

文章编号:1001-5078(2006)增刊-0797-03

脉冲串激光测距技术研究

钟声远 李松山

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:文中提出了一种脉冲串激光测距技术,采用脉冲串激光和相关探测方法,可显著地提高脉冲激光测距能力。理论分析和试验结果表明:采用3脉冲串激光测距体制要比同等单脉冲测距体制的探测灵敏度提高11倍。

关键词:脉冲串激光;测距;相关处理

中图分类号:P225.2 **文献标识码:**A

Study of Multi-pulsed Laser Ranging Technology

ZHONG Sheng-yuan, LI Song-shan

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The multi-pulsed laser ranging is designed in the paper. That laser ranging have been remarkably improved by multi-pulsed laser and detection of multi-signal correlation. Through theory analysis and outfield tests, it is proved that detectivity of the 3 multi-pulsed ranging is 11 times than the single pulsed laser ranging.

Key words: multi-pulsed laser; ranging; related deal

1 前言

激光测距技术是最早用于军事上的激光技术,早已广泛应用于各军事领域,尤其是侦察和火控系统应用最广最普遍。对军用激光测距装备而言,一般采用单脉冲激光测距技术。然而,直到目前,常规脉冲激光测距机的测距能力除依赖提高激光功率、减小激光发散角、增大接收口径和采用高灵敏度探测器外,可以说近三十年来,并无大的突破。

具有典型代表的是美国研制成功的机载“门警”光电预警系统,采用激光脉冲能量600mJ、激光发射光束角仅约20μrad等超寻常激光测距参数,才能达到最大的作用距离为:在激光测距机机载高空飞行时,对高度32km目标,测量距离可达300km。

为了提高测距能力,我们已研究一种采用脉冲串测距体制的新型激光测距系统,其主要特点是:

- 脉冲串激光发射,串内相邻脉冲间隔可小到200μs以内;

- APD直接探测;

- 高速数字采样和相关处理。

我们采用3脉冲串激光发射体制的激光测距机

进行试验,对航高8km的大型民航机测距,最远测量距离达112km。要比同等单脉冲测距体制的探测灵敏度提高约11倍。

2 脉冲串激光测距信号处理原理

脉冲串激光测距技术与普通脉冲激光测距技术的主要不同处在于,激光发射的方式和提取的目标距离信息(信号)不同,常规的单脉冲测距技术是从每次发射的单个激光脉冲的回波信号直接得到目标距离,而脉冲串测距技术是每次发射一串脉冲,并通过对接收到的脉冲串激光信号进行相关处理后得到目标距离(如图1)。目标激光回波的时间相关性主要取决于相邻脉冲的间隔,相邻脉冲信号的时间相关性从相邻两个激光脉冲回波信号相对发射信号(主波)的时间差 Δt_0 来确定:

$$\Delta t_0 = \frac{2V}{c} T_p \quad (1)$$

作者简介: 钟声远(1937-),男,教授级高工,自1964年以来,从事激光军事应用技术研究,获多项国家级、部级科技进步奖。

收稿日期: 2006-06-07

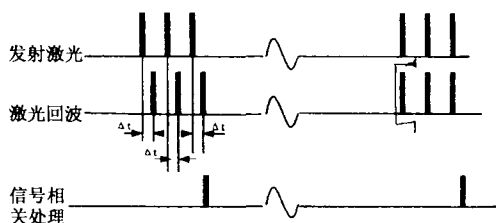


图1 脉冲串激光测距信号示意图

式中, V 为目标相对测量点的视线距离变化速度; T_p 为相邻两激光脉冲时间间隔; c 为光速。对于飞行速度为 664m/s (两倍音速) 的目标来说: 常规测距采用单脉冲发射, 重复频率为 10Hz , $\Delta t_i = 0.445\mu\text{s}$, Δt_1 远远大于激光回波信号半宽度 (一般为 15ns 左右), 相关性太差; 而对采用脉冲串激光发射来说, 设相邻两脉冲的时间间隔为 $T_p = 200\mu\text{s}$, 则由 (1) 式得出的相关时间 ($\Delta t_i = 0.885\text{ns}$), 远远小于激光信号宽度, 就可有效地实现对回波信号的相关处理, 如对数字采样信号进行迭加和根据多次回波迭加后的波形特征进行波形匹配滤波, 可以将信噪比提高数倍。

2.1 信号迭加

设放大器的输出特性为:

$$\zeta(t) = X(t) + s(t) \quad (2)$$

式中, $X(t)$ 为随机噪声; $s(t)$ 为激光回波信号。

当采用信号迭加时, 可以将 (2) 式写成:

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^n [s_i(t) + X_i(t)] \quad (3)$$

