

文章编号: 1001-2486(2010)04-0116-05

# 用于超宽带引信目标回波模拟的窄脉冲电路设计\*

王全民, 王春财, 郭刚, 黄柯棣

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**超宽带引信目标回波模拟器是对超宽带引信进行成批、快速测试的有效手段, 而超宽带窄脉冲产生电路的设计是其关键技术之一。目前的窄脉冲产生电路多是针对高斯脉冲或者双极高斯脉冲所设计, 不能直接用于回波模拟器窄脉冲的产生。在球形目标回波假设的前提下, 提出了一种使用阶跃恢复二极管(SRD)和超宽带滤波器联合设计产生二阶高斯脉冲信号对引信回波进行模拟的方法。通过仿真确定了 SRD 电路参数、超宽带滤波器的性能指标及其尺寸, 根据仿真结果实现了窄脉冲产生电路。测量结果表明, 所产生的窄脉冲信号波形与理论波形基本一致。

**关键词:**超宽带引信; 测试; 目标回波模拟; 阶跃恢复二极管; 超宽带滤波器

中图分类号: TN702 文献标识码: A

## Design of Impulse Generation Circuit for Ultra-wideband Fuze Target Return Simulation

WANG Quan-min, WANG Chun-cai, GUO Gang, HUANG Ke-di

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Ultra-Wideband (UWB) fuze return signals simulator is an effective way for efficient and quick testing of UWB fuzes. The circuit for UWB impulse generation is one key element of the simulator. Current impulse generators are mainly designed for Gaussian pulse or Gaussian doublet, which cannot be used in the simulator directly. Based on sphere target assumption, the current research presented a circuit that can generate second order Gaussian impulse for fuze return signal simulator, using step recovery diode and UWB filter co-design. Parameters of SRD circuit and UWB filter were determined by simulation. According to simulation results, a impulse circuit was fabricated and measured. The measured results coincide with theoretical second order Gaussian signal.

**Key words:** ultra-wideband fuze; testing; target return simulation; step recovery diode; ultra-wideband filter

超宽带引信利用发射和接收超宽带窄脉冲来探测目标, 在军事武器系统和民用安防系统中得到广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。目前已经有成熟可用的超宽带引信系统<sup>[2]</sup>, 但是在研制、生产、检测等过程中所需要的系统级测试手段不够完备, 现有的测试过程一般采用电路指标测量以及人工产生回波等方式, 效率和自动化程度都很低。研制超宽带引信目标回波模拟器, 使用信号模拟的方式可以成批、快速地测试引信, 提高研制和生产效率。

超宽带信号具有极窄的脉宽和极宽的频率范围, 其产生电路的设计是超宽带引信目标回波模拟器的关键技术之一<sup>[1,4,7]</sup>。阶跃恢复二极管(SRD)以其低成本、易用性等优点在窄脉冲产生电路中得到广泛应用<sup>[3,8-9]</sup>。目前超宽带窄脉冲电路都是针对高斯脉冲或者双极高斯脉冲所设计的, 其产生的信号不能直接用于模拟超宽带目标回波。超宽带带通滤波器能够通过控制信号频谱得到期望的信号时域波形<sup>[4,7]</sup>, 但是其设计具有一定的挑战性, 是目前超宽带领域研究的热点之一<sup>[11-13]</sup>。

根据球形目标的超宽带回波特性和窄脉冲产生电路的期望输出波形, 设计了一种二阶高斯超宽带脉冲电路, 此电路由 SRD 窄脉冲产生电路和超宽带滤波器电路组成。SRD 电路以阶跃恢复二极管为核心器件, 超宽带滤波器使用低通滤波结构和带通滤波结构级联实现, 具有较好的通带特性。通过仿真确定电路的参数和滤波器性能指标及其尺寸, 得到了脉冲宽度为 240ps, 幅度为 1.1V 的二阶高斯超宽带

\* 收稿日期: 2010-03-05

作者简介: 王全民(1980-), 男, 博士生。

脉冲信号。实际测量结果和仿真结果符合得较好。

## 1 超宽带引信回波信号简化模型

超宽带引信的窄脉冲产生器所产生的信号为高斯脉冲<sup>[2-3]</sup>, 其时域波形为

$$y(t) = -\frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-t_c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

