

文章编号: 1001-3806(2004)05-0527-04

## 激光信号处理器的检测和虚警概率分析

平庆伟,何佩琨

(北京理工大学 电子工程系,北京 100081)

**摘要:** 激光测距机模拟信号处理器不能利用多个脉冲之间的相关信息,所以目标检测能力有限。而激光测距机数字信号处理器可以利用多个脉冲之间的相关信息。目标匹配和跟踪算法利用多个脉冲之间的相关信息,降低了目标检测门限,提高了测距范围。就该算法对目标检测的虚警概率和检测概率进行了分析,证明了该算法的有效性。

**关键词:** 激光测距机;检测概率;虚警概率;目标跟踪

**中图分类号:** P225.2 **文献标识码:** A

### Detecting probability and false alarming rate study of digital signal processor of laser ranger

PING Qing-wei, HE Pei-kun

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The analogical signal processor of the laser ranger can not make use of the interrelated information between pulses. Therefore, checking the target is limited. The digital signal processor of the laser ranger can make use of the interrelated information between pulses. The target matching and tracking algorithm makes use of the interrelated information, decreases the threshold and increases the range. This paper studies the false alarming rate and detecting probability and proves that this algorithm is effective.

**Key words:** laser ranger; checking probability; false alarming rate; target track

## 引 言

在激光测距机的体积和重量受到严格限制的情况下,不能简单地通过增加激光发射机的功率来增加测距范围,只能提高信号处理机的目标检测能力,使得信号处理机能够在更小的系统输入信噪比下检测出目标,从而提高测距机测距范围。然而,激光测距机不同于微波雷达,它有自己独特的技术特点。首先,激光测距机的发射脉冲很窄,即使考虑到大气传输和目标反射对目标回波信号的展宽,回波信号的脉冲宽度也只有 18ns 左右;其次,受到雪崩二极管响应速度较慢的限制,激光接收机的系统带宽较窄,实验中采用的激光测距机的系统带宽小于 50MHz,所以激光测距机是一个窄带系统,雪崩二

极管就相当于一个低通滤波器;再次,远程激光测距机受激光电源充电时间和激光器散热的限制,发射脉冲的重复频率低,不超过 10Hz<sup>[1,2]</sup>。所以,接收信号已经经过了滤波,这使得以后的数字信号处理难以提高信噪比。而且,激光测距机的脉冲宽度窄、重复频率低,优点是距离分辨率高,缺点是不能采用微波雷达的信号积累技术来提高信噪比。因此,激光测距机必须在信噪比难以提高的情况下,将弱目标回波信号从噪声中检测出来,同时又要满足系统的目标检测概率和虚警概率的要求。激光噪声呈现高斯分布,如果目标的检测阈值设定为 3 倍的噪声方差,这就造成了很大的虚警概率。单个激光脉冲目标检测的虚警概率达到 0.13%,这样高的虚警概率在实际应用中是不能接受的。这是激光测距机的数字信号处理的技术难点,也是笔者所要解决的技术问题。

基金项目:国家自然科学基金资助项目  
(51438050103BQ0101)

作者简介:平庆伟(1971-),男,博士,目前从事实时信号处理的研究。

E-mail: pingqingwei@163.com

收稿日期:2003-08-09;收到修改稿日期:2003-09-23

## 1 目标匹配和跟踪

### 1.1 目标匹配

实际的目标,不论是静止目标,还是运动目标,

它的多个回波信号之间是存在着相关性的。例如信号的幅度、目标的位置和目标的速度等。假设激光雷达的脉冲重复频率为 1Hz,被测量的目标是类似飞机这样的目标,那么上一次的测量距离为 20km 的目标,当前测量的距离不可能为 1km。由此可以识别两个激光脉冲检测出的若干个目标中,哪两个可能是同一个目标,哪两个不可能是同一个目标。对于真实的目标,每一次都应该被检测到。而噪声产生的虚假目标,则不会是这样。所以,通过连续多次地目标观测,可以剔除虚假目标,而保留真实的目标。这样就降低了系统的虚警概率,这就是目标匹配和跟踪所起到的作用。

