

运动平台成像系统弱目标检测方法

王 平, 张 焱, 沈振康

(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文结合机载红外搜索/跟踪系统等光学成像系统的实时信息处理需求, 提出了一种运动平台条件下成像系统的空时弱目标检测方法. 该方法首先在空间上进行二维广义最大似然比检测提取出图像序列中的潜在目标, 然后在时间上进行多级假设检验判决, 从而检测出真实目标. 算法有效均衡了统计检测性能和计算复杂度之间的矛盾, 在实际应用中取得了良好的效果.

关键词: 光学成像系统; 弱目标检测; 检测前跟踪; 运动平台

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2293-04

Detection Method of Dim Targets in Ego Motion Imaging System

WANG Ping, ZHANG Yan, SHEN Zherrkang

(ATR Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Due to the desire for real time information processing of optical imaging system, such as infrared search/track (IRST) systems, we proposed a space temporal dim target detection method in ego motion imaging systems. A spatial two dimensional generalized likelihood ratio test algorithm was employed to extract underlying objects. Then the measurable discriminable feature was combined to a feature vector which was associated with the object. The correct target in image sequence was detected by multistage hypothesis testing (MHT) method using its associated feature vector. The algorithm made a good trade off between its statistic performance and computing complexity, and had acquired great performance in practical applications.

Key words: optical imaging systems; detection of dim targets; track before detect; ego motion

1 引言

红外、可见光等光学成像系统具有隐蔽性好、测量精度高的优点, 在光学侦察和导弹制导中取得了广泛的应用, 光学成像传感器将视场内各物体的光辐射强度转化成电信号, 经高速信号处理系统进行图像处理, 检测并识别出图像中的目标, 为侦察系统或导弹制导系统提供必须的目标空间位置等信息.

为了提高光学成像系统的作用距离, 要求尽可能早的发现目标, 尤其对于导弹控制系统来说, 如果导引头及时识别出目标, 就能为控制系统提供足够的响应时间, 从而减小导弹的脱靶量. 但是, 对于机载红外侦察/搜索系统 (IRST) 和捷联式成像导引头来说, 光学系统光轴的方向会受到平台姿态摄动的影响, 体现在: (1) 成像探测器的有效积分时间不能太长, 导致图像中目标的信噪比大大降低; (2) 不同时刻图像中目标的位置差异很大, 这些因素都给检测和识别目标带来一定的困难.

为了满足运动平台条件下光学成像系统信息处理的要求, 本文提出了一种空时联合处理的弱目标检测算法, 算法结合了最优似然比检验和序列假设检验的特点, 在低信噪比

条件下具有良好的弱目标检测性能. 同时, 由于在空间和时间上采用串行执行的方法, 有效克服了当前绝大多数检测前跟踪 (Track Before Detect, TBD) 算法 (如 3 维匹配滤波算法, 动态规划算法, 高阶相关算法^[1]等) 计算复杂, 适用范围较窄的问题, 能够满足各类 IRST、光学成像导引头等系统截获弱目标的要求.

2 空时联合检测前跟踪弱目标检测算法

2.1 空间 2 维广义最大似然比检测 (GLRT)

2 维情况下, 图像的信号模型为

$$f(i, j) = ag(i, j) + b(i, j) + n(i, j) \quad (1)$$

其中, (i, j) 为图像的空间下标, $g(i, j)$ 为光学系统点扩展函数与目标信号的卷积, a 为目标当前时刻幅度, $b(i, j)$ 为图像中的背景, $n(i, j)$ 为 Gaussian 噪声. 由广义最大似然比准则 (Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT), 可得单帧光学图像序列中弱点目标的似然函数为

$$l(i, j) = \frac{\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} [f(u, v) - \hat{b}(i, j)] \hat{a}g(u-i, v-j)}{\sigma_w^2(i, j)} \quad (2)$$

