

文章编号: 1001-3806(2006)01-0093-03

导弹起飞零时测量方法的仿真研究

刘朝山¹, 周战荣¹, 李育新¹, 汶德胜²

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要: 在采用激光测量导弹起飞零时刻的系统中, 关键的问题是要解决抗强背景光干扰和寻求适应背景不断变化的探测技术。为此提出了一种基于激光脉冲编码、相关检测的自适应门限控制方法, 并给出了最佳判决门限、信噪比和相关峰动态范围之间的解析表达式。研究了最小探测光功率一定时, 信号、噪声的相关峰动态范围 K 和信噪比对探测概率、虚警概率的影响。仿真实验表明, 当相关峰的信噪比为 5.803 dB, $K > 1.4$ 时, 虚警为 10^{-6} , 检测概率为 0.988。

关键词: 激光技术; 相关检测; 自适应门限; 起飞零时

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Correlation detection of the zero time of missile launching

LIU Chao-shan¹, ZHOU Zhan-rong¹, LI Yuxin¹, WEN Desheng²

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China; 2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract A modulated laser detection system is designed to measure the zero time of launching. The best way is to adopt the correlation detection to enhance the signal noise ratio (SNR) and the adaptive threshold which can detect laser echo in the worst environment. The relationship among the optimal threshold level, SNR and the dynamic separation K is deduced. At SNR is 5.803 dB, $K > 1.4$ the detection probability and the false alarm probability are 0.988, 10^{-6} respectively.

Key words laser technique; correlation detection; adaptive threshold; zero time

引 言

经调制的激光照射在弹体上, 一旦导弹起飞, 离开发射座一定距离后, 探测器就探测不到 (或探测到) 反射光, 这一时刻为零时刻。导弹起飞零时为测量部队提供一个测量基准, 便于测量数据的网上交换、数据处理和导弹飞行情况预报。导弹发射要求是全天候的, 发射时大气中弥漫烟雾, 灰尘和强烈的尾焰背景, 激光在其中传播时, 幅值会衰减得很厉害, 并且不同的发射环境其大气综合衰减系数相差 10^3 倍^[1,2], 且存在背景噪声、电路噪声和探测器噪声, 这些因素会造成脉冲式激光探测系统误探测或漏探测。如果简单地提高发射光功率, 则其代价太高, 因为随着发射功率的增大, 半导体激光器的调制和制冷都会变得很困难。作者通过仿真研究, 设计了激光脉冲调制、雪崩二极管 APD 接收的回波信号相关和自适应门限检测技术的方案^[3-8], 解决了抗强背景光干扰和适应背景不断变化的探测技术问题, 确保了系统有较低的虚警概率、较高的探测概率。

1 系统设计要求及构成

系统设计要求: 探测距离 100m, APD 最小探测光功率 2.6×10^{-9} W, 并且能在大气能见度大于 70m (大气单程透过率约为 5×10^{-3}) 时, 系统有近 100% 的探测概率。

设等效噪声光功率量级约为 10^{-9} W, 则最小可探测光信号的信噪比仅有 4.104 dB, 通过仿真发现: 若直接探测, 则达不到高可靠探测的设计要求。最简单、可靠的方法是采用信号相关以提高电路输入信号的信噪比, 设计激光脉冲编码和自适应门限检测技术以提高系统抗干扰能力。

在本系统中以雪崩二极管为探测器, 并采用窄带

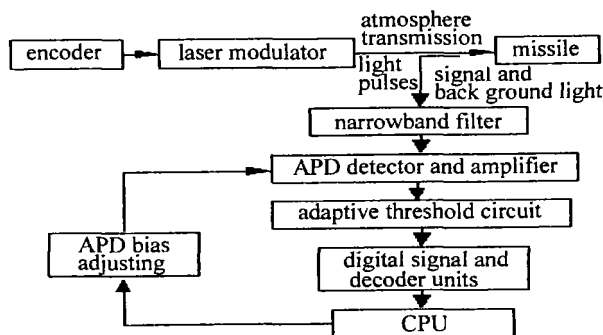


Fig 1 Principle diagram of APD detection system

作者简介: 刘朝山 (1965-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为智能化仪器仪表及自动化测试、光电检测。

E-mail: liuchxian@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-11-03; 收到修改稿日期: 2005-03-22