目标匹配是将当前潜在目标(所谓潜在目标,是指可能是真实的目标,也可能是噪声产生的虚假目标)的特征参数与目标链中存储的以往检测到的各个潜在目标特征参数进行比较的过程。若当前潜在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。目标的匹配主要是指速度匹配和位置匹配等,现以位置匹配进行说明。

设  $X_{k-1}$  为目标链中某一潜在目标在第  $k-1$  帧时的位置,  $X_k$  为当前帧(第  $k$  帧)某一潜在目标的位置,若:

$X_k \in [X_{k-1} + v \cdot T_{\text{prf}} - W/2, X_{k-1} + v \cdot T_{\text{prf}} + W/2]$  则为两个目标的位置匹配。式中,  $v$  为目标的径向运动速度;  $T_{\text{prf}}$  为激光脉冲重复周期;  $W$  为匹配窗口的宽度。目标第 1 次被检测到时,设  $v=0, W=2 \cdot v_{\text{max}} \cdot T_{\text{prf}}$ ,其中  $v_{\text{max}}$  是目标的最大可能速度。下一帧再次被检测到时,可通过两帧的距离差计算出目标速度,以后用该速度预测目标下一次的位置。开始几帧的速度被认为是不可靠的,故匹配窗口的宽度不变。从第 5 帧开始,匹配窗口逐渐变窄。 $W$  的计算见下式:

$$W = 2 \cdot v_{\text{max}} \cdot T_{\text{prf}} / \text{置信度} \quad (2)$$

这样,随着目标置信度的增加,目标特性匹配也越来越苛刻。

一旦目标匹配成功被认定为是同一目标,则该目标的置信度加 1。前一个脉冲的潜在目标若没有匹配成功,则认为该潜在目标是噪声,并将其丢弃。当前脉冲的没有匹配成功的潜在目标继续保留,以便与下一个脉冲的潜在目标进行匹配。通过若干帧的目标匹配后,真实目标的置信度会达到要求的值,此时,认定这是一个真实的目标,将其距离输出。只有置信度达到 10,才判定该目标为真实目标。

## 1.2 利用目标距离信息的跟踪方法

第 1 次检测到目标之后,目标的位置是可知的,但目标的径向速度是未知的。在连续两次检测到目标之后,就可知道目标的径向速度和位置信息。可以利用已知的径向速度和位置信息,计算目标在下一个脉冲时的位置。在下次目标匹配时,将跟踪窗调整到预计目标会出现的位置。并且,跟踪窗开始是最宽的,随着目标被检测到的次数的增加,跟踪窗不断变小。以有利于更精确的目标匹配。这种方法直观、简单,而且运算次数少,没有乘法运算。

## 2 多脉冲目标检测的虚警概率和检测概率

单个激光脉冲的虚警概率为 0.13%,信噪比为 3 时的检测概率为 50%<sup>[3]</sup>。这样的指标对于实际的系统是不能接受的。在多个脉冲目标匹配之后,系统的检测概率和虚警概率发生了相应的变化,下面就讨论多脉冲的目标检测的虚警概率和检测概率。

### 2.1 多脉冲目标检测的虚警概率

在软件的设计中,将连续  $M$  次被检测到的目标认定为真实目标,所以,当发射的脉冲个数小于  $M$  时,目标的虚警概率必然为 0。当  $M \leq n \leq 2M$  时,系统的虚警概率为:

$$P_f(n) = p_{\text{if}}^M + (1 - p_{\text{if}})(n - M)p_{\text{if}}^M \quad (3)$$

式中,  $p_{\text{if}}$  为单个脉冲的虚警概率;  $P_f(n)$  为表示  $n$  个脉冲的虚警概率。

当  $n > 2M$  时,目标的虚警概率为:

$$P_f(n) = p_{\text{if}}^M + M(1 - p_{\text{if}})p_{\text{if}}^M + \sum_{i=1}^{n-2M} [1 - P_f(M+i)]p_{\text{if}}^M \quad (4)$$

