

文章编号:1001-5078(2023)06-0853-06

· 激光应用技术 ·

多脉冲变频激光雷达的设计与实现

邓全,王治中,张弛,陈南亦,程占涛

(中国电子科技集团公司第二十七研究所,河南 郑州 450047)

摘要:随着高超音速武器的使用,防御系统对激光雷达的远程探测能力提出了更高要求。多脉冲激光雷达是当前远程探测的主要手段。受激光器散热条件限制,目前多脉冲激光雷达最高工作频率为 20 Hz,无法满足防御系统近程工作要求。本文结合激光雷达多脉冲、单脉冲测距技术的各自优势,提出了“多脉冲+单脉冲”自动变频复合测距的设计思路,并成功研制了一款多脉冲变频激光雷达。试验数据表明:该款激光雷达探测距离是单脉冲测距体制的 1.42 倍,取得了较好的试验结果。同时,通过自动变频控制措施,该款激光雷达能够满足防御系统近程高重频、高数据率(50 Hz)的要求。本文的研究成果对于推广多脉冲激光雷达具有较高的应用价值。

关键词:激光雷达;多脉冲;变频;设计;实现

中图分类号:TN958.98;TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.007

Design and implementation for multi-pulsed and frequency-conversion LiDAR

DENG Quan, WANG Zhi-zhong, ZHANG Chi, CHEN Nan-yi, CHENG Zhan-tao

(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: With the use of hypersonic weapons, defense systems are placing greater demands on long-range detection capabilities of LiDAR. Multi-pulsed LiDAR is the main means of long-range detection at present. Limited by the heat dissipation condition of the laser, the current maximum operating frequency of the multi-pulse LiDAR is 20 Hz, which cannot meet the short-range operating requirements of the defense system. In this paper, combining the respective advantages of multi-pulsed and single-pulsed ranging technologies of LiDAR, the design idea of "multi-pulsed + single-pulsed" automatic frequency-conversion compound ranging is put forward, and a multi-pulsed frequency-conversion LiDAR is successfully developed. The experimental data shows that the detection range of this LiDAR is 1.42 times higher than that of the single-pulsed ranging system, achieving better test results. At the same time, with automatic frequency control measures, the LiDAR can meet the defense system's short-range requirements of high repetition frequency and high data rate(50 Hz) at short-range. The research results of this paper are of high application value for the promotion of multi-pulsed LiDAR.

Keywords: LiDAR; multi-pulsed; frequency-conversion; design; implementation

1 引言

在本年度俄乌战争中,俄方首次使用了 Kh-

47M2“匕首”高超音速武器(≥ 5 倍音速)。高超音速武器的使用对各国防御系统远程探测能力提出了

更高要求。激光雷达是防御系统的重要组成部分,主要获取被测目标的距离信息。传统的单脉冲激光雷达为了提高探测距离,一般采取提高激光功率、减小激光发散角、增大接收口径和采用高灵敏度探测器等措施。这些措施是有效的,但容易受到整机功耗、体积、重量、系统跟踪精度等因素的限制^[1]。

当前,远程激光雷达有两个发展方向:一是采用盖革模式 APD 接收的微脉冲单光子激光测距技术;二是采用线性模式 APD 接收的多脉冲激光测距技术。单光子测距因探测器灵敏度极高(约 10^{-12} 量级),能够显著提高远程探测距离,但其受白天背景光干扰、暗计数噪声等影响严重,制约了装备的工程化应用。而多脉冲激光测距技术相对成熟,是现阶段远程探测的主要方向^[2]。

但是,多脉冲激光雷达因激光器散热、驱动电流稳定性等问题,工作频率不能太高,无法满足防御系统近程高重频、高数据率的工作要求。本文针对防御高超音速目标的现实需求,结合多脉冲、单脉冲测距技术的各自优势,提出了“多脉冲+单脉冲”自动变频复合测距的设计思路,并成功研制了一款多脉冲变频激光雷达。试验数据表明:该款激光雷达既能发挥多脉冲体制对远程微弱目标探测的技术优势,又能兼顾防御系统近程高重频、高数据率的要求。