式中, n 为相关过程次数, 这里 n 是每串脉冲激光内含有的脉冲个数。噪声 $X_i(t)$ 的概率密度通常为正态分布函数, 表示为:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, σ^2 为方差, 此处为噪声方差。由于各次随机过程是相互独立的, 噪声是同一探测电路输出, 其特性完全相同, 设为 σ_0 , 因此, 可由概率论求得经 n 次迭加后的噪声方差为:

$$\sigma^2 = n\sigma_0^2 \quad (5)$$

由于激光信号脉宽远大于脉冲移动时间 Δt_i , 所以信号迭加后的强度可以认为是直接相加的结果, 迭加后的信噪比为:

$$S/N = \sqrt{n} (S_0/N_0) \quad (6)$$

式中, S_0/N_0 为单脉冲激光测距的信噪比。由此可见, 每串含有 n 个脉冲激光迭加后的信噪比比单个脉冲情况高 $\sqrt{n}$ 倍。

2.2 波形匹配数字滤波

按 (3) 式进行信号迭加处理后, 采用波形匹配滤波, 将与波形差异大的噪声滤掉。采用单元平均, 得出新的随机过程函数:

$$\eta(t) = \frac{1}{j} \sum_{i=0}^{j-1} \zeta(t - i\tau_0) \quad (7)$$

式中, ζ 由 (2) 式表示; τ_0 为采样时间间隔 (采样周期), 应小于接收电路响应时间; j 为单元内采样次数, 如果设信号脉宽为 τ_s , 则有:

$$j \approx \frac{\tau_s}{\tau_0} \quad (8)$$

根据随机过程理论, 滤波后的噪声方差为:

$$DX(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{j} \sum_{i=0}^{j-1} x(t - i\tau_0) \right]^2 dt \quad (9)$$

经运算后得:

$$DX(t) = \frac{\sigma^2}{j} + \frac{1}{j^2} \sum_{k=0}^{j-1} \sum_{i=1}^{j-1} B_k(i\tau_0) \quad (10)$$

$$B_k(i\tau_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x\{t - i\tau_0\} dt \quad (11)$$

式中, $B_k(i\tau_0)$ 为自相关函数; σ 为均方根噪声值。

采用自相关系数 $R_k(i\tau_0)$ 表示, (10) 式变为

$$DX(t) = \frac{\sigma^2}{j} + \frac{\sigma^2}{j^2} \sum_{k=0}^{j-1} \sum_{i=1}^{j-1} R_k(i\tau_0) \quad (12)$$

$$R_k(i\tau_0) = \frac{B_k(i\tau_0)}{\sigma^2} \quad (13)$$

由于原始噪声脉宽比多个回波信号迭加后的脉宽小得多, 而采样频率周期比电路响应时间小, (12) 式中右边第二项比第一项小得可以忽略。根据噪声随机过程理论, 对于电路的白噪声来说, 自相关函数在 $\Delta t \neq 0$ 时, $B_k(\Delta t) = 0$ 。所以滤波后的噪声均方值可以近似地认为等于 σ^2/j 。

2.3 多帧目标信号相关检测

在重复频率测距时, 在对单帧 (一个脉冲串目标信号为一帧) 脉冲串信号进行相关处理的基础上, 进一步采用多帧目标信号相关处理来降低检测阈值和提高检测概率。多帧目标信号相关检测, 是将当前检测出的目标信号的特征参数与目标链中存储的潜在目标的特征参数进行比较的过程。若当前预选目标与目标链中的某一潜在目标特征参数之差小于允许门限, 则认为两者是匹配的, 属于同一目标。目标的特征参数主要包括灰度、速度和位置等。

2.4 脉冲串激光测距探测能力分析

通常以最小可探测功率来衡量激光测距机的探测能力, 而探测功率又与探测阈值和探测概率直接相关。

探测阈值可以通过要求的平均虚假报警率来获得, 根据赖斯 (Rice) 的噪声理论, 匹配滤波器输出噪声峰值超过探测阈值 I_t 时, 每秒内的平均值虚警率 $\overline{FAR}$ 为^[1]:

$$\overline{FAR} = \frac{1}{2\sqrt{3}\tau_s} e^{-I_t^2/2I_n^2} \quad (14)$$

式中, τ_s 为激光信号脉冲宽度(s); I_n 为均方根噪声电流; I_t 为探测阈值。

在测量时间内, 也就是说激光至目标的往返时间 Δt 内的噪声数 N 为:

$$N = \left(\frac{\tau}{2\sqrt{3}\tau_s} e^{-I_t^2/2I_n^2} \right)^m \cdot \frac{\Delta t}{\tau} \quad (15)$$

