

文章编号: 2095-4980(2016)01-0040-06

调频连续波激光与无线电复合探测技术

付 春, 潘 曦, 宋承天

(北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘 要: 调频连续波(FMCW)激光引信具有定距精确度高, 抗电磁干扰能力强等优点, 但激光探测器易受云层、烟雾和雨雪的干扰, 影响引信对目标识别。为此提出了一种 FMCW 激光与无线电复合探测技术, 可有效地解决激光探测技术抗云层、烟雾、雨雪干扰的问题。在分析 FMCW 激光探测技术与 FMCW 无线电探测技术的工作原理基础上, 给出了激光无线电复合探测方案, 并验证了系统的可行性。

关键词: 激光引信; 无线电引信; 复合引信; 调频连续波

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0040

Frequency Modulated Continuous Wave laser and radio compound detecting technology

FU Chun, PAN Xi, SONG Chengtian

(Beijing Institute of Technology School of Mechatronic Engineering, Beijing 100081, China)

Abstract: Although Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW) laser fuze has the advantages of high ranging precision and strong electromagnetic anti-interference capability etc., laser detectors are susceptible to the clouds, smoke, rain and snow, which will influence the target recognition. An FMCW laser and radio compound detecting technology is presented, which can effectively help the laser detecting system to avoid from those interference. Based on the analysis of the working principles of FMCW laser detecting technique and FMCW radio detecting technology, a laser and radio compound detecting scheme is put forward, and the feasibility of the system is verified.

Key words: laser fuse; radio fuze; compound fuze; Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW)

调频连续波(FMCW)激光引信是一种通过发射已调制激光束来探测目标的光学近炸引信^[1], 它具有定距精确度高, 抗电磁干扰能力强等优点, 具有广泛的应用前景。但由于激光的波长较短, 容易受到云雾和烟尘等颗粒的散射, 引起虚警而早炸^[2], 因此保证激光引信在恶劣的自然或者人工干扰环境中能够探测到真实目标的信息, 就具有重要意义。而无线电引信对于云雾和烟尘等恶劣自然环境具有较强的适应性, 本文结合 2 种探测技术的优势, 采用 FMCW 激光与调频无线电复合体制来探测目标, 根据激光与无线电探测方式获取的差频信号, 利用数字信号处理算法进行综合判断处理, 实现抗云雾等干扰和提高探测精确度的目的。

1 FMCW 测距基本原理

FMCW 常用调制方式有锯齿波调制和三角波调制等方式, FMCW 测距常常受到多普勒频移的影响, 降低了测距精确度, 三角波调制可通过求 2 个相邻半周期的平均差频频率消除多普勒频移的影响, 故本文提出了激光与无线电复合探测技术采用三角波调制方式进行测距。

图 1 为三角波发射信号与回波信号的时间-频率曲线和其对应的差频信号时间-频率曲线对照图^[3]。图 1 中, $f_t(t)$ 为发射信号瞬时频率, $f_r(t)$ 为回波信号瞬时频率, f_0 为起始频率, ΔF 为调制频偏, f_{i+} 为上半周期的差频频率, f_{i-} 为下半周期的差频频率, T 为调制周期, τ 为发射信号从引信到目标的往返时间。

$$f_t(t) = f_0 + \frac{df(t)}{dt}t \quad (1)$$

式中： $f(t)$ 为三角波半周期内频率时间函数。

由于目标运动的多普勒效应，设引信与目标距离为 R ，其径向速度为 v ，则 $f_r(t)$ 为：

$$f_r(t) = f_0 + f_d + \frac{df(t)}{dt}(t - \tau) \quad (2)$$

式中： f_d 为多普勒信号频率； $\tau = 2R/c$ ， c 为光速。

当多普勒信号频率小于平均差频值时，可得上升半周期与下降半周期的差频频率为：

$$f_{i+} = f_t - f_r = \frac{4\Delta F}{Tc} R - f_d \quad (3)$$

$$f_{i-} = f_t - f_r = \frac{4\Delta F}{Tc} R + f_d \quad (4)$$

由此，可得引信与目标的距离 R 为^[4]：

$$R = \frac{Tc}{4\Delta F} \cdot \frac{f_{i+} + f_{i-}}{2} \quad (5)$$

式(5)表明，通过调制周期的上升阶段与下降阶段的差频频率的平均值来求引信与目标的距离，可消除多普勒信号频率对调频测距的影响。

2 激光与无线电复合测距原理

激光探测通道和无线电探测通道工作时，所测得的距离信息精确度不同。激光探测通道的探测精确度高于无线电探测通道的探测精确度，可通过无线电探测通道所得距离突出显示对激光探测通道所得距离进行否定或肯定判别，从而实现激光探测技术抗云层、烟雾和雨雪干扰的能力。