2 多脉冲激光雷达理论基础

2.1 多脉冲信号相关处理的条件

多脉冲激光雷达的系统组成与传统单脉冲激光雷达基本相同,主要不同在于激光发射方式和回波接收处理方式^[1]。常规的单脉冲测距技术是每次发射单个激光脉冲,并从单个回波信号直接得到目标距离,而多脉冲测距技术是每次发射一串激光脉冲($N \geq 3$),并通过对接收的脉冲串激光信号进行相关处理后得到目标距离。二者信号示意图如图 1。

多脉冲激光雷达的信号相关处理,就是利用信号在时间上的相关性和噪声的不相关性(随机性),通过脉冲串信号累积、波形匹配滤波和多帧信号相关检测处理等措施,有效降低最小可探测信噪比,达到提高远程探测距离的目的^[3]。对同一探测目标而言,相邻两个激光脉冲回波信号相对于主波信号的时间差为:

$$\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1 = \frac{2V}{c} T_p \quad (1)$$

式中, V 为目标相对测量点的视线距离变化速度; c 为光速; T_p 为相邻两个激光脉冲时间间隔。当为单脉冲测距时, T_p 即为发射周期;对于多脉冲测距时, T_p 为测距周期内相邻脉冲间隔。当 V 为 0 时,目标为固定物。假设目标以 5 倍音速飞行,单脉冲发射,重频 20 Hz,则 $\Delta t = 0.567 \mu\text{s}$,远远大于激光回波半脉宽(约为 20 ns),回波脉冲之间相互独立,无法实现脉冲间的信号累积;而采用 $T_p = 500 \mu\text{s}$ 的多脉冲发射,则 $\Delta t = 5.67 \text{ ns}$,信号相关性强,可以实现对信号的累积处理。亦即,由公式(1)计算的 Δt 是否小于激光回波半脉宽,是多脉冲信号相关处理的前提。

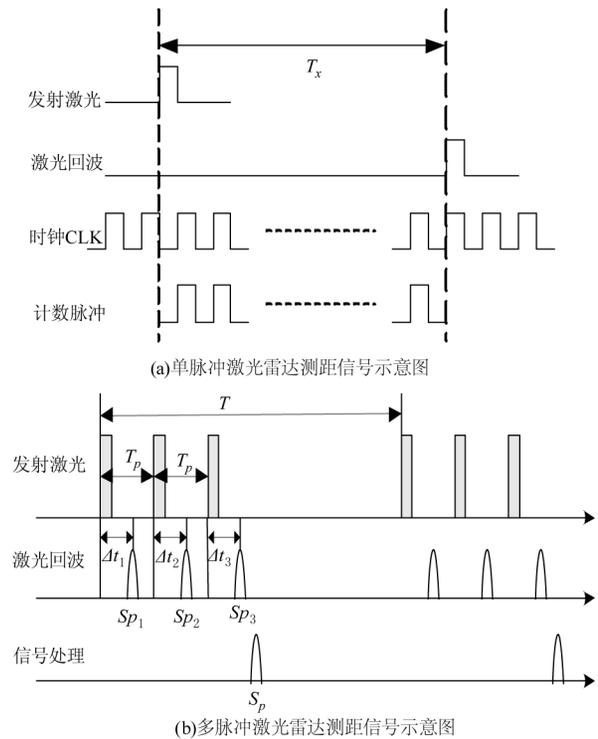


图 1 单/多脉冲激光雷达测距信号示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the single/multi-pulsed LiDAR ranging signal

2.2 多脉冲激光雷达作用距离模型

激光雷达的最大作用距离可以用接收机的最小可探测信号功率 $P_{r_{\min}}$ 表达。对于远程探测中的目标均应视为点目标,点目标单脉冲激光雷达方程为:

$$R_{L_{\max}} = \left\{ \frac{P_t \eta_t \eta_r \rho A_s D^2}{\pi \theta_t^2 P_{r_{\min}}} \cdot e^{-2\mu R_{L_{\max}}} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

式中, $R_{L_{\max}}$ 为单脉冲激光雷达最大测程; P_t 为激光发射功率; $P_{r_{\min}}$ 为满足准测率的最小可探测功率; η_t 、 η_r 分别是发射和接收光学效率; A_s 为目标截面

