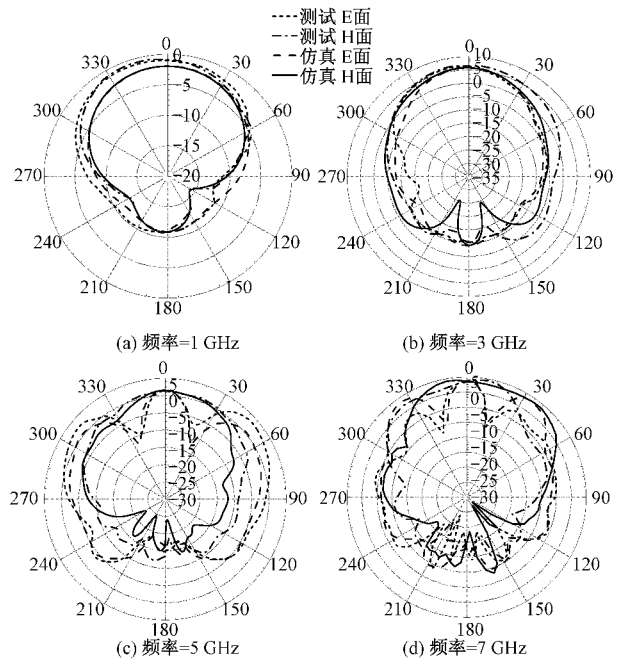


图 11 方向图仿真与测试结果

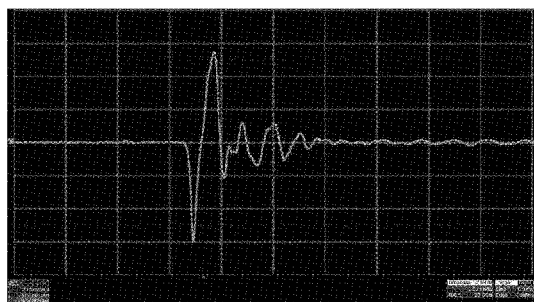
由图 11 可以看出, 方向图的测试结果和仿真结果曲线走势比较吻合的, 且具有较好的单向辐射性, 可更好地应用于探地雷达领域。

3 探测子系统测试与综合实验

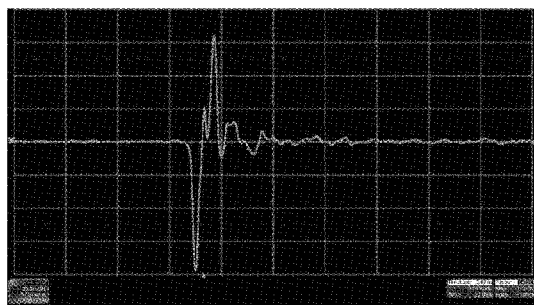
3.1 时域脉冲拖尾验证

本文所设计的脉冲信号源和超宽带时域天线应用到了探地雷达前端探测子系统中,从而验证两者之间的性能匹配度。

由图 12 天线直耦信号测试结果可知,在输入脉冲信号相同的前提下,改进前的天线直耦信号脉冲幅度约为 114 mV,最大拖尾脉冲峰值约为 20 mV;而改进后的天线直耦信号脉冲幅度约为 144 mV,最大拖尾脉冲峰值约为 12 mV,前者的脉冲拖尾幅度为 17.5%,后者的脉冲拖尾幅度为 8.3%,从测试结果可以看出,前者的波形在经历最大拖尾脉冲后,还经历了两次较大幅度的拖尾才趋于平缓;而后者的波形在经历最大拖尾脉冲后,只经历一次较小幅度的拖尾就趋于平缓了,这比前者提前了将近 2 ns,因此改进之后的天线脉冲拖尾幅度得到了大幅的提升。