综上所述,多脉冲的目标虚警概率为:

$$P_f(n) = \begin{cases} 0 & (n < M) \\ p_{\text{if}}^M + (1 - p_{\text{if}})(n - M)p_{\text{if}}^M & (M \leq n \leq 2M) \\ p_{\text{if}}^M + M(1 - p_{\text{if}})p_{\text{if}}^M + \sum_{i=1}^{n-2M} [1 - P_f(M+i)]p_{\text{if}}^M & (n > 2M) \end{cases} \quad (5)$$

则  $P_f(n)$  的曲线如图 1 所示。图中横坐标为脉冲个数  $n$ ,纵坐标为目标虚警概率  $P_f(n)$ 。图中曲线是  $M=10$  时,多脉冲目标检测的虚警概率。由图中的曲线可以看出,当  $M=10$  时,多脉冲检测的虚警概率随着脉冲个数  $n$  的增加而增加。但是,由于  $p_{\text{if}}$  很小,所以多个脉冲的虚警概率增加的速度很慢,而且虚警概率很小,基本上可以忽略不计。所以,多脉冲

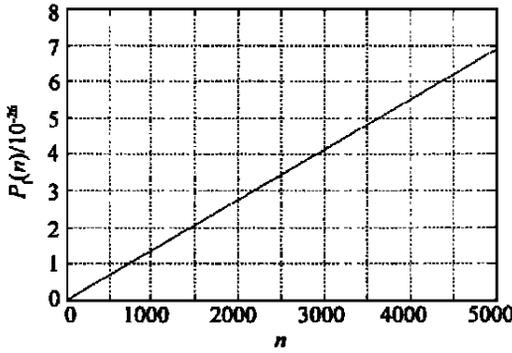


Fig. 1 The relation between  $P_T(n)$  and  $n$

目标匹配跟踪,可以极大的抑制由于降低目标检测阈值,而产生的高虚警概率。

### 2.2 多脉冲目标检测的检测概率

在  $n$  个激光脉冲的检测中,连续  $M$  次检测出目标,即可以捕获目标。所以,当发射的脉冲个数小于  $M$  时,目标的检测概率必然为 0。如果  $M \leq n \leq 2M$ ,则目标的检测概率为:

$$P_d(n) = p_{1d}^M + (1 - p_{1d})(n - M)p_{1d}^M \quad (6)$$

式中,  $p_{1d}$  为单个脉冲的目标检测概率;  $P_d(n)$  表示  $n$  个脉冲检测出目标的概率。

当  $n > 2M$  时,目标的检测概率为:

$$P_d(n) = p_{1d}^M + (1 - p_{1d})Mp_{1d}^M + \sum_{i=1}^{n-2M} [1 - P_d(M+i)]p_{1d}^M \quad (7)$$

综上所述,多脉冲的目标检测概率为:

$$P_d(n) = \begin{cases} 0 & (n < M) \\ p_{1d}^M + (1 - p_{1d})(n - M)p_{1d}^M & (M \leq n \leq 2M) \\ p_{1d}^M + M(1 - p_{1d})p_{1d}^M + \sum_{i=1}^{n-2M} [1 - P_d(M+i)]p_{1d}^M & (n > 2M) \end{cases} \quad (8)$$