积; θ_l 为激光束散角; ρ 为目标反射率; D 为接收机孔径; $e^{-2\mu R}$ 为光源到目标的双程大气透过率, 其中 μ 为激光通过大气时的气溶胶消光系数。

假设同一台激光雷达分别采用多脉冲和单脉冲测距体制, 得到的距离用 R_M 、 R_L 表示, 则:

$$\frac{R_M}{R_L} = \left(\frac{P_{lM} \cdot P_{rl}}{P_{lL} \cdot P_{rM}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \exp\left[\frac{\mu}{2}(R_L - R_M)\right] \quad (3)$$

显然, 上式多脉冲条件下的 P_{lM} 、 P_{rM} 不能直接求得, 但是这些参数最终会反映到接收信号通道中, 成为一个与信号强度、接收灵敏度以及回波信号处理器处理能力密切相关的比例系数^[2-3], 设该系数为 K , 则:

$$K = \left(\frac{I_{lL}}{I_{lM}} \cdot \frac{I_{sM}}{I_{sL}} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{I_{lL}}{I_{nL}} \cdot \frac{I_{nL}}{I_{nM}} \cdot \frac{I_{sM}}{I_{sL}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中, K 为距离增量系数; I_l 为检测阈值; I_n 为噪声均方值; I_l/I_n 为阈值噪声比; I_s 为参与最后检测的信号峰值。而阈值噪声比可由公式(5)求得^[4]:

$$\frac{I_l}{I_n} = \sqrt{-2\ln[2\sqrt{3} \cdot \tau \cdot (\overline{FAR})]} \quad (5)$$

式中, τ 为激光脉冲宽度; \overline{FAR} 为平均虚警概率。结合公式(3)、(4)、(5), 可得多脉冲激光雷达的最大探测距离一般表达式:

$$R_{M_{\max}} = K \cdot R_{L_{\max}} \cdot \exp\left[\frac{\mu}{2}(R_{L_{\max}} - R_{M_{\max}})\right] \quad (6)$$

3 设计难点分析

多脉冲激光雷达一般由发射机(激光器和激励源)、收发光学、接收机、终端机等四部分组成。其中, 收发光学和终端机技术相对成熟, 不是设计的制约因素, 设计的重点是发射机和接收机。

针对高超音速目标的远程探测, 多脉冲激光雷达需要发射机能够输出大功率、高重频的激光脉冲。当前, 大功率激光器单脉冲工作时最高重频约为 50 Hz, 但探测距离相对有限; 而采用多脉冲体制工作时可有效提升远程探测距离, 但工作频率较低 (≤ 20 Hz), 无法满足近程末端防御系统高重频、高数据率的要求(50 Hz)要求。

多脉冲体制下, 发射机工作频率受限的主要原因是: 激光器在激励源的驱动下, 一个周期内需要输出一组 ($N \geq 3$) 间隔仅为数百微秒的高功率激光脉冲串。激励源储能电容的充放电时间决定着驱动电流的稳定性, 进而会影响激光器输出功率的稳定性。

受激励源充放电时间、激光器工作温度以及散热条件限制, 大功率激光器脉冲串输出时工作频率较低。因此, 多脉冲激光雷达发射机的设计难点在于: 在现有技术条件下, 如何既满足远程大功率激光脉冲串输出要求, 又满足近程高重频(50 Hz)的工作要求。

多脉冲激光雷达由于要实现脉冲串信号累积、波形数据滤波、帧间相关匹配等运算, 传统的模拟接收机已经被数字接收机替代。数字接收机是高速 AD 采样技术、多脉冲累积技术、数字信号处理技术相结合的产物, 可以进一步抑制通道噪声, 提高信噪比, 从而提高远程目标探测距离。数字接收机的使用, 使得原终端机的距离解算、数据处理功能减弱。数字接收机的典型架构为“AD + DSP + FPGA”, 终端机的典型架构为“DSP + FPGA”。因此, 在满足数字接收机运算资源的前提下, 可以将数字接收机和终端机一体化设计, 以减少整机控制流、数据流的冗余消耗, 也有利于减少整机装备的体积、重量及成本。此外, 由于各种数据滤波算法灵活, 设计中需要综合考虑运算能力、存储空间以及实时性等因素, 并根据实际波形选取合适的信号处理方法^[5]。