其中  $A$  为幅度因子,  $t_c$  为峰值时间,  $\sigma$  为波束成形因子。

由于超宽带天线的微分作用<sup>[7]</sup>, 在天线处所发射的脉冲信号为高斯信号的一阶导数。为了简化目标回波特性分析, 假设目标为球形, 使用文献[6]中的实验结果建立回波信号模型, 在接收天线输出端的回波信号可以用高斯函数的四阶导数近似, 因此, 引信目标模拟器窄脉冲产生电路输出的波形应为高斯函数的二阶导数, 其时域波形为

$$y^{(2)}(t) = A' \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} - \frac{(t-t_c)^2}{\sqrt{2\pi}\sigma^5} \right] \exp\left[-\frac{(t-t_c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

其中  $A'$  为幅度因子,  $t_c$  为峰值时间,  $\sigma$  为波束成形因子。

## 2 SRD 窄脉冲产生电路

SRD 窄脉冲产生电路使用阶跃恢复二极管产生高斯脉冲。SRD 的特性与普通二极管不同, 是一种非线性特性很强的器件, 普通二极管正向导通反向截止, 而阶跃恢复二极管从正向激励电压切换到负向激励电压时, 继续有很大的反向电流通过, 直到某一时刻才迅速截止, 形成很陡峭的阶跃电压, 产生窄脉冲<sup>[3,8-9]</sup>。

使用 ADS(Advanced Design System 2008) 软件对窄脉冲产生电路仿真, 要获得可信的仿真结果, 须建立较精确的 SRD 器件模型。ADS 中现有的二极管模型不能直接用于 SRD 的仿真, 需要针对所使用 SRD 器件的特性建立其模型。SRD 的小信号模型如图 1 所示<sup>[10]</sup>,  $C_f$  和  $C_r$  分别表示二极管的前向电容和反向电容,  $R_s$ 、 $C_p$  和  $L_p$  分别是二极管的封装寄生电阻、寄生电容和寄生电感,  $C_j$  和  $R_j$  表示 SRD 的 pn 结。SRD 使用 Skyworks 公司的 CVB1031, 其 pn 结少子寿命为 20ns。在不同的直流偏置点对 SRD 进行 S 参数测量, 得到其寄生参数曲线, 得到的结电感和结电阻使用文献[10]中的方法通过 ADS 的 SDD(符号定义器件) 建模。

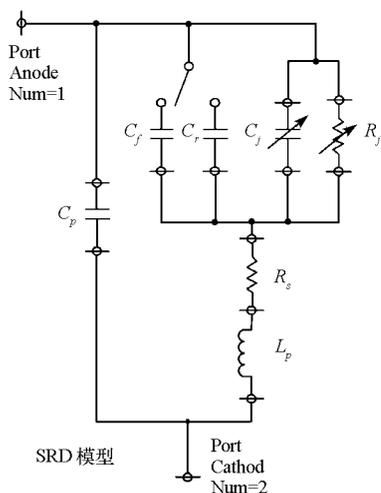


图 1 阶跃恢复二极管模型  
Fig. 1 SRD model for ADS

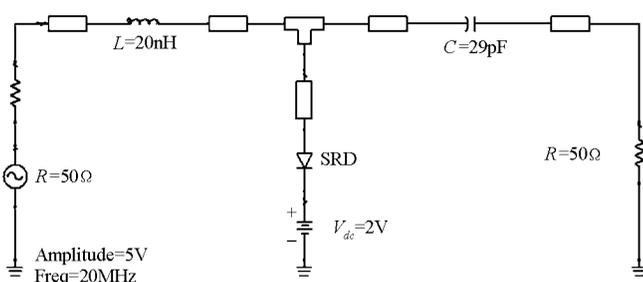


图 2 SRD 窄脉冲产生仿真电路图  
Fig. 2 Simulation circuit of SRD impulse generator

SRD 窄脉冲产生仿真电路图如图 2 所示, 同时考虑电路板上的传输线效应。电路的激励源是峰峰值 5V, 频率 20MHz 的正弦信号源。当 SRD 快速切换时, 输入阻抗变化很大, 输入端口会由于振荡产生

大量的谐波,因此在输入端口串联一个电感来减小振荡。仿真产生的窄脉冲见图7,所产生的窄脉冲与理想高斯脉冲有一定的差别,但是通过设计合适参数的超宽带滤波器,可以得到期望的脉冲波形。

### 3 超宽带滤波器的设计

目前已有多种微带线结构应用于超宽带滤波器的设计<sup>[11-12]</sup>。文献[11]提出了一种使用低通滤波结构和带通滤波结构级联实现的超宽带带通滤波器,通过调整低通滤波结构的下限频率和带通滤波结构的上下限频率得到需要通带。通过实验发现其带通滤波器的插入损耗并不是很理想,因此引入一种带CPW(共面波导)谐振器的平行耦合带通滤波器<sup>[2]</sup>,改善通频带内的带通性能,并通过调整其上下限通带频率,设计出产生指定脉冲形状的超宽带滤波器。