(a) 三角形天线臂背腔天线



(b) 半圆形天线臂背腔天线

图 12 不同天线臂背腔天线直耦信号测试结果

3.2 金属目标探测实验

最后通过沙坑埋藏目标探测实验来进一步验证本文所设计的探地雷达前端子系统的探测性能。

图 13 所示为沙坑埋藏目标探测的示意图。收发天线置于木板上,木板厚度约为 1 cm,木板与沙坑表面的距离为 25 cm,探测金属实物深度为 15 cm。

本文选用尺寸 18 cm×18 cm(目标 1)和 8 cm×8 cm(目标 2)的金属板作为目标进行探测,埋藏深度及位置保持不变。实验结果如图 14 所示。

从实验结果可以看到一条中间颜色深两边颜色浅的弧线,通过图 14(a)和(b)的对比,可以发现目标 2 弧线的颜色

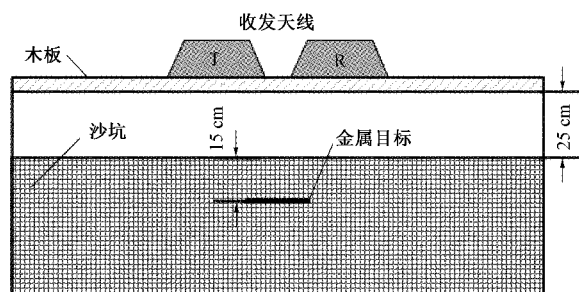


图 13 沙坑实物探测示意图

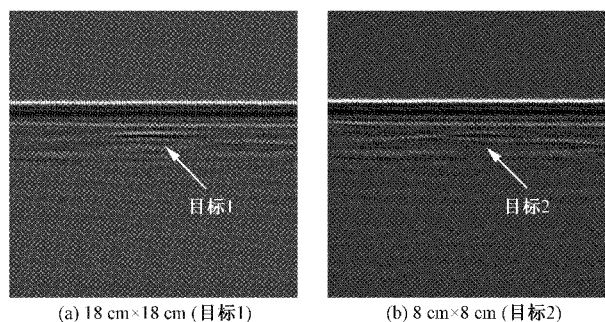


图 14 沙坑中金属目标探测结果

相比于目标 1 要来的浅,以及整体弧线长度相对要短,这是由于目标 2 的尺寸较小,对应的雷达散射截面也相对较小,在实验结果中表现出来的就是较浅的颜色及较短的长度。

4 结 论

本文通过分析论证脉冲信号源幅度及脉宽的影响因素,设计并研制了脉冲幅度为 156.2 V,脉冲宽度为 1.6 ns 的 MARX 级联脉冲信号源,同时提出了一种新型的半圆形天线臂电阻加载背腔天线,相较于传统的三角形天线臂电阻加载背腔天线,本文所设计的天线在 0.5~7 GHz 的工作带宽内驻波系数更加平坦,低、中频的驻波得到了更好地控制,同时也具备良好的辐射性能;更重要的是,天线时域脉冲的拖尾幅度由 17.5%下降到 8.3%。最后通过沙坑的金属目标探测实验进一步验证了本文所设计脉冲信号源及超宽带时域天线的工作匹配度,充分证明了本文所研究的脉冲探地雷达前端探测子系统的优越性能及巨大的应用价值。

参考文献

- [1] 何兴坤,钱鹏程. 基于雪崩三极管的脉冲发生器设计[J]. 电子测量技术,2019,42(21):65-69.
- [2] 刘晋伟,叶盛波,张群英,等. 适用于探地雷达应用的低过冲平衡脉冲发生器[J]. 电子测量技术,2017,40(8):58-62.
- [3] 张岩松,张亚东,梁步阁,等. 基于场效应管与阶跃恢复二极管的皮秒级脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束,2017,29(4):045001.
- [4] 王昌金,姚陈果,董守龙,等. 基于 Marx 和 LTD 拓扑的全固态复合模式脉冲源的研制[J]. 电工技术学报,

- 2018,33(13):3089-3097.
- [5] 石小燕,任先文,刘平,等.基于 MOSFET 的高重复频率高压脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束,2019,31(4): 040022.
- [6] 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(12): 1852-1861.
- [7] 许会,牛长富,李邦宇,等.新型纳秒级探地雷达脉冲源设计[J]. 仪器仪表学报,2011,32(11):2449-2454.
- [8] 胡爱民.一种快速边沿方波脉冲源的设计方法[J]. 国外电子测量技术,2014,33(10):59-61.
- [9] 王友成,张锋,纪奕才,等.探地雷达阻性加载天线的研究[J]. 电波科学学报,2016,31(3):516-521.
- [10] 李雪萍,闫静,周永一,等.电阻加载半椭圆偶极子天线的研究与设计[J]. 强激光与粒子束,2017,29(2):023202.
- [11] 尹德,叶盛波,刘普伟,等.一种用于高速公路探地雷达的新型时域超宽带 TEM 喇叭天线[J]. 雷达学报,2017,6(6):611-617.
- [12] 张彦婷,林文斌,唐晋生.用于探地雷达的超宽带单极子天线设计[J]. 电子测量技术,2019,42(15):65-68.
- [13] 吴秉横,纪奕才,方广有.带反射腔的分布式电阻加载探地雷达天线设计与分析[J]. 雷达学报,2015,4(5): 538-544.
- [14] 杨德强.隐藏目标时域多信道探测系统新技术研究[D]. 成都:电子科技大学. 2012.
- [15] GE J, JIN L. A compact multiband bow-tie dipole slot antenna for WLAN and WiMAX applications [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2015, 56: 17-23.

作者简介

葛津津,工程师,主要研究方向为电磁场与微波技术。

E-mail:gejinjin0716@163.com

周浩,高级工程师,主要研究方向为电磁场与微波技术。

E-mail:zhouhao11@cetc.com

凌天庆,研究员,主要研究方向为微波网络、微波器件和微波系统架构。

E-mail:lingtianqing@sina.com