如果激光雷达的目标回波的信噪比为 3,则可知单个脉冲的目标检测概率为 50%。目标检测概率与发射脉冲的个数之间的关系如图 2 所示。图中横坐

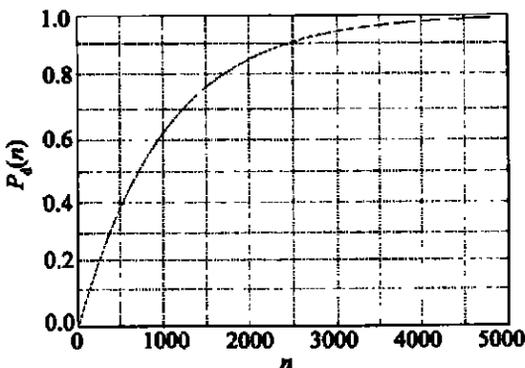


Fig. 2 The relation between  $P_d(n)$  and  $n$

标为脉冲个数  $n$ ,纵坐标为目标检测概率  $P_d(n)$ 。

图中曲线是  $M = 10$  时,多脉冲目标检测概率。

由图中曲线可以看出,随着激光脉冲个数  $n$  的增加,目标的检测概率逐渐地逼近 1。而虚警概率的增加很慢,虚警概率的数值也很小。这意味着,激光雷达系统可以通过增加观测时间的办法,提高检测概率,抑制虚警概率。由此可知,当观测时间不受限制时,所有目标回波信号的信噪比达到 3 的,都可以被检测出。但是,随着  $M$  的增加,捕获目标所需要的时间也越来越长(见下面的讨论)。所以,对于信噪比为 3 的静止目标,还可以计算出捕获目标所需要的平均时间。

### 2.3 捕获静止目标需要的平均时间

计算捕获静止目标所需要的平均时间,首先要知道第  $n$  个激光脉冲捕获目标的概率。第  $n$  个激光脉冲捕获目标的概率计算如下。

当  $n = M$  时,第  $n$  个激光脉冲捕获目标的概率为:

$$P_M(n) = p_{1d}^M \quad (9)$$

式中,  $P_M(n)$  为当  $M$  一定时,第  $n$  个脉冲捕获目标的概率。

当  $M < n \leq 2M$  时,第  $n$  个脉冲捕获出目标的概率为:

$$P_M(n) = (1 - p_{1d})p_{1d}^M \quad (10)$$

当  $2M < n$  时,第  $n$  个脉冲捕获出目标的概率为:

$$P_M(n) = [1 - P_d(n - M)]p_{1d}^M \quad (11)$$

式中,  $P_d(n)$  为  $n$  个激光脉冲捕获目标的概率。

所以,当目标回波信号的信噪比为 3 时,捕获目标所需要的平均脉冲个数为:

$$N(M) = \sum_{n=M}^{\infty} n P_M(n) \quad (12)$$

捕获目标所需要的平均脉冲个数越多,意味着捕获目标需要的时间越多。这是目标匹配跟踪算法必须付出的代价。若脉冲重复频率为 10Hz,则当  $M = 11$  时,激光测距机捕获一个静止目标,平均需要耗时 154s;若脉冲重复频率为 1Hz,则当  $M = 11$  时,激光测距机捕获一个静止目标,平均需要耗时 1542s。故在实际应用中需要选取一个合适的  $M$  值,见表 1。

Table 1 The relation between  $N(M)$  and  $M$

|        |          |          |          |          |           |
|--------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| $M$    | 2        | 3        | 4        | 5        | 6         |
| $N(M)$ | 4.7500   | 9.3750   | 17.9375  | 34.4688  | 66.9844   |
| $M$    | 7        | 8        | 9        | 10       | 11        |
| $N(M)$ | 131.4922 | 259.9956 | 515.8248 | 984.8703 | 1542.7000 |

### 2.4 匀速运动目标的平均截获距离

对于向着激光雷达飞来的目标,目标回波信号

的信噪比是不断增强的。激光雷达在什么距离上截获目标,每次都是不同的。目标的截获距离是一个随机变量,所以,存在一个平均截获距离的概率函数  $P_R(R)$ 。因此,也存在平均截获距离:

$$\bar{R} = \int_0^{\infty} RP(R) dR \quad (13)$$

式中,  $P(R)$  为截获距离的概率函数;  $\bar{R}$  为平均截获距离。

由前面的讨论可以看出,  $M$  的选择可以影响到平均截获距离。  $M$  过大会降低目标的平均截获距离,这意味着激光雷达的迎面作用距离的减小。如果  $M$  过小,又可能使激光雷达的虚警概率过大。所以  $M$  的选择,需要在这两者之间折中。