4 设计与实现

某型激光雷达要求探测距离不小于 50 km, 虚警率 $\leq 2\%$, 目标运动速度约 5 马赫。显然, 被测对象为高超音速目标。这就要求激光雷达在远程时能够及早发现并跟踪目标, 而在近程时由于目标径向速度快, 需要激光雷达高重频工作, 以便及时、准确地为火控系统提供距离信息。根据上述指标及分析, 重点开展多脉冲激光雷达发射机和数字接收机的设计与实现。

4.1 发射机设计

大能量、窄波束、高光束质量的激光光源是实现远程探测的关键之一。根据平台要求和现有技术水平, 发射机采用激光二极管泵浦的主动调 Q 固体激光器, 通过对激光二极管进行精确温控, 实现高效率稳定激光输出。激光器主要由 YAG 晶体棒、LD 泵浦源、TEC 制冷片、输出镜、偏振镜、全反镜以及调 Q 晶体等组成, 如图 2 所示。

经试验验证, 单脉冲工作时, 激光器能够满足最高重频 50 Hz、峰值功率 ≥ 15 MW 的要求; 多脉冲工作时, 激光器能够在一个周期内输出 3 个时间间隔 600 μ s 的脉冲串, 最高重频为 20 Hz; 当工作频率高

于 20 Hz 后,发射机无法输出满足要求的激光功率,且容易造成装备可靠性降低。

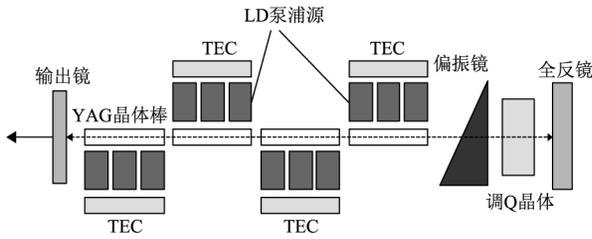


图 2 多脉冲激光雷达激光器组成框图

Fig. 2 Block diagram of multi-pulsed LiDAR composition

为了适应激光雷达远程、近程不同工作频率要求,特别是在不改变当前激光器散热设计的条件下,本文提出了“多脉冲+单脉冲”自动变频控制策略,即:远距离段($> 15\text{ km}$)时,目标回波属于微弱信号,此时采用多脉冲体制,既发挥脉冲串累积对信噪比的提升作用,又降低对发射机工作频率的要求($\leq 20\text{ Hz}$,典型应用 20 Hz);中近距离段($\leq 15\text{ km}$)时,目标回波属于强信号,此时多脉冲信号累积作用不大,采用单脉冲体制,既实现测距要求,又可以提高激光器工作频率($> 20\text{ Hz}$,典型应用 50 Hz),满足末端防御系统对高重频、高数据率的要求。图 3 为多脉冲激光雷达“多脉冲+单脉冲”自动变频复合测距的控制流程图。

采用“多脉冲+单脉冲”自动变频复合测距的突出优势:一是通过变频,限制了远程时多脉冲激光雷达的工作频率,有效降低激光器热量累积,有利于保护激光器;二是多脉冲体制通过增加参与信号累积的脉冲个数,减小单个激光脉冲的峰值功率,降低了激光器光学元件膜层的损伤概率,提高了整机的可靠性;三是满足了激光雷达远程、近程不同工作频率要求。

4.2 数字接收机设计

根据分析,多脉冲变频激光雷达将数字接收机与终端机一体化设计,可以实现高速 AD 采样技术、数字信号处理技术和终端控制技术的单板级集成。数字接收机硬件电路主要包括 APD 前放组件、时变增益放大器、噪声控制电路、高压电源、高压调整电路、信号高速 A/D 采样电路、采样信息存储电路、系统接口电路、时序控制电路、D/A 控制电路、状态显示电路、DSP + FPGA 处理模块等,图 4 为数字接收机组成框图。