滤光片,抑制导弹起飞时产生的强背景干扰。为提高探测识别的可靠性,对半导体激光器采用了电流注入调制编码。为增加反射,在激光照射的弹体处贴高反射率薄膜,框图见图 1。

2 相关检测和自适应门限原理

激光脉冲调制波信号的形式为(为了简化,忽略位相因子):

$$x(t) = a \operatorname{rect}(t/T_p) \exp(-j2\pi ft) + n(t) \quad (1)$$

式中, T_p 是脉冲宽度, $n(t)$ 为高斯白噪声, f 为系统的中心角频率; a 是发射波信号的幅值。则任意时刻反射波在相关器输入端引起的电信号:

$$x_i(t - \tau_i) = a_i \operatorname{rect}[(t - \tau_i)/T_p] \exp[-j2\pi f(t - \tau_i)] + n(t - \tau_i) \quad (2)$$

式中, a_i 是反射波信号的幅值, 延时 τ_i 由激光传播距离和电路参数决定。矩形函数:

$$\operatorname{rect}(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq 0.5T_p \\ 0 & |t| > 0.5T_p \end{cases} \quad (3)$$

任意两次(第 i, j 次)反射波信号经相关计算后的信号:

$$R_{ij}(t) = x_i(t)x_j(t - \tau) + x_i(t)n(t - \tau) + x_j(t - \tau)n(t) + n(t)n(t - \tau) \quad (4)$$

其中第 1 项包含信号相关峰:

$$x_i(t)x_j(t - \tau) = a_i a_j \operatorname{rect}[(t - \tau)/T_p'] \exp[-j2\pi f(t - \tau)] \quad (5)$$

式中, T_p' 是回波脉冲宽度, $\tau = \tau_i - \tau_j$, 其余各项由于 $n(t)$ 的不相关性, 取期望后, 其期望值为 0 或趋于 0 且设 $a_i = a_j$, (4) 式可简化为:

$$E(R_{ij}(t)) \approx a^2 \quad (6)$$

而噪声二次互相关后, 取平均 $E\left[\frac{n(t)n(t - \tau)}{2}\right]^2 \approx E(n(t))^2/2$ 信号相关后的平均值不变, 显然, 相关后功率信噪比近似为原来的 2 倍。

经以上分析知道: 相关器输出的信号很复杂, 经数据拟合, 发现其相关峰的包络服从广义瑞利分布^[9]。为了分析方便, 设信号相关主峰幅度为 A , 噪声相关峰最大幅度为 B , 令 $K = A/B$, 设判决门限电压为 V_{th} , 则对信号、噪声单个相关峰的检测概率分别为:

$$P_d = \int_{V_{th}/\sigma^2}^{\infty} \frac{V}{\sigma^2} I_0\left(\frac{AV}{\sigma^2}\right) \exp\left[-\frac{A^2 + V^2}{2\sigma^2}\right] dV$$

$$P_f = \int_{V_{th}/\sigma^2}^{\infty} \frac{V}{\sigma^2} I_0\left(\frac{BV}{\sigma^2}\right) \exp\left[-\frac{B^2 + V^2}{2\sigma^2}\right] dV \quad (7)$$

式中, V 为电压, σ^2 噪声方差, I_0 为第一类零阶修正贝塞尔函数。即包络幅值大于 V_{th} , 判决为“1”的概率。对于信号相关峰而言, P_f 实际上是虚警概率。同理, 当返回脉冲的实际编码为“1”, 被错误地判决为“0”时, 称为漏检概率 $1 - P_d$ 。若每周期内有 1 个噪声峰,

且信号、噪声峰等概率分布, 则判决器的误判概率 P_e 为:

$$P_e = \frac{1}{2}(1 - P_d) + \frac{1}{2}P_f = \frac{1}{2}(1 - P_d + P_f) \quad (8)$$

由此可见: 当信号、噪声峰幅度确定时, V_{th} 越高, 漏检概率 $1 - P_d$ 越大, P_f 越小; V_{th} 越低, $1 - P_d$ 越小, P_f 越大。因此, 判决器存在最佳门限 $V_{th, opt}$ 令:

$$\frac{dP_e}{dV_{th}} = 0 \quad (9)$$

由于 I_0 函数没有解析表达式, 上式准确求解比较困难。在所设计的系统中, 由于信噪比较大, 有 $AV \gg \sigma^2$, $BV \gg \sigma^2$, 于是第一类零阶修正贝塞尔函数可近似为:

$$I_0\left(\frac{AV}{\sigma^2}\right) \approx \frac{e^{AV/\sigma^2}}{\sqrt{2\pi AV/\sigma^2}}, \quad I_0\left(\frac{BV}{\sigma^2}\right) \approx \frac{e^{BV/\sigma^2}}{\sqrt{2\pi BV/\sigma^2}} \quad (10)$$