### 3 实验结果

激光雷达的模拟信号处理器只能进行简单信号处理,对于利用多个激光脉冲之间的相关信息这样的复杂算法,模拟信号处理器是无能为力的。而数字信号处理技术,可以克服这样的不足。在采用数字信号处理器后,系统目标检测能力得到显著的改善。图3是激光测距机在采用数字信号处理器后,

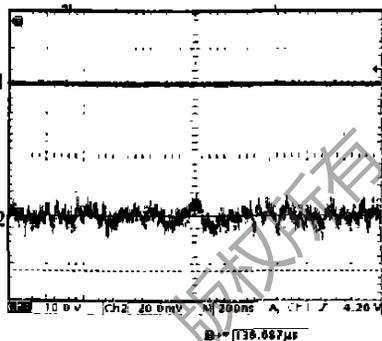


Fig. 3 The result of the experiment

在系统目标检测能力的临界状态时,500MHz示波器采集的回波信号。被检测目标是20.5km处的一座楼房,显示在显示器中央的是目标回波信号,经过了136.687μs的延迟。

对某型飞机进行了运动目标的飞行测试。共进行了5个进入和5个远离飞行。测试现场的低空能见度为8km,测试结果为:迎头截获距离为16km,尾追距离为20km。最好的数据是迎头截获距离为18km,尾追距离为23km。采用模拟信号处理器的激光测距机的测试结果为:迎头截获距离和尾追距离都大约为12km。并且,在测试过程中没有出现虚警。系统性能的提高是显而易见的。

### 4 结论

讨论了目标的匹配和跟踪算法的原理,以及采用该算法的目的。为了提高检测目标的能力,将检测阈值降低,从而使目标检测的虚警概率很高。在本文中通过目标的匹配和跟踪,抑制了目标检测的虚警概率。但是,付出的代价是检测目标所花费的时间。最后,对系统的检测概率和虚警概率进行理论分析和推导,并且提出了平均捕获时间和平均截获距离的概念。最后,对现场实验结果进行了介绍。实验结果也证实目标匹配和跟踪算法,的确大大改善了激光测距机的测距性能。

#### 参考文献

- [1] 阎吉祥,龚顺生,刘智深. 环境监测激光雷达 [M]. 北京:科学出版社,2001. 17~41.
- [2] 巴克曼 C G. 激光雷达系统与技术 [M]. 北京:国防工业出版社,1982. 6~19.
- [3] 潘承毅,何迎晖. 数理统计的原理与方法 [M]. 上海:同济大学出版社,1993. 453~454.
- [4] 戴柄明,张 维,李东石. 脉冲激光测距机的测距误差分析 [J]. 激光技术,1999,23(1):50~52.
- [5] 霍玉晶,陈千颂,潘志文. 脉冲激光雷达的时间间隔测量综述 [J]. 激光与红外,2001,31(3):136~139.
- [6] 杨成伟,陈千颂,林 彦 *et al.* 脉冲激光测距时间间隔测量及误差分析 [J]. 红外与激光工程,2003,32(2):123~126.
- [7] KALISZ J, SZPLET R, PELKA R *et al.* Single-chip interpolating time counter with 200ps resolution and 43s range [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(4): 851~856.

(上接第523页)

#### 参考文献

- [1] 张景波,刘昭度,齐志权 *et al.* 汽车自适应巡航控制系统的发展 [J]. 车辆与动力技术,2003,90(2):44~49.
- [2] 卢 红,沈顺成,张新宝 *et al.* 汽车防撞的激光监控系统设计 [J]. 武汉汽车工业大学学报,1997,19(3):5~7.
- [3] SAMMAN A, RIMAI L, McBRIDE J R *et al.* Potential use of near, mid and far infrared laser diodes in automotives LIDAR applications [A]. IEEE Vehicular Technology Conference [C].