

基于序贯检验的激光主动成像目标探测方法

李晓峰¹ 徐 军¹ 罗积军¹ 曹立佳¹ 张胜修¹ 张 盈²

(¹第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)
(²第二炮兵 96669 部队, 北京 102208)

摘要 针对激光主动成像图像信噪比较低、目标难以被实时探测和识别的问题,提出了一种多通道序贯概率比检验(SPRT)的激光主动成像目标探测方法。基于原始观测数据,构造对数似然比检验,给出似然比判据及阈值的计算方法。结合激光主动成像的多通道特性,采用序贯概率比检验,在给定虚警概率和检测概率的情况下,对仿真的强度像和距离像通道进行探测。理论分析和实验结果表明,该方法能够实现对激光主动成像图像中目标的可靠检测,且具有检验速度快、所需样本少以及可在线计算等优点,可以满足激光主动成像制导中目标探测的准确性和实时性要求。

关键词 图像处理;激光主动成像;序贯概率比检验;目标探测

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0908007

Sequential Detection of Targets in Laser Active Imaging System

Li Xiaofeng¹ Xu Jun¹ Luo Jijun¹ Cao Lijia¹ Zhang Shengxiu¹ Zhang Ying²

(¹The Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710025, China)
(²96669 Troops of the Second Artillery, Beijing 102208, China)

Abstract To solve the target detection problem caused by the low signal-to-noise ratio (SNR) of the laser active imaging system, a multichannel sequential detection algorithm is presented. Based on the original observed data, the calculation for judging threshold of laser active imaging system is proposed according to the generalized log-likelihood ratio. The multichannel characteristics of laser active imaging system are considered and the sequential probability ratio test (SPRT) is implemented to detect the targets in intensity image channel and range image channel, while controlling the rates of false alarms and missed detections. Theoretical analysis and experimental results show that the performance of the multichannel sequential detection algorithm is excellent. The results allow us to conclude that the use of the sequential detection algorithm substantially reduces the required time and the sample size of the system. This new target detection method satisfies the accuracy and real time requirements for laser active imaging guidance.

Key words image processing; laser active imaging; sequential probability ratio test; target detection

OCIS codes 040.1880; 100.2000; 110.2970

1 引 言

现代战争日益复杂的战场环境对精确制导武器的性能提出了越来越高的要求。激光主动成像能够对目标强度、距离和速度等特征进行多次测量,实时获得目标的多种三维图像(强度像、距离像、多普勒像),已经成为一种在复杂战场环境下对目标进行精

确探测识别的新兴制导技术手段^[1~4]。由于制导任务的实时性,要求激光主动成像系统以高检测概率和低虚警概率的标准,探测出潜在待识别目标的存在及其准确位置^[5]。在实际应用中,由于远距离成像接收到的目标激光回波能量较弱,噪声和背景杂波在视场中所占比例较大,从而导致图像信噪比

收稿日期: 2011-04-12; 收到修改稿日期: 2011-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(60874093)资助课题。

作者简介: 李晓峰(1982—),男,博士研究生,主要从事激光主动成像制导方面的研究。

E-mail: xiaofeng_li2006@126.com

导师简介: 张胜修(1963—),男,博士,教授,主要从事导航、制导与控制方面的研究。E-mail: zsx1963@yahoo.com.cn

$$\left. \begin{cases} \nu_i(b_1) = \min\{n \geq 1 : Z_i(n) \geq b_1\} \\ \nu_{0,i}(b_0) = \min\{n \geq 1 : Z_i(n) \leq -b_0\} \end{cases} \right\}, \quad (9)$$

则多通道概率比检验过程 $\hat{\delta} = (\hat{\tau}, \hat{d})$ 定义为

$$\begin{aligned} \hat{\tau}(b_0, b_1) &= \min\{\hat{\tau}_1(b_1), \hat{\tau}_0(b_0)\}, \\ \hat{d} &= \begin{cases} 1 & \hat{\tau} = \hat{\tau}_1 \\ 0 & \hat{\tau} = \hat{\tau}_0 \end{cases}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\hat{\tau}_1 = \min_{1 \leq i \leq N} \nu_i$, $\hat{\tau}_0 = \max_{1 \leq i \leq N} \nu_{0,i}$ 。停止时刻 $\hat{\tau}$ 对应的决策规则为：