其中, $\hat{b}(i, j)$ 为图像中背景的最大似然估计值 (MLE), \hat{a} 为目标信号幅度的最大似然估计值, $\sigma_w^2(i, j)$ 为图像方差的最大似

然估计值分别为

$$\hat{b}(i, j) = \sum_{(u, v) \in \Omega(i, j)} f(u, v) \quad (3)$$

$$\sigma_w^2(i, j) = \sum_{(u, v) \in \Omega(i, j)} (f(u, v) - \hat{b}(i, j))^2 \quad (4)$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{(u, v) \in \Omega(i, j)} (f(u, v) - \hat{b}(i, j))g(u-i, v-j)}{\sigma_w^2(i, j)} \quad (5)$$

$\Omega(i, j)$ 为像素 (i, j) 的邻域. 将上述各最大似然估计值代入式 (4), 可得

$$l(i, j) = \sum_{(u, v) \in \Omega(i, j)} \frac{[f(u, v) - \hat{b}(i, j)]\hat{a}g(u-i, v-j)}{\sigma_w^2(i, j)} \quad (6)$$

将似然函数 $l(i, j)$ 与判决门限 T 比较, 如果 $l(i, j) > T$, 则认为图像的该点为潜在目标点, 如果 $l(i, j) \leq T$, 则该点为背景点, 将其剔除.

定义 $Z_p(k) = \{(i, j), l(i, j) > T\}$ 为第 k 帧图像经 2 维 GLRT 判决后提取出来的超出判决门限的像元点. 通过模糊 C 均值聚类方法^[6] 对 $Z_p(k)$ 中的目标点按照空间连通关系进行聚类, 并求取每个聚类结果的聚类中心 $z_k(n)$, $n = 1, \dots, N(k)$, 其中 $N(k)$ 为第 k 帧图像潜在目标聚类后的类别总数. 由此可得第 k 帧图像经 2 维 GLRT 检测后潜在目标聚类集合, 表示为 $Z_C(k) = \{z_k(1), z_k(2), \dots, z_k(N(k))\}$.

2.2 基于累计数的多级假设检验判决算法

对每帧图像均进行 GLRT 检测, 提取出整个图像序列的所有潜在目标的聚类中心集合 $Z_C^K = \{Z_C(1), Z_C(2), \dots, Z_C(K)\}$, $z_k(n)$ 表示 Z_C^K 中第 k 帧图像的第 n 个目标聚类中心, 根据图像序列中目标存在与否, 形成如下两种假设^[2-4]: H_1 : 图像序列中存在目标, 且 $z_k(n)$ 为目标真实轨迹; H_0 : Z_C^K 中不存在目标.

由于集合 Z_C^K 所表示的是图像序列中潜在目标的聚类中心, 无法直接构造检测统计量, 为此构造目标出现累计次数 $U_k(n)$, 其含义为

$$U_k(n) = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 帧图像中出现了第 } n \text{ 个目标} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

判断在不同时刻的目标是否对应于探测器视场内的同一目标, 可采用目标聚类中心的距离函数 $e_{u,v} = \|z_u(m) - z_v(n)\|$ 进行判断. 设最大允许距离为 D , 如果 $e_{u,v}(m, n) < D$, 则表示第 u 帧图像中的目标 m 与第 v 帧图像中的 n 对应于同一目标, 其相应累计次数 $U_u(m)$ 与 $U_v(n)$ 的值均为 1.