对距离为 L 的目标，设激光探测通道与无线电探测通道所测的距离分别为 L_1 和 L_2 ，激光探测通道的测量精确度为 δ_1 ，无线电探测通道的测量精确度为 δ_2 。

对于激光探测通道与无线电探测通道所测的距离 L_1 和 L_2 分别为 $L_1 \in (L, \delta_1)$ 和 $L_2 \in (L, \delta_2)$ 。

$$L - \delta_1 < L_1 < L + \delta_1 \quad (6)$$

$$L - \delta_2 < L_2 < L + \delta_2 \quad (7)$$

激光探测通道精确度高于无线电探测通道的精确度，即有：

$$\delta_1 < \delta_2 \quad (8)$$

由式(6)、式(7)和式(8)，可得激光探测通道与无线电探测通道的距离 L_1, L_2 有式(9)的关系：

$$-\delta_1 - \delta_2 < L_2 - L_1 < \delta_1 + \delta_2 \quad (9)$$

由式(9)可知，激光探测通道与无线电探测通道的距离之差应该满足其通道的精确度所确定的区间内。当激光探测通道受到云层、烟雾和雨雪干扰而导致其探测性能下降，会使其与无线电探测通道的距离差超出式(9)所确定的区间，此时系统的距离由无线电探测通道所测得的距离信息确定；反之，系统的距离为探测精确度高的激光探测通道的距离确定。

3 激光无线电复合探测系统

3.1 系统构成

引信系统由激光收发模块、无线电收发模块和数字信号处理模块构成^[5-6]。激光无线电复合探测系统原理框图见图 2，激光探测部分主要由激光发射单元与激光接收单元组成，发射单元包括控制电路、激光器激励电源、直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)和激光发射光学系统；接收单元要求具有很高的光电灵敏度、较宽的信号带宽、较高的信号增益和较低的噪声，其由光学接收系统、光电探测器、带通滤波器、自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)放大器和混频器等部分构成。无线电探测部分同样由无线电发射单元与无线电接收单元构成，其中发射单元包括调制信号产生电路、压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)、功分器、功率放大电路；接收电路包括低噪放、混频器、滤波器以及 AGC 构成。为了满足实时性的要求，数字信号处理模块由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现。