式中, m 为参与一次相关检测的帧数; τ 为信号判别时间宽度, 由下式确定:

$$\tau \geq \frac{2mV_{max}}{cF} \quad (16)$$

式中, V_{max} 为预计目标的最大速度; c 为光速; F 为激光重复频率; m 为参与一次检测的帧数。

探测概率 P_d 表示式为^[2]:

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{I_t - I_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (17)$$

式中, I_t 为阈值; I_n 为均方根噪声; I_s 为信号强度; $I_s/I_n = S/N$ 。

为了评估脉冲串激光测距系统的探测能力, 假定要求探测概率 $P_d \geq 90\%$, 虚警率 $N \leq 2\%$, 距离时间 $\Delta t = 666\mu s$ 。脉冲串激光测距与普通单脉冲激光测距技术进行比较如下:

普通单脉冲激光测距: 脉冲信号宽度为 30ns, 由式(15) ($m=1$) 和(17)式计算出最小可检测的 $S/N = 6.33$ 。

脉冲串激光测距: 设每串脉冲数为 3, 迭加后信号宽度 $\tau_s = 40ns$, 判别时间 $\tau = 1\mu s$, 参与一次检测帧数 $m = 5$ 。由(6)和(12)式计算得噪声降低约 1.73 倍, S/N 提高约 5.2 倍, 而从由(15)和(17)式和上述结果计算出最小可检测的原始 $S/N = 0.583$ 。

由以上可以得出: 脉冲串激光测距比普通单脉冲激光测距的探测能力提高约 10.8 倍, 也就是说 10.3dB。目前普通的单脉冲激光测距机的最小可探测功率一般为 $2 \times 10^{-8}W$ 左右, 则脉冲串激光测距机的最小可探测功率为 $2 \times 10^{-9}W$ 左右。

3 试验验证及分析

脉冲串激光测距试验样机的主要参数: 激光重复频率 10Hz, 每次发射 3 个激光脉冲, 脉冲间隔为 300~550 μs ; 激光脉冲峰值功率 20MW 左右; 激光发散角 0.8mrad; 接收口径为 150mm; 探测器采用雪崩光电二极管(APD)。光电跟踪系统精度(r. m. s) 优于 0.2mrad。试验结果如表 1 所列。为了说明测距能力, 与单脉冲激光测距进行对比, 与上述 3 脉冲串相同的测距机参数, 只是采用单脉冲激光发射, 对不同目标的测距情况如表 2 所列。

表 1 脉冲串激光测距机试验结果

飞行目标	目标参数或测量状态	飞行高度(km)	最远测量距离(km)	备注
黑色气球	直径为 60cm	高空	26	
气象气球	直径为 180cm	高空	58~62	红色; 能见度好
民航机		~8	112	测站在机场附近; 仰角: 3.5°
小型战斗机	迎头	8	60~62	能见度好
	迎头	5	46~48	能见度好
	迎头	3	37	一般能见度

表 2 单脉冲激光测距机试验结果

飞行目标	目标参数或测量状态	飞行高度(km)	最远测量距离(km)	备注
黑色气球	直径为 80cm	高空	12~13	
白色气球	直径为 80cm	高空	23	
小型战斗机	迎头	3	22~25	能见度好

从表 1 和表 2 进行对比, 可以认为脉冲串激光测距能力较之单脉冲来说是“跳跃”式提高。两种测距体制的探测能力之比 K , 可以从和上述相同的测距系统参数, 对相同的目标(以歼 6 机为例)与相同测距条件下所得到的最大作用距离求得:

$$K = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{1/4} \cdot e^{2\alpha G(R_1 - R_2)} \quad (18)$$

式中, P_{r1} 为 3 脉冲激光测距的接收功率; P_{r2} 为单脉冲激光测距的接收功率; R_1 为 3 脉冲激光测距的最大作用距离; R_2 为单脉冲激光测距的最大作用距离; α 为大气衰减系数; G 为大气斜程修正系数。以对歼 6 飞机测量为例, 目标高度 3km 的大气斜程修正因子为^[1] $G = 0.37$; 在能见度好, 1.06 μm 波长处大气衰减区按 $\alpha = 0.1km$ 计算。将表中测量距离 $R_1 = 37km$, $R_2 = 25km$ 和上述参数代入(18)式得 $K = 11.66$ 。也就是说 3 脉冲串激光测距体制的最小可探测功率比单脉冲体制小 11.66 倍。这与上述理论分析结果相一致。

4 结束语

以上的理论分析和试验结果表明: 脉冲串激光测距机比普通脉冲激光测距机的探测能力可提高 11 倍以上, 是对长期来脉冲激光测距能力的一大突破。目前脉冲串激光测距技术已成熟, 并已进入军事装备的实用阶段, 相信将在光电火控、远程侦察等军用装备方面得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 无线电公司. 电光学手册[M]. (史斯伍瑛译). 北京: 国防工业出版社, 1978, 9.