(9) 式可写为:

$$\frac{V}{\sqrt{2\pi AV/\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(A - V)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{V}{\sqrt{2\pi BV/\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(B - V)^2}{2\sigma^2}\right],$$

$$V_{th, opt} = \frac{A + B}{2} + \frac{\sigma^2 \ln K}{2(A - B)} \quad (11)$$

显然它会随输入信号强度的变化而变化, 自适应门限的原理框图见图 2。

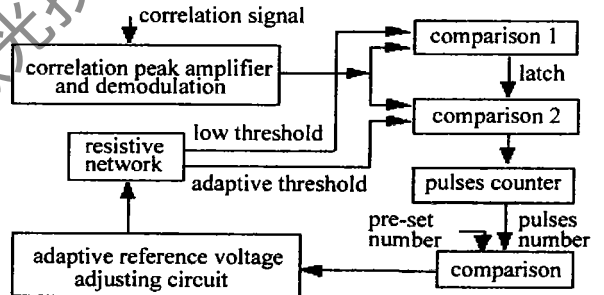


Fig 2 Principle diagram of adaptive threshold

比较器 1 设置为低门限, 它的输出是比较器 2 的选通控制信号, 是为了在无相关峰时滤除噪声干扰, 比较器 2 设置为自适应门限, 其值由自适应参考电压经电阻分压网络产生。如相关峰电压高于比较器 2 的门限值 V_{th} , 脉冲计数器增加 1, 如果门限设置得合适, 在设定的时间内, 计数器的值 N 刚好等于预定的数目 N_0 (作者采用 8 位脉冲编码 10010101, $N_0 = 4$)。如果 $N < N_0$, 表明 V_{th} 偏高, 通过参考电压调整电路使 V_{th} 变小, $V_{th}(t + \Delta t) = V_{th}(t) - \Delta V_{th}$, 其中 ΔV_{th} 可由信号相关峰的变化量决定, 例如 $\Delta V_{th} = (A_{max} - A_{min})/2$, 反则反之。这一调整过程总能自动地跟随噪声变化, 速度非常快, 完全能满足实时要求。

3 仿真结果

采用 MATLAB 6.1 中的 SMULNK, 仿真程序可改变脉冲幅度和宽度、信噪比、采样频率等, 验证了基于相关的自适应门限测量系统在不同的信噪比时, 门

限电压、信号动态 K 和检测概率、虚警概率的关系。

按照系统设计要求: 探测距离为 100m, 大气单程透过率 η_a 取值范围为 $5 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$ (参见文献 [4]), 上限对应的大气能见度约为 70m。激光器发射瞬时功率 $P_i = 30\text{mW}$, $\eta_e = \rho = \eta_r = 0.7$, $\eta_l = 1.0$ 到达 APD 的光功率 $P_s = P_i \eta_e \eta_r \eta_l \eta_a^2 \rho$ 其中, η_e 是光束透过发射透镜时的传输率, η_r 是光束透过接受透镜时的传输率, η_l 为窄带滤光片峰值透过率, ρ 是弹体表面的反射率。计算结果见图 3。设噪声峰值功率量级约为 10^{-9}W , 则对应的输入信号的功率信噪比范围为 4 104dB~ 10 124dB。经相关处理后, 功率信噪比范围增大近 2 倍, 且信号与噪声相关峰值比值 K 范围为 1.4~ 3.2。