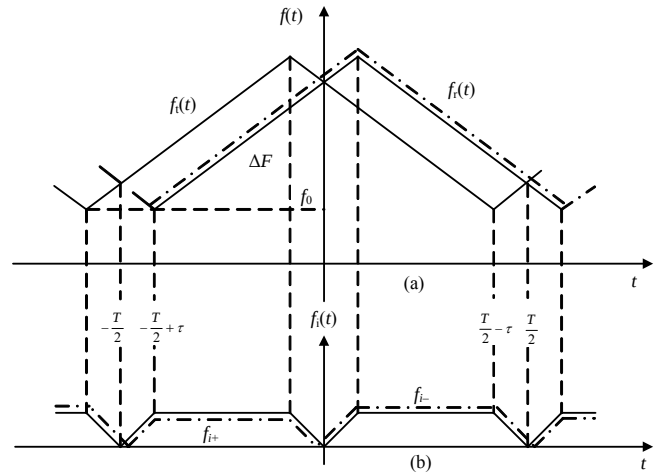


Fig.1 Time frequency curves on triangle-wave Frequency Modulation

图 1 三角波调频时间频率曲线

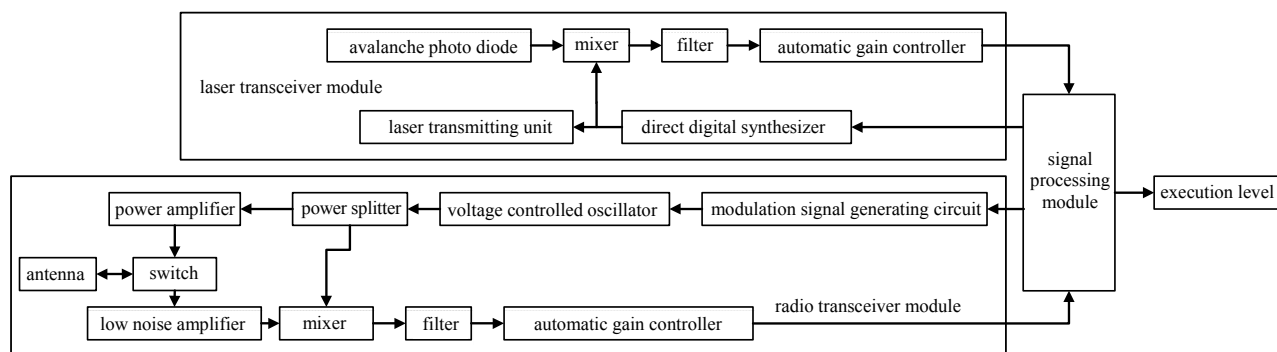


Fig.2 Block diagram of laser and radio compound detecting system

图 2 激光无线电复合探测系统原理框图

3.2 激光收发模块

激光探测器发射单元主要产生强度受线性调频信号调制的激光信号, 线性调频信号由 FPGA 通过控制接口控制 DDS 产生, 其中一路送入激光驱动电路实现对激光载波的强度进行调制, 经调制后的激光通过光学发射系统的扩束和准直发射到空间中, 另外一路送入接收单元的混频器作为本振信号。

DDS 芯片(AD9958)利用 FPGA 进行初始化配置和控制, 可以产生三角波调制的线性调频信号, 利用外部频率为 25 MHz 的晶振作为 DDS 的时钟源, 通过片内锁相环(Phase Locking Loop, PLL)倍频 20 倍得到 500 MHz 的系统时钟。

目标发射回来的微弱激光回波信号经过光学接收系统汇聚至光电探测器, 光电探测器将激光信号转化为电信号, 经由带通滤波器滤波后进行 AGC 放大, 再与本振信号混频, 生成包含目标信号的中频信号。激光收发模块电路见图 3。

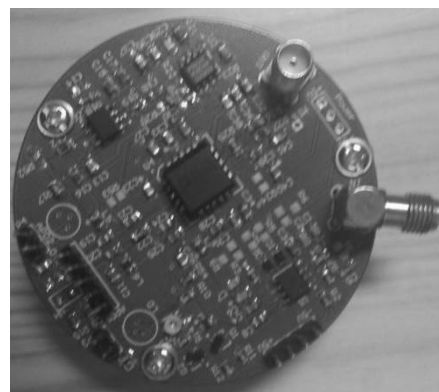


Fig.3 Circuit of laser transceiver module

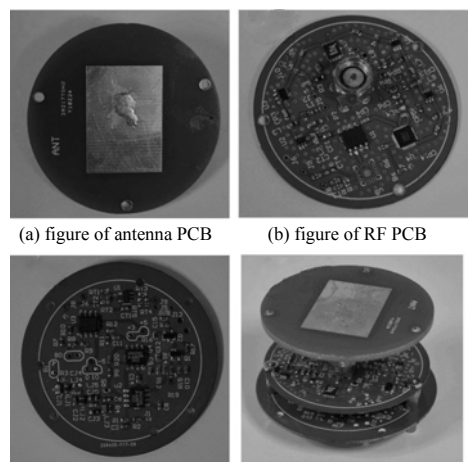
图 3 激光收发模块电路

3.3 无线电收发模块

无线电收发模块和激光收发模块一样也采用三角波调频定距方式, 发射与接收共用 1 个天线, 收发通过前端固态开关来控制, 发射过程中, VCO 经信号处理模块产生的三角波形调频, 接收时, 天线接收的回波信号经前置低噪放去除噪声, 然后混频、滤波得到差频信号, 最终通过数字信号处理模块得到距离信息。无线电收发系统电路见图 4。

3.4 数字信号处理模块

信号处理模块同时接收来自激光和无线电模块输出的差频信号, 经过输入缓冲电路后, 将电压放大到与 ADC 输入量程相当, 然后经由抗混叠低通滤波器滤波后由 ADC 进行模数转换, 送入 FPGA 对 2 路差频信号进行目标信息提取。模块的结构框图见图 5, 模块实物见图 6。



(c) figure of IF PCB (d) figure of RF front end system

Fig.4 Circuit of radio transceiver module

图 4 无线电收发模块电路

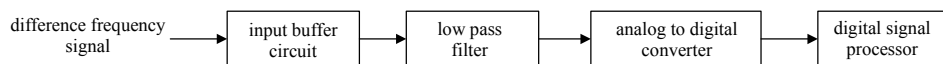


Fig.5 Block diagram of signal processing module

图 5 信号处理模块框图

4 信号处理实现及系统验证

4.1 测距实现

由混频输出的差频信号经过 AGC 放大、模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)采样转化为数字量