首先需要确定滤波器的性能指标。根据窄脉冲产生电路输出波形的幅度和脉冲宽度,得到式(1)中各因子的取值。此信号及其二阶微分信号,即高斯窄脉冲信号和二阶高斯信号式(2),可以分别作为理想滤波器输入和输出波形,这两个信号的时域波形和功率谱密度(PSD)如图3所示。

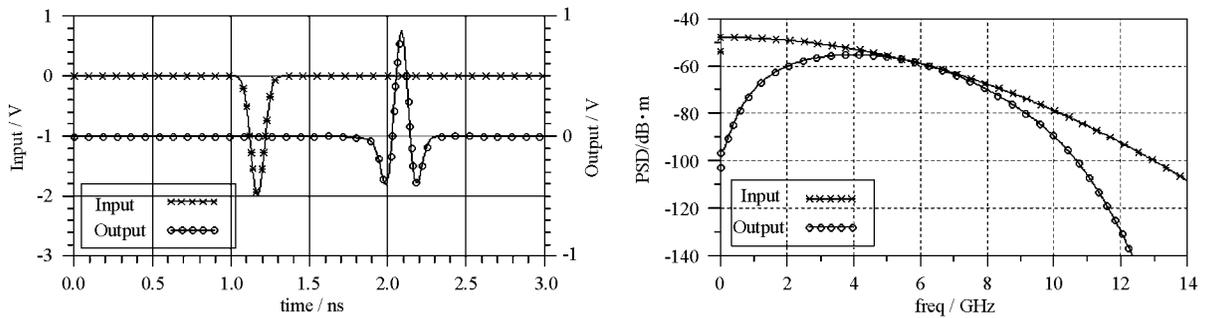


图3 理想滤波器输入和输出端的时域波形(左)和PSD(右)曲线

Fig. 3 Time domain waveforms(left) and PSD(right) of theoretical filter input/output

图3中,二阶高斯脉冲PSD(功率谱密度)的 $-20\text{dB}$ 带宽为 $7.9\text{GHz}$ ,低频和高频截止频率分别为 $0.7\text{GHz}$ 和 $8.6\text{GHz}$ ,此曲线实际上由超宽带滤波器特性曲线与高斯脉冲的PSD曲线相乘得到。由于高斯脉冲低频端PSD大于高频端PSD,超宽带滤波器的 $-20\text{dB}$ 低频截止频率应大于 $0.7\text{GHz}$ ,而高频截止频率应大于 $8.6\text{GHz}$ 。以这两个值为初始值,以图3中的输出频谱为目标,通过ADS Ptolemy仿真工具反复优化得到一组滤波器参数, $-20\text{dB}$ 低截止频率为 $1.5\text{GHz}$ ,高截止频率为 $9.5\text{GHz}$ 。

超宽带滤波器的结构如图4所示,滤波器尺寸根据其性能指标通过ADS Momentum工具优化得到,其具体取值为(单位mm): $L_1=2.5, L_2=2.0, L_3=3.55, L_4=1.35, L_5=1.1, L_6=2.5, L_7=0.8, w_1=1.2, w_2=7.525, w_3=2.625, w_4=4.0, w_5=6.2, w_6=8.6, g_1=1.05, g_2=0.7, g_3=0.35, g_4=0.8, g_5=0.2$ 。超宽带滤波器由三部分组成:LPS(低通滤波结构)、BPS(带通滤波结构)和输入输出匹配微带线。LPS是一个共面波导低通滤波器<sup>[13]</sup>,其S参数仿真数据如图5所示(LPS\_S11和LPS\_S21分别是返回损耗和插入损耗), $-20\text{dB}$ 截止频率是 $9.6\text{GHz}$ ,频率大于 $8\text{GHz}$ 时,插入损耗小于 $2\text{dB}$ ,返回损耗大于 $6\text{dB}$ 。BPS的正面是一对末端开路平行微带线,与背面的一个四分之一波长CPW谐振器耦合。此滤波器表现出三极点准椭圆函数响应特性,并且有两个提高频率选择性的有限频率传输零点<sup>[12]</sup>。其S参数仿真数据如图5所示(BPS\_S11和BPS\_S21分别是返回损耗和插入损耗)。BPS的 $-20\text{dB}$ 低截止频率和高截止频率分别是 $1.4\text{GHz}$ 和 $12.8\text{GHz}$ 。其通带内插入损耗在频率小于 $9.0\text{GHz}$ 时小于 $3\text{dB}$ 。