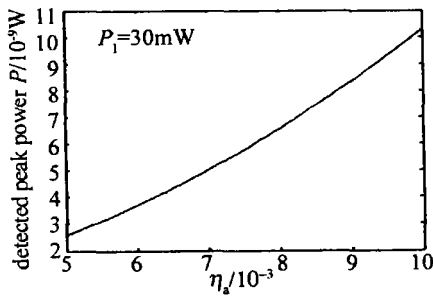


Fig 3 Relationship between the detection power and atmospheric attenuation

图 4 中给出了采样周期为 $10\mu\text{s}$ 采样点数为 1000

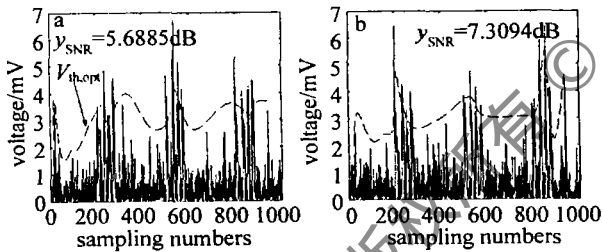


Fig 4 The correlation signal and optimal threshold voltage

的含噪相关信号, 脉冲宽度 $0.1\mu\text{s}$, 两相邻脉冲串间隔 $3\mu\text{s}$ 同时还给出了最佳自适应门限电压曲线, 其中信号与噪声相关峰比值 K 范围为 1.4~ 4.0。从图上可以看到, 单个信号相关峰还存在高频噪声, 呈现为多个峰, 判断其为“1”时需结合脉冲的宽度和位置信息, 避免错判为多个“1”。另外, 当探测到一组信号脉冲串后, 实际的门限电压很快下降至 0 (经过反相), 持续时间小于 $3\mu\text{s}$ 。总的来说, (11) 式为自适应门限的电路参数的设计、调试提供了很好的依据。

当 $K = 1.4$ 时, 信噪比为 4 104dB, 探测概率仅为 0.80 虚警概率为 10^{-3} , 这近似对应直接探测情况; 经相关处理后, 相关峰的信噪比下限为 5 803dB, 经过 10^7 仿真计算: 只要 $K \geq 1.4$, 探测概率就大于 0.988,

虚警概率小于 10^{-6} 。结果见图 5a 图 5b。另外, 当信噪比相同时, K 值越大, 探测效果就越好。若连续探测 3 个以上的脉冲串, 再作简单少数服从多数的判决, 探测概率就可达 100%。

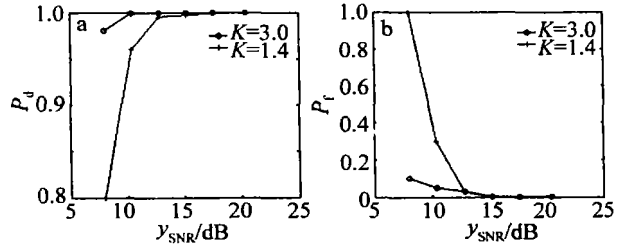


Fig 5 The detection probability and the false alarm probability of adaptive threshold

4 结论

为了保证测量导弹起飞零时的高可靠性, 采用了双重抗干扰技术, 一是对半导体激光器发射的激光进行调制编码, 二是对 APD 探测到的回波信号作相关运算得到相关峰, 采用自适应门限控制技术。理论分析和仿真、试验的结果是一致的。当相关峰的信噪比大约 5 803dB, $K \geq 1.4$ 时, 系统的虚警概率为 10^{-6} , 探测概率为 0.988。这一方法可广泛用于激光引信、测距等领域。

参考文献

- [1] ZHOU B K. The principle of laser[M]. Beijing National Defence Industry Press, 1984. 265 (in Chinese).
- [2] ZHU X M, KAHN J M. Free space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Trans Commun, 2002, 50 (8): 1293~ 1300.
- [3] ERNESTO G. Noise characteristics of avalanche photodiode arrays of the bevel edge type [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(7): 1587~ 1594.
- [4] KANG J, LIM Zh, SU I Zh et al. Fidelity of optical pulses under current modulation semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2002, 26 (4): 567~ 568 (in Chinese).
- [5] ZHAO J J, HOU Y D. Design of computer simulation system for archibald firing training [J]. Laser Technology, 2003, 27 (6): 567~ 568 (in Chinese).
- [6] JIANG L J, ZHU D W. Designing for 4km terrestrial line-sight optical free space communication systems [J]. Optical Communication Technology, 2000, 20(3): 219~ 222 (in Chinese).
- [7] FENG L L. Method of simulated testing of pulse laser range finder [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 127~ 129 (in Chinese).
- [8] ARNON S, KOPEK A N S. Effect of particulates on performance of optical communication in space and an adaptive method to minimize such effects [J]. Appl Opt, 1994, 33(21): 4930~ 4937.
- [9] LIU N A, ZENG X W, GUO F et al. Technique and performance of adaptive threshold for high speed burst communication [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1): 111~ 114 (in Chinese).