1) 如果至少一个统计量 $Z_i(n) \geq b_1$, $\hat{d} = 1$, 目标存在；

2) 如果所有统计量 $Z_i(n) \leq -b_0$, $\hat{d} = 0$, 目标不存在。

对于 $\delta_i = (t_i, d_i)$, 应用 SPRT 对 H_1 和 H_0 进行检验：

$$\begin{aligned} t_i(b_0, b_1) &= \min\{n \geq 1 : Z_i(n) \notin (-b_0, b_1)\}, \\ d_i &= \begin{cases} 1 & Z_i(t_i) \geq b_1 \\ 0 & Z_i(t_i) \leq -b_0 \end{cases}. \end{aligned} \quad (11)$$

令 $\alpha_i = \mathbf{P}_0(d_i = 1)$, $\beta_i = \mathbf{P}_1(d_i = 0)$ 为对应的误差概率。由于不同通道间的观测数据相互独立, 因此不同通道的统计量 $Z_i(n)$ 是相互独立的[见(5)式、(6)式], 由此可得虚警率 $\hat{P}_{FA} = \mathbf{P}_0(\hat{d} = 1)$ 和漏检率 $\hat{P}_{MS,i} = \mathbf{P}_i(\hat{d} = 0)$ 分别为

$$\begin{aligned} \hat{P}_{FA} &= 1 - \prod_{k=1}^N (1 - \alpha_k), \\ \hat{P}_{MS,i} &= \beta_i \prod_{k=1, k \neq i}^N (1 - \alpha_k). \end{aligned} \quad (12)$$

假定 $\mathbf{P}_i(t_i < \infty) = 1$, $\mathbf{P}_0(t_i < \infty) = 1$, 利用上界 $\alpha_i \leq \exp(-b_1)$ 和 $\beta_i \leq \exp(-b_0)$, 可得^[12]

$$\begin{aligned} \hat{P}_{MS,i} &\leq \exp(-b_0), \\ \hat{P}_{FA} &\leq 1 - [1 - \exp(-b_1)]^N. \end{aligned} \quad (13)$$

由(13)式可得阈值为

$$b_0 = \lg(1/P_{MS}), \quad b_1 = \lg[1 - (1 - P_{FA})^{1/N}]^{-1}. \quad (14)$$

由(14)式可知, 当 $P_{FA} \rightarrow 0$ 时, $b_1 = \lg(N/P_{FA}) + o(1)$, 其中, $o(1) \rightarrow 0$ 。

当 $b_0, b_1 \rightarrow \infty$ 时, 文献[13]给出了 α_i 和 β_i 的精确估计式为

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \gamma_i \exp(-b_1) [1 + o(1)], \\ \beta_i &= \gamma_{0,i} \exp(-b_0) [1 + o(1)], \end{aligned} \quad (15)$$

式中

$$\gamma_i = \Delta_i / D_{i,0}, \quad \gamma_{0,i} = \Delta_i / D_{0,i}$$

$$\Delta_i = \exp\left\{-\sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \{\mathbf{P}_0[W_i(n) > 0]\} +$$

$$\mathbf{P}_i[W_i(n) < 0]\}. \quad (16)$$

此时, 虚警概率和漏检概率的估计式为

$$\begin{cases} \hat{P}_{FA} = \left\{1 - \prod_{k=1}^N [1 - \gamma_k \exp(-b_1)]\right\} [1 + o(1)] \\ \hat{P}_{MS} = \left\{\gamma_{0,i} \exp(-b_0) \prod_{k=1, k \neq i}^N [1 - \gamma_k \exp(-b_1)]\right\} \\ \quad [1 + o(1)]. \end{cases} \quad (17)$$

根据文献[13], 当 $D_{0,i} = D_{i,0} = q/2$ (q 表示平均信噪比) 时, 该探测算法是渐进最优的。此时, 由(8)式可得该算法的 ASN 为

$$\begin{cases} \bar{\tau}_1(P_{FA}, P_{MS}, q) \approx \max(1, 2b_1/q) \\ \bar{\tau}_0(P_{FA}, P_{MS}, q) \approx \max(1, 2b_0/q) \end{cases}. \quad (18)$$