由LPS和BPS串联组成的带通滤波器S参数仿真数据如图6所示。其低截止频率等于BPS的低截止频率,高截止频率略大于LPS的截止频率,高低截止频率通过分别调整BPS和LPS的参数来实现。在通带内,插入损耗(BPF\_S21)在 $(2.4\sim 9.2)\text{GHz}$ 时小于 $4\text{dB}$ ,而在通带的高端和低端下降很快;对于阻带,衰减在频率小于 $1.3\text{GHz}$ 和大于 $10.6\text{GHz}$ 时大于 $30\text{dB}$ ;在 $20\text{GHz}$ 以内没有出现重复通带。

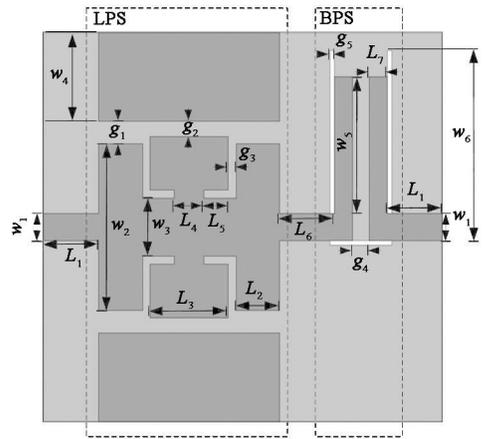
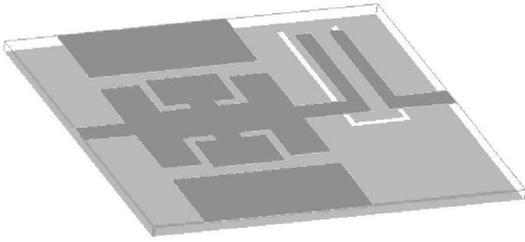


图4 超宽带滤波器结构

Fig. 4 Structure of UWB band-pass filter

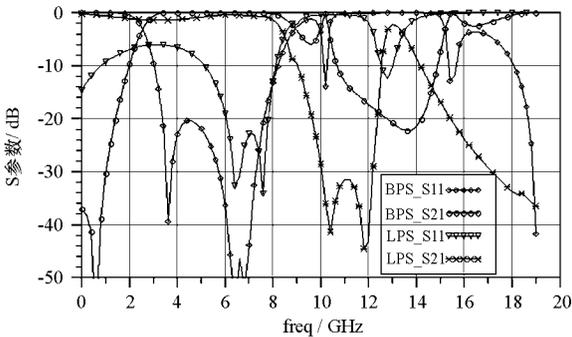


图5 LPS和BPS的S参数仿真曲线

Fig. 5 S parameter simulation results of LPS and BPS

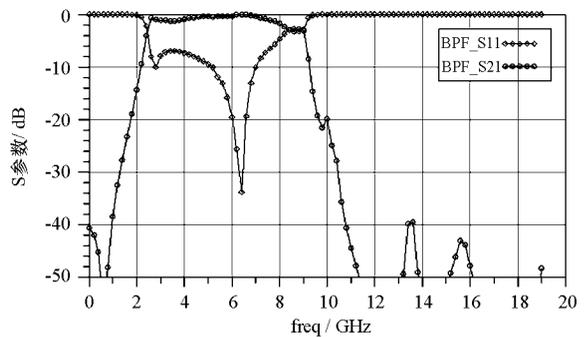


图6 超宽带滤波器S参数仿真曲线

Fig. 6 S parameter simulation results of UWB band-pass filter

## 4 电路仿真及测量结果

图2的窄脉冲产生电路在FR4材质的电路板上实现,其厚度1.6mm,介电常数4.3,导体厚度0.03mm,介电损耗 $1e-4$ 。电路的激励源是一个峰峰值5V,频率20MHz的正弦信号源。图4所示的超宽带滤波器在一块GML1000基板上实现,其相对介电常数为3.05,介电损耗为0.023,厚度0.508mm。高斯窄脉冲产生电路的输出通过50 $\Omega$ 同轴电缆输出到超宽带滤波器输入端,同轴电缆与电路板之间使用SMA接头连接。