送到 FPGA^[7]。FPGA 通过高性能、参数化的随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)缓冲数据,快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)模块根据同步信号在半周期内对数据加窗后进行补零 FFT 计算,消除了差频信号的不规则区,避免了调频定距中固有距离误差的限制,提高定距精确度^[8]。FFT 运算输出结果数据为复数,需要对其求模运算,求模运算后的值通过比较得到最大模值所对应的差频频率,从而通过式(5)可得目标到引信的距离。

判决单元根据激光和无线电距离信息,做出综合判断,从而给出执行级启动信号。信息判决流程见图 7。为了有效解决激光探测技术抗云层、烟雾和雨雪干扰的问题,同时提高系统的工作精确度,系统以高精度激光探测通道为主,无线电探测通道为辅。该系统工作时,首先对系统初始化, FPGA 内部,无线电与激光探测通道计算单元分别对 2 个通道差频信号进行计算,得到激光通道与无线电通道距离;当无线电与激光通道距离差不满足由式(9)确定的区间或激光通道无差频信号时,说明此时激光探测通道受到云层、烟雾和雨雪等干扰,目标距离由无线电探测通道确定,反之则由激光探测通道确定。当目标距离达到预定高度时,给出启动信号。

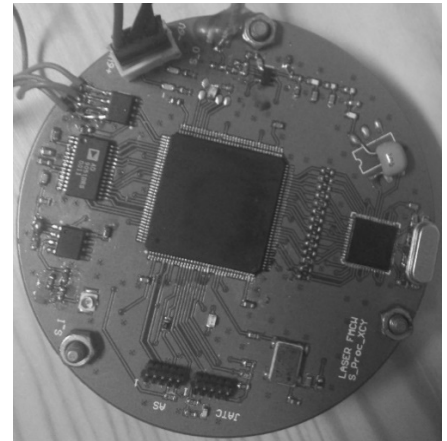


Fig.6 Circuit of signal processing module
图 6 信号处理模块电路

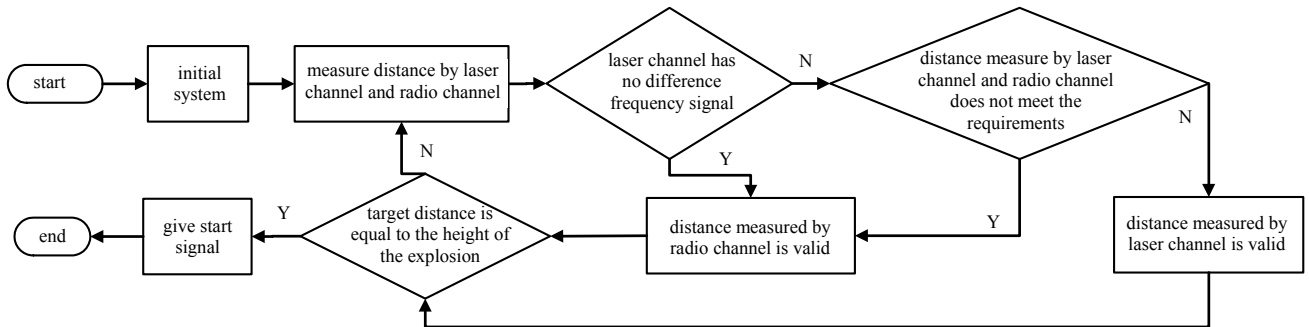


Fig.7 Flowchart of information judgment
图 7 信息判决流程

4.2 系统验证

为了方便信号加窗处理,系统测试时采用梯形波调制方式。在目标距离为 8 m,无干扰环境下,激光与无线电差频信号波形分别见图 8 和图 9,差频信号的采样频率为 1 MHz。取 2 个相邻半周期数据进行 FFT 运算,激光探测通道平均差频频率为 54.7 kHz;无线电探测通道平均差频为 56.6 kHz。由式(5)得激光通道与无线电通道距离分别为 8.3 m 和 8.5 m,可知激光通道精确度高于无线电通道,此时目标距离由激光通道确定为 8.3 m。