3.3 基于多通道序贯概率比检验的激光主动成像目标探测方法

在应用多通道 SPRT 对激光主动成像图像进行目标探测时, 采用单像素噪声统计模型进行建模^[16]。设 r 为图像中某一像素对应的距离测量值, r^* 为该像素的距离真实值, 则 $r = R, r^* = R^*$ 的条件概率密度函数(PDF)为

$$p_{r|r^*}(R|R^*) = [1 - P_r(A)] \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_R^2}} \exp\left\{-\frac{(R - R^*)^2}{2\sigma_R^2} + \frac{P_r(A)}{\Delta R}\right\}, \quad (19)$$

式中 $P_r(A)$ 为距离测量异常概率, $P_r(A) = R_{CN}^{-1}(\lg N - 1/N + 0.557)$, 其中 R_{CN} 为载噪比, $N \equiv \Delta R / R_{res}$ 为距离分辨单元数量, ΔR 为距离测量范围, R_{res} 为距离分辨力, $\sigma_R = R_{res} / \sqrt{R_{CN}(n)}$ 为局部距离精度, 其中

$$R_{CN}(n) = \frac{\eta P_T \rho A_R \epsilon_{opt} \epsilon_{het}}{h\nu B \pi} \frac{\exp[-2\alpha\mu(n)]}{\mu^2(n)}, \quad (20)$$

式中 α 为大气消光系数, ϵ_{opt} 为接收系统光学效率, ϵ_{het} 为接收器外差效率, η 为探测器量子效率, $h\nu$ 为光子能量, ρ 为目标反射率, B 为中频(IF)滤波器带宽, P_T 为峰值发射功率, A_R 为接收器孔径面积。(19)式的第一项为局部距离变化, 等于测量正常概率乘以均值为 R^* 、标准差为 σ_R 的高斯密度函数; 第二项为全局距离变化, 等于异常概率乘以距离测量范围 ΔR 内的一个平均分布。

如前所述, H_0 对应于目标不存在, 则 t_n 时刻的观测数据仅含有背景杂波, 背景对应的距离真值为 $R^{n,b}$ 。 H_1 对应于目标存在, 则 t_n 时刻的观测数据含有目标对应的距离值, 目标距离真值以 $R^{n,o}$ 表示。根据(19)式, 在第 i 通道(6)式对应的对数似然比统计

量为

$$Z_i(n) = \sum_{(l,m) \in \Theta} \left\{ \ln \left\{ \exp \left[-\frac{(R_{l,m}^n - R_{l,m}^{n,o})^2}{2\sigma_R^n} \right] + \gamma_{\text{sat}}^r \right\} - \ln \left\{ \exp \left[-\frac{(R_{l,m}^n - R_{l,m}^{n,b})^2}{2\sigma_R^n} \right] + \gamma_{\text{sat}}^r \right\} \right\}, \quad (21)$$

式中 (l,m) 为背景距离值对应的像素, Θ 表示目标的位置信息, $\gamma_{\text{sat}}^r = P_r(A) \sqrt{2\pi}\sigma_R / \{[1 - P_r(A)]\Delta R\}$, 这些信息通过目标物待测图像确定。

最后, 总结多通道 SPRT 的激光主动成像目标探测方法的步骤如下:

- 1) 通过给定的虚警概率和漏检概率, 利用(14)式计算检验阈值 b_0 和 b_1 ;
- 2) 结合待测图像和(20)式计算目标物图像信息, 利用(21)式计算对数似然比统计量;
- 3) 通过决策规则(11)式判断目标是否存在;
- 4) 利用(17)式估计实际虚警概率和漏检概率, 通过(18)式计算 ASN。