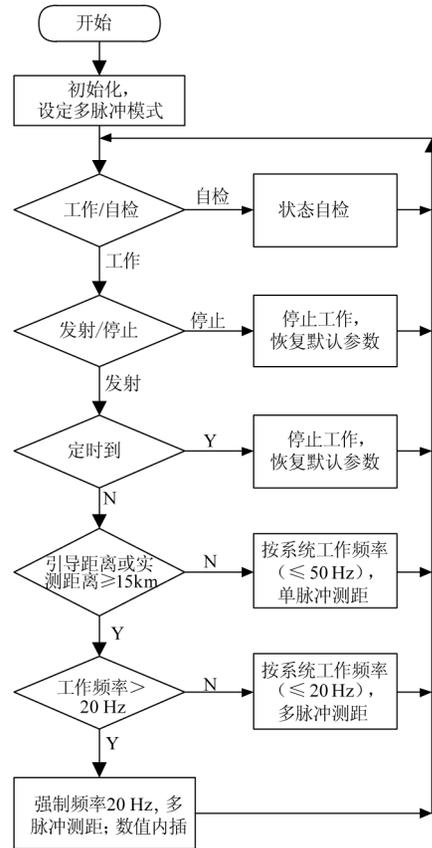


图 3 “多脉冲+单脉冲”自动变频控制流程图

Fig. 3 Flow chart of single/multi-pulsed LiDAR automatic frequency conversion control

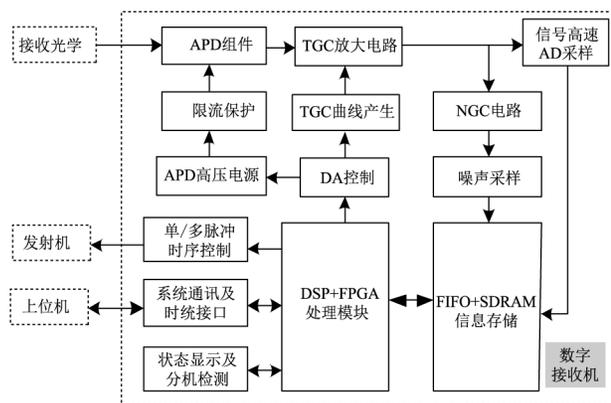


图 4 多脉冲激光雷达数字接收机组成框图

Fig. 4 Block diagram of multi-pulsed LiDAR digital receiver

与传统的模拟接收机相比,从 TGC 放大电路后,数字接收机直接进行信号高速 AD 采样,回波门限不再是固定阈值。可以说,信号高速 AD 采样是数字接收机实现数字信号处理的基础。此外,TGC 曲线、NGC 控制电路也不再由模拟硬件电路搭建,而是由 DSP + FPGA 控制 AD、DA 电路,实现了数字化控制。

数字接收机信号处理软件是多脉冲激光雷达数字信号处理的关键。信号处理软件主要包括:通道

AD 采样、信号累积及滤波处理、超低阈值检测、动态阈值检测、相关匹配处理、目标确认处理、距离解算与修正等功能模块。其软件处理流程如图 5 所示。

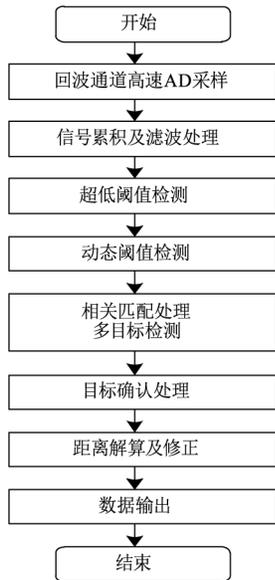


图 5 数字接收机数据处理软件流程图

Fig. 5 Flow diagram of multi-pulse LiDAR signal processing software

数据处理中阈值检测、相关目标匹配及距离解算等功能是单/多脉冲激光雷达共有的常用算法,不会对通道的信号和噪声幅值产生影响,不再赘述。而信号累积及数据滤波算法对激光回波信号处理影响较大,特别是能够降低装备的最小可探测功率,对于远程目标探测而言需要重点考虑。