图7中所示为SRD高斯窄脉冲电路和滤波器电路输出信号的仿真曲线。图8为电路板的实测曲线,其中SRDOutput为SRD窄脉冲电路输出,纵轴每格表示500mV;FilterOutput为滤波器电路输出,纵轴每格表示250mV;横轴每格表示500ps。测量得到的SRD窄脉冲宽度约为150ps,和仿真结果较为接近,但由于窄脉冲电路至滤波器电路阻抗的不连续性,使得信号产生了拖尾振荡;二阶高斯脉冲宽度约为240ps,比仿真得到的脉冲宽度略大一些,其主要原因可能是由滤波器电路加工误差引起的滤波器通带向低频扩展所致,具体原因还需要进一步通过实验确定。通带的低频扩展使得二阶高斯脉冲更接近理想波形,但是由于窄脉冲信号拖尾振荡,二阶高斯脉冲信号也有轻微的振荡出现。

## 5 结论

本文旨在球形目标假设的前提下研究超宽带引信目标回波信号产生的途径,提出了一种使用阶跃恢复二极管和超宽带滤波器产生二阶高斯窄脉冲信号的方法。通过仿真工具设计了超宽带窄脉冲产生电路,根据所产生窄脉冲的频谱得到超宽带滤波器的参数,设计了满足要求的超宽带带通滤波器。通过

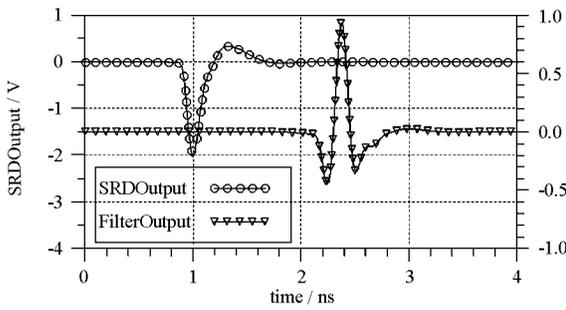


图7 窄脉冲电路输出和滤波器电路输出仿真曲线

Fig.7 Simulation results of SRD circuit and filter outputs

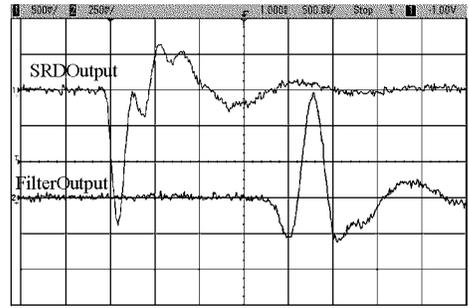


图8 窄脉冲电路和滤波器电路输出测量曲线

Fig.8 Measurement results of SRD circuit and filter outputs

测量实际电路的输出并与仿真结果进行比较,验证了所使用方法的可行性。

## 参考文献:

- [1] Fontana R J. Recent System Applications of Short-pulse Ultra-wideband (UWB) Technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(9): 2087- 2104.
- [2] 王春阳, 刘刚, 师剑军, 等. 一种高精度引信[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 14- 15.
- [3] 王欣, 付红卫, 向正义. 超宽带引信脉冲源的仿真设计[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 266- 268.
- [4] Taylor J.D. Ultra-wideband Radar Technology[M]. CRC Press LLC, 2001.
- [5] 王治国, 李熹, 郭德淳, 等. 超宽带汽车防撞雷达的设计[J]. 现代雷达, 2007, 29(4): 20- 23.
- [6] Barrie G. UWB Impulse Radar Characterization and Processing Techniques[R]. Technical Report, DRDC Ottawa TR 2004- 251, Defence R&D Canada, Ottawa, December 2004.
- [7] Oppermann I, Hamalainen M, Inatti J. UWB Theory and Applications[M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [8] Han J, Nguyen C. A New Ultra-wideband, Ultra-short Monocycle Pulse Generator with Reduced Ringing[J]. IEEE Microwave and Wireless Component Letters, 2002, 12(6): 206- 208.
- [9] 周建明, 费元春. 新型超宽带雷达发射机技术[M]. 兵工学报. 2008, 29(2): 240- 243.
- [10] Ruengwaree A, Ghose A, Weide J, et al. Ultra-fast Pulse Transmitter for UWB Microwave Radar[C]//Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Radar Conference, September 2006: 354- 357.
- [11] Chen N M, Fang K Z. An Ultra-broadband Coplanar-waveguide Bandpass Filter With Sharp Skirt Selectivity[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(2): 124- 126.
- [12] Thomson N, Hong J S. Compact Ultra-wideband Microstrip/Coplanar Waveguide Bandpass Filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(3): 184- 186.
- [13] Sor J, Qian Y X, Itoh T. Miniature Low-Loss CPW Periodic Structures for Filter Applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(12): 2336- 2341.