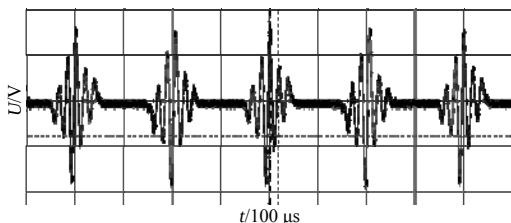


Fig.8 Waveform of laser channel when there is no interference
图 8 无干扰时激光通道差频信号波形图

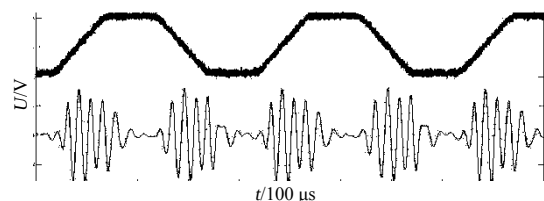


Fig.9 Waveform of radio channel when there is no interference
图 9 无干扰时无线电通道差频信号波形图

在图 10 定性烟雾干扰环境下,其余测试条件不变。此时激光不能透过烟雾传播,激光接收单元接收不到目标反射的激光信息,激光探测通道不能得到其差频信号,回波信号见图 11;目标距离由无线电通道确定,无线电信号不受烟雾影响,其差频信号波形仍见图 8 波形,由无线电通道差频信号得到距离与无烟时相同,为 8.5 m。此时目标距离由无线电探测通道确定为 8.5 m。

在目标距离为 5.3 m,测试环境如图 12 所示的定性条件下,该环境下能见度较低,激光与无线电差频信号分别见图 13 和图



Fig.10 Test in the environment of thick smoke
图 10 浓烟实验

14. 此时激光探测通道距离信息为 5.7 m, 无线电探测通道距离信息为 5.9 m。此时目标距离由激光确定为 5.7 m。

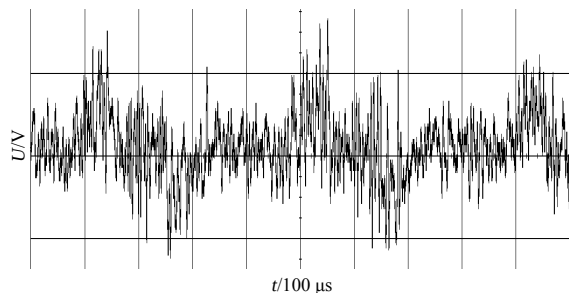


Fig.11 Difference frequency signal waveform of laser channel in the environment of thick smoke

图 11 浓烟时激光通道差频信号波形图



Fig.12 Test in the environment of low concentration of smoke

图 12 低浓度烟雾实验

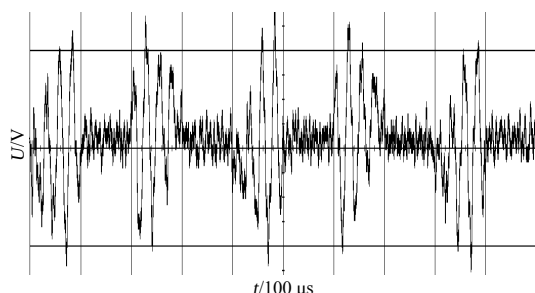


Fig.13 Difference frequency signal waveform of laser channel in the environment of low concentration of smoke

图 13 低浓度烟雾激光通道差频信号波形图

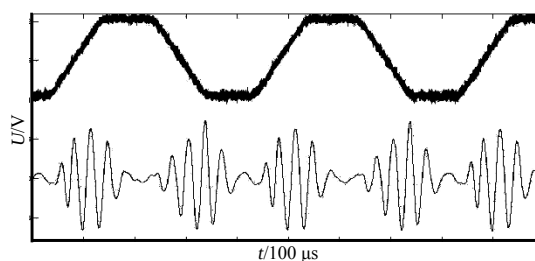


Fig.14 Difference frequency signal waveform of radio channel in the environment of low concentration of smoke

图 14 低浓度烟雾无线电通道差频信号波形图

表 1 列出了不同测试条件在不同距离下的测试结果(包含上文未提到的测试结果), 在低浓度条件下, 激光探测通道受烟雾干扰较小, 对其测距精确度影响较小, 与无线电探测通道距离信息相比, 满足式(9)所确定的区间, 系统距离仍然由激光探测通道给出; 在浓烟条件下, 激光不能穿过烟雾, 激光探测通道不能得到目标距离信息, 即其距离为 0, 与无线电探测通道相比, 超出式(9)所确定范围, 此时系统距离由无线电通道给出。表明以激光探测方式为主, 无线电探测方式为辅的复合探测技术结合了激光探测的高精确度与无线电探测的抗烟雾干扰能力使该系统具有良好的抗烟雾干扰能力。