信号累积分为相参累积和非相参累积,都是通过对目标的多次观测进行信号迭加。相参累积要求信号有严格的相位关系,相参积累的信噪比能够提高 N 倍。本文采用非相干直接探测方式,信号累积是周期性的时阈信号幅度迭加,即非相参累积。非相参累积后,多脉冲信噪比相比单脉冲信噪比提高 \sqrt{N} 倍^[6]。本文采用的滑窗累积器表达式为:

$$I(t) = \sum_{i=0}^{N-1} I(t + iL) \quad (7)$$

式中, N 为多脉冲累积次数,也为脉冲串时间间隔个数; L 为脉冲间隔内的采样点数。

信号累积后,需要采用波形匹配滤波对目标回波进行预处理,将与波形差异大的噪声滤除掉。常用的滤波方式有差值滤波、平滑滤波等。差值滤波可以有效针对回波信号下冲的特点,并能滤

除信号中的直流分量;而平滑滤波可以对高频噪声进行有效抑制。本文采用差值及平滑滤波的表达式为:

$$I(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} [I(t + i) - I(t + i + M)] \quad (8)$$

式中, K 为一次滤波处理的采样点数; M 为隔点差分的点数,与回波脉冲宽度有关^[2,7]。本文数字接收机信号检测流程如图 6 所示。

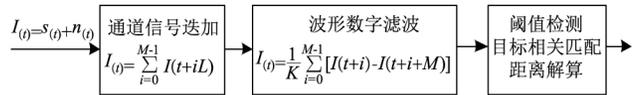


图 6 数字接收机信号检测流程图

Fig. 6 Echo signal detection block diagram of digital receiver

5 试验验证及分析

采用多脉冲变频技术的某型激光雷达研制成功,主要技术参数为:激光脉冲峰值功率 ≥ 15 MW;多脉冲体制,每周周期发射 3 个激光脉冲,脉冲间隔为 600 μ s;探测器采用雪崩光电二极管,AD 采样频率 400 MHz,回波信号半脉宽 15 ~ 20 ns。

首先,激光雷达以引导距离或探测距离为判据,实现了多脉冲/单脉冲自动变频功能。远程多脉冲体制时,最高重频 20 Hz;近程单脉冲体制时,最高重频 50 Hz。

其次,装备在多脉冲体制下,实现了对高超音速远程目标的探测。试验结果见表 1、表 2。

表 1 多脉冲激光雷达摸底试验结果

Tab. 1 Results of multi-pulsed LiDAR diagnostic test

天气情况	目标类型	最大测量距离/km	备注
晴、能见度 20 km	民航机	86	尾随
晴、能见度 20 km	目标 1	75	迎头
	目标 1	79	尾随
晴、能见度 20 km	目标 2	74	迎头
晴、能见度 15 km	目标 3	71	迎头

在考核试验中,多脉冲变频激光雷达性能稳定可靠,无故障现象发生,验证了自动变频技术对激光雷达整机控制的有效性。对比表 1 和表 2,可以看出多脉冲体制探测距离约为单脉冲体制探测距离的 1.42 倍,远超指标要求 (≥ 50 km)。对此结果分析如下:

根据装备探测概率和平均虚警率,按公式(5),可计算得到:

$$\frac{I_{tL}}{I_{nL}} = 6.5, \frac{I_{tM}}{I_{nM}} = 2 \quad (9)$$

表 2 单脉冲与多脉冲体制探测距离对比
Tab. 2 Comparison of detection distances
between single/multi-pulsed systems

目标 类型	单脉冲距离/km		三脉冲距离/km		距离提升比例/%	
	能见度		能见度		能见度	
	15 km	20 km	15 km	20 km	15 km	20 km
目标 1	52.2	53.1	73.9	75.2	41.57	41.62
目标 2	51.1	52.3	72.8	74.5	42.39	42.45
目标 3	49.5	51.8	70.4	73.6	42.30	42.08

回波通道的信号经 AD 采样后,首先进行脉冲串间信号累积处理。由于信号脉宽大于回波脉冲移动时间,目标信号的峰值可以认为是直接相加的结果,即信号峰值为单脉冲峰值的 3 倍。根据信号迭加理论,累积后的信噪比是单脉冲的 $\sqrt{3}$ 倍,即:

$$\frac{I_{sM}}{I_{nM}} = \sqrt{3} \left(\frac{I_{sL}}{I_{nL}} \right) \Rightarrow \frac{I_{nM}}{I_{nL}} = \sqrt{3} \quad (10)$$