4 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性, 对激光主动成像

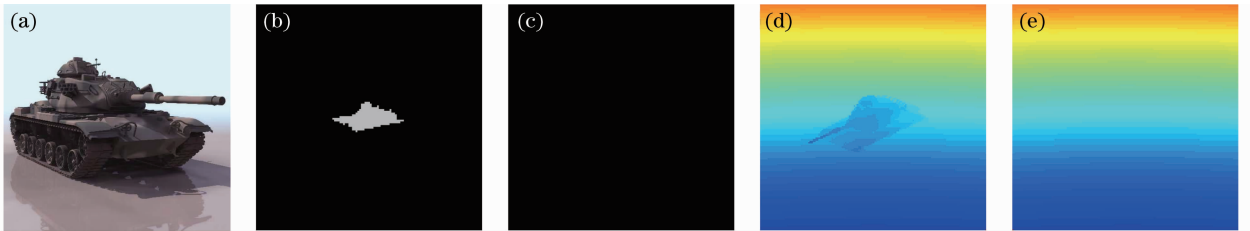


图 1 激光主动成像仿真效果图。(a) 目标原图; (b) 目标存在的强度图; (c) 目标不存在的强度图; (d) 目标存在的距离图; (e) 目标不存在的距离图

Fig. 1 Simulation results of laser active imaging system. (a) Original image; (b) intensity image with target; (c) intensity image with no target; (d) range image with target; (e) range image with no target

由表 1 可知, ASN 和误差概率随着信噪比的提高而显著减少, 在保证误差概率的前提下, 本文算法对目标的探测性能明显优于 FSS 算法, 且本文算法的实际误差概率 P_{FA}^* 和 P_{MS}^* 明显小于给定值。通过对比可知, 基于多通道序贯探测算法的 ASN 较小, 对于两通道系统 ($N=2$), 在目标存在的情况下, FSS 所需 ASN 是多通道序贯探测算法的 1.5~2.4 倍, 在目标不存在的情况下, FSS 所需 ASN 是多通道序贯探测算法的 2.8~3.8 倍。由实验结果可知, 本文算法具有 ASN 和概率误差较小等优点, 在一定程度上实现了对激光主动成像图像中目标的快速探测和在线计算。

目标探测进行了仿真实验。在仿真中, 相关参数选取如下: $\alpha=1$ dB/km, $\epsilon_{\text{opt}}=0.5$, $\epsilon_{\text{het}}=0.5$, $\eta=0.25$, $h\nu=1.87 \times 10^{-20}$ J, $\rho=0.25$, $B=80$ MHz, $R_{\text{res}}=6$ m, 接收器孔径尺寸为 13 cm, 激光器平均发射功率为 5 W。主要针对强度像和距离像进行了探测仿真, 即通道数 $N=2$, 对 500 m 外方位角为 30° 的目标仿真所得不含噪声的强度像和距离像如图 1 所示。主要研究在不同噪声水平和误差概率下, 算法对激光主动成像目标探测的准确性和实时性。在实验中, 针对不同的噪声水平和目标是否存在的情况, 对 500 m 外不同姿态的目标选取了 50 幅图像进行了 100 次重复实验。在给定虚警概率和漏检概率的情况下, 将本文算法与固定样本长度(FSS)似然比检验算法进行了比较, 并对实际的漏检概率和虚警概率进行了估计, 以 ASN 和误差概率作为评价指标, 结果如表 1 所示, 其中 $\xi_i(P_{\text{FA}}, P_{\text{MS}}, q) = n_0(P_{\text{FA}}, P_{\text{MS}}, q) / \bar{\tau}_i(P_{\text{FA}}, P_{\text{MS}}, q)$, $n_0(P_{\text{FA}}, P_{\text{MS}}, q)$ 为相同的 P_{FA} 和 P_{MS} 下 FSS 的 ASN。检验算法的相关参数的选取如下: $a_1 = \lg(2/P_{\text{FA}})$, $a_0 = \lg(1/P_{\text{MS}})$, $P_{\text{FA}} = 10^{-3}$, $P_{\text{MS}} = 10^{-1}$ 。

表 1 实验结果比较

Table 1 Comparison of experimental results

SNR	0.5	1	2	4
ASN with target	35.70	17.67	7.79	4.89
$P_{\text{MS}}^*/10^{-4}$	623	453	237	114
ξ_1	1.57	1.64	1.74	2.46
ASN with no target	14.92	12.87	4.75	1.68
$P_{\text{FA}}^*/10^{-4}$	4.62	3.94	2.69	1.56
ξ_0	2.85	3.16	3.53	3.79

5 结 论

在 SPRT 的基础上, 提出了一种应用多通道

SPRT 来提高激光主动成像目标探测概率和算法实时性的方法,并对激光主动成像的强度像通道和距离像通道进行了仿真实验。理论分析和仿真结果表明,本文算法可以有效减少目标探测的计算量,降低虚警概率和漏检概率,为激光主动成像目标探测提供了新的思路。在激光主动成像制导应用中,应根据实际要求,选取合适的参数,以达到最佳探测效果。