表 1 测试结果对照表

Table1 Comparison of test results

test environment	target distance by laser detection channel/m	target distance by radio detection channel/m	target distance/m
smokeless, 8 m	8.2	8.5	8.2
smokeless, 5.3 m	5.6	5.9	5.6
low concentration of smoke, 8 m	8.5	8.5	8.5
low concentration of smoke, 5.3 m	5.7	5.9	5.7
high concentration of smoke, 8 m	—	8.5	8.5
high concentration of smoke, 5.3 m	—	5.9	5.9

5 结论

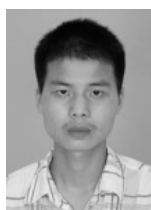
本文结合激光和无线电探测技术各自的优势, 设计了一种抗云层、烟雾和雨雪干扰的 FMCW 激光与调频无线电复合探测的引信。激光与无线电探测通道独立工作, 互不干扰, 无干扰时激光探测通道测距有效, 当激光探测通道与无线电探测通道的距离信息相差过大时, 表明激光受云层、烟雾和雨雪等干扰, 此时无线电探测通道测距有效; 整个数字信号处理部分, 包括激光和无线电体制各自对应的差频信号的处理, 以及炸点判别均在单片 FPGA 芯片中实现。最后浓烟干扰情况下与无烟情况下的对照实验结果表明, 该系统具有良好的抗烟雾干扰能力。

参考文献:

- [1] 赵岩,马洪远,南成根. 激光近炸引信技术[J]. 中国科技信息, 2011(8):70-71. (ZHAO Yan,MA Hongyuan,NAN Chenggen. Laser proximity fuze technology[J]. China Science and Technology Information, 2011(8):70-71.)
- [2] 路明,韩仲瑶,熊波,等. 激光引信抗干扰技术分析[J]. 舰船电子工程, 2014,42(5):812-816. (LU Ming,HAN Zhongyao,XIONG Bo,et al. Laser fuze interference experiment[J]. Computer & Digital Engineering, 2014,42(5):812-816.)

- [3] 崔占忠,宋世和,徐立新. 近炸引信原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009. (CUI Zhanzhong, SONG Shihe, XU Lixin. The Principle of Proximity Fuze[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2009.)
- [4] 杨毅. 毫米波 FMCW 雷达近炸引信信号处理设计及实现[J]. 电子技术应用, 2010,36(10):53-56. (YANG Yi. Design and implementaion of processor for FMCW millimeter radar fuze[J]. Application of Electronic Technique, 2010,36(10):53-56.)
- [5] 李金洪,杨小军,张娅丽. 一种基于 FPGA 的激光引信电路设计[J]. 火箭与制导学报, 2010,30(5):97-106. (LI Jinhong, YANG Xiaojun, ZHANG Yali. A laser fuze circuit design based on FPGA[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(5):97-106.)
- [6] 范志应,赵河明,吕昊瞰,等. 基于 DSP 的无线电引信起爆控制技术研究[J]. 测试技术学报, 2010,24(1):40-42. (FAN Zhiying, ZHAO Heming, LV Haotun, et al. DSP-based burst control technology for radio fuze[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010,24(1):40-42.)
- [7] 徐小平,刘建新,韩宇,等. FMCW 测距雷达数字信号处理设计仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2004,2(2):133-135. (XU Xiaoping, LIU Jianxin, HAN Yu, et al. Simulation of digital signal processor on FMCW radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2004,2(2):133-135.)
- [8] 向程勇,潘曦,王正浩,等. 基于求导比值的调频连续波测距方法[J]. 兵工学报, 2014,35(5):613-619. (XIANG Chengyong, PAN Xi, WANG Zhenghao, et al. A new ranging method for FMCW fuze based on the ratio of the derivation[J]. Acta Armamentarii, 2014,35(5):613-619.)

作者简介：



付 春(1990-), 男, 重庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为智能探测与控制、目标感知与信号处理. email:2120130205@bit.edu.cn.

潘 曦(1976-), 女, 吉林省榆树市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能探测与控制、目标感知与信号处理.

宋承天(1977-), 男, 甘肃省天水市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能探测与控制、激光引信.