累积后的数据进行波形匹配滤波。根据统计学及随机过程理论,单元均值滤波后,信号及噪声随机误差均减小 \sqrt{N} (N 为单元滤波次数)^[3,8],则:

$$\frac{I_{sM}}{I_{sL}} = \frac{3}{\sqrt{N}}, \frac{I_{nM}}{I_{nL}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{N}} \quad (11)$$

当 $N=9$ 时,则:

$$\frac{I_{sM}}{I_{sL}} = 1, \frac{I_{nM}}{I_{nL}} = \sqrt{3} \quad (12)$$

波形匹配后的信号进行阈值检测及目标相关匹配等处理。至此,信号及噪声幅值将不再变化。将上述计算结果代入公式(4),可得 $K=1.54$,即:在其他条件不变情况下,多脉冲体制探测距离理论上约为单脉冲探测距离的 1.54 倍,相当于最小可探测功率比单脉冲体制小 5.63 倍。根据实测数据,二者探测距离相差 1.42 倍,与理论有 12% 的误差,主要原因在于:理论上,三脉冲的信号幅度是单脉冲幅度的 3 倍,而实际上很难保证三个脉冲输出峰值的完全一致性;此外,大气能见度、衰减系数误差也对结果有一定影响。试验结果与理论计算基本吻合,证明了本文多脉冲变频激光雷达设计的正确性。

6 结 语

随着高超音速武器的使用,防御系统对激光雷达远程探测能力要求越来越高。在当前条件下,本文研制的多脉冲变频激光雷达较好地解决了发射机工作频率对多脉冲探测体制的限制,能够发挥多脉冲远程探测的技术优势。但是,多脉冲变频激光雷

达性能的提升需要综合大功率激光发射技术、背景抑制及数字接收技术、信号处理及综合控制技术等多种因素。这些将是我们下一步的研究重点。相信随着激光技术及数字信号处理技术的发展,多脉冲变频激光雷达一定能够得到更广泛应用。

参考文献:

- [1] Zhong Shengyuan, Li Songshan. Study of multi-pulsed laser ranging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36 (Sup.): 797 - 799. (in Chinese)
钟声远, 李松山. 脉冲串激光测距技术研究 [J]. *激光与红外*, 2006, 36 (增刊): 797 - 799.
- [2] Ma Pengge, Yang Yi. Multi-pulse laser ranging radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2017. (in Chinese)
马鹏阁, 羊毅. 多脉冲激光雷达 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [3] Li Songshan. Study on a multi-pulse laser ranging [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2005; (in Chinese)
李松山. 激光多脉冲测距技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学硕士学位论文, 2005.
- [4] Zhou Bing, Huang Fuyu, Xu Chunmei. Modern pulsed laser ranging technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016. (in Chinese)
周冰, 黄富瑜, 徐春梅. 现代脉冲激光测距技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [5] Zhou Hangci. Constant algorithms in the embedded operating system software design [M]. Beijing: BeiHang University Press, 2010: 70 - 90. (in Chinese)
周航慈. 嵌入式系统软件设计中的常用算法 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 70 - 90.
- [6] Li Fan, Wu Ganhua, Han Chunsheng. Improving the ranging performance of ladar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (Sup.): 112 - 114. (in Chinese)
李番, 吴淦华, 韩春生, 等. 提高激光雷达测距能力的方法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37 (增刊): 112 - 114.
- [7] Zhang Tinghua, Fan Guihua, He Yonghua. Research on multi-pulsed laser echo signal process method [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2011, 22(1): 93 - 96. (in Chinese)
张廷华, 樊桂花, 何永华. 多脉冲激光回波信号处理方法研究 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2011, 22(1): 93 - 96.
- [8] Deng Quan, Ma Min, Li Li. Study on the theory of frequency-conversion ranging technology in pulsed laser radar [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(6): 609 - 613. (in Chinese)
邓全, 马敏, 李丽. 脉冲激光雷达变频测距技术理论研究 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(6): 609 - 613.