参 考 文 献

- 1 J. P. Anthes, P. Garcia, J. T. Pierce *et al.*. Non-scanned LADAR imaging and applications [C]. *SPIE*, 1993, **1936**: 11~22
- 2 O. Steinvall. Review of laser sensing devices and systems[C]. *SPIE*, 2005, **5989**: 598903
- 3 R. E. Zelenka, R. F. Clark, A. Zirkler *et al.*. Development and flight test of terrain-referenced guidance with ladar forward sensor [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1996, **19**(4): 823~828
- 4 Huang Peikang, Yuan Qi, Zhu Zhenfu *et al.*. Development status and prospect of optical precision guidance technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S): 1~6
黄培康,袁起,朱振福等.光学精确制导技术的发展现状与展望[J].*红外与激光工程*,2007,**36**(S):1~6
- 5 Wu Long, Zhao Yuan, Jin Chenfei *et al.*. Effects of changing threshold on detection probability of scannerless range-gated lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3117~3123
吴龙,赵远,靳辰飞等.变阈值检测对无扫描距离选通激光雷达探测概率的影响[J].*光学学报*,2010,**30**(11):3117~3123
- 6 Wang Fengchao, Liu Xingtang, Huang Shucai. Target fusion detection with multi-feature based on fuzzy evidence theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 713~719
王凤朝,刘兴堂,黄树采.基于模糊证据理论的多特征目标融合检测算法[J].*光学学报*,2010,**30**(3):713~719
- 7 Chen Yu, Miao Hua, Lang Qi *et al.*. Application of Mellin transform in opto-electronic hybrid target detection technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 421~425
陈宇,苗华,郎琪等.梅林变换在光电混合目标探测技术

中的应用[J].*中国激光*,2009,**36**(2):421~425

- 8 Li Yingchun, Tang Liming, Liu Qitao. Study of laser active imaging system used for target real-time detection[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2010, **21**(4): 65~68
李迎春,唐黎明,刘启涛.激光主动成像目标实时检测系统研究[J].*装备指挥技术学院学报*,2010,**21**(4):65~68
- 9 Ping Qingwei, Xia Guifen. Laser radar target detection based on fractional Brownian motion model[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 106~110
平庆伟,夏桂芬.基于分数布朗运动模型的激光雷达目标检测[J].*中国激光*,2008,**35**(1):106~110
- 10 Zhao Lei, Yu Xin, Chen Yinan *et al.*. Object detection method based on generalized likelihood ratio tests method in photon images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 91~96
赵磊,俞信,陈翼男等.光子图像中基于广义似然比检验的目标探测方法[J].*光学学报*,2010,**30**(1):91~96
- 11 Guan Jian, Zhang Yanfei, Li Binyu *et al.*. Joint CFAR detection and classification scheme for radar non-cooperative target recognition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 1~4
关键,张彦飞,李彬玉等.雷达非合作目标恒虚警检测和分类一体化方案[J].*光电工程*,2006,**33**(7):1~4
- 12 A. Tartakovsky, X. R. Li, G. Yaralov. Sequential detection of targets in distributed systems[C]. *SPIE*, 2001, **4380**: 229~243
- 13 A. G. Tartakovsky, X. R. Li, G. Yaralov. Sequential detection of targets in multichannel systems[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2003, **49**(2): 425~445
- 14 Wang Guoyou, Zhang Lei, Wang Chen. An algorithm for detecting sea-surface targets with sequential salient feature against complicated scene[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Technol. (Nature Science Edition)*, 2006, **34**(10): 28~30
汪国有,张磊,王晨.复杂背景下序贯显著性特征海面目标检测算法[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2006,**34**(10):28~30
- 15 He You, Guan Jian, Peng Yingning *et al.*. Radar Automatic Detection and Constant False Alarm Rate Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999
何友,关键,彭应宁等.雷达自动检测与恒虚警处理[M].北京:清华大学出版社,1999
- 16 J. Green, J. H. Shapiro. Detecting objects in three-dimensional laser radar range data[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(3): 865~874