对图像序列中的每个潜在目标, 可构造其路径统计量

$$L_k(n) = \sum_{i=1}^k U_i(n), \text{ 相应地, 基于路径统计量的第 } n \text{ 个潜在目标}$$

的 MHT 判决准则^[2-4] 为

$$L_k(n) = \sum_{i=1}^k U_i(n) \begin{cases} > M, & \text{第 } n \text{ 个潜在目标是真实目标} \\ < N, & \text{第 } n \text{ 个潜在目标不是真实目标} \\ \in [N, M] & \text{进入第 } k+1 \text{ 阶段} \end{cases} \quad (8)$$

式中 M 为判定目标存在的下限值, N 为判定目标不存在的上限值. 在对第 k 帧图像完成 GLRT 检测后, 对此时得到的潜在

目标集 $Z_C^K = \{Z_C(1), Z_C(2), \dots, Z_C(k)\}$ 中的各个潜在目标进行 MHT 判决, 如果目标路径统计量 $L_k(n) > M$, $0 < M \leq k$, 则认为该目标为真实目标; 如果 $L_k(n) < N$, $0 \leq N < M \leq k$, 则认为该目标为噪声或是随机干扰; 否则, 则认为该目标的信息还不充分, 需要转入下一时刻作进一步的判断.

当处理到第 K 帧后, 已经没有必要转入下一级判决, 此时的判决准则为

$$L_K(n) = \sum_{i=1}^K U_i(n) \begin{cases} > M, & \text{第 } n \text{ 个潜在目标是真实目标} \\ \text{其他}, & \text{第 } n \text{ 个潜在目标不是真实目标} \end{cases} \quad (9)$$

2 维 GLRT 所检测出来的除真实目标外的其它各种干扰, 比如部分残余背景(如云层边缘和 IRFPA 的非均匀性坏元)和较强干扰噪声(热噪声), 由于其特征在短时间内变化很快. 在 MHT 检测过程中, 路径统计量 $L_k(n)$ 的累计数目很小, 从而可以有效剔除. 此外, 判决目标时并不要求必须每帧图像中都提取出真实目标, 因此能够有效克服目标短时被遮挡的影响.

2.3 运动平台下的弱目标检测算法

运动平台的姿态抖动会导致导引头光轴出现相应的抖动, 即使是光学系统视场内的静止目标, 在探测器所成的像中的位置也在变化. 这样, 在进行 MHT 检测时, 就无法构造路径统计量 $L_k(n)$, 下面分析如何消除平台运动对目标检测的影响.

平台运动时, 光学系统的视线轴(LOS)在三个坐标轴上都产生旋转, 引起导弹俯仰、偏航和滚转方向上的姿态变化, 设这三个欧拉角分别为俯仰角 ϑ , 偏航角 ψ 和滚转角 γ , 由惯性测量单元(IMU)实时提供. 设目标在弹体坐标系中的坐标为 $[x \ y \ z]^T$, 在惯性坐标系中的坐标为 $[X \ Y \ Z]^T$. 对于成像系统来说, 仅关心目标在成像平面 YZ 平面中的坐标, 则将弹体坐标系转换至惯性坐标系的方法^[7] 为

$$\begin{bmatrix} Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta\cos\psi & -\cos\vartheta\sin\psi \\ \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma + \cos\psi\sin\gamma & -\sin\vartheta\sin\psi\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用上面的坐标转换公式, 将每帧图像经 2 维 GLRT 算法提取出来的潜在目标聚类中心从弹体坐标系转换到惯性坐标系, 然后多级假设检验判决, 提取出图像序列中的弱目标.

3 试验仿真与算法性能分析

3.1 半实物仿真试验结果

我们将前面的算法应用到车载半实物闭环成像跟踪系统. 试验系统的红外成像探测器固定在三轴转台上, 光轴和转台 X 方向重合, 转台则固定在车上, 待识别目标为带伺服的可调节红外点光源, 伺服系统可模拟出目标的各种运行轨迹.

这里, 我们给出目标静止时的半实物仿真试验结果. 转台不动时, 目标位于成像探测系统光轴上. 为了验证转台运动对目标跟踪的影响, 特地预先让转台存在一定的偏角, 然后启动弱目标检测算法, 转台根据算法输出的目标角位置, 实时跟踪目标.

图 1 为半实物仿真试验中的两帧图像及目标识别结果.

图中 (a)、(e) 为红外探测器获取的两帧图像, (b)、(f) 为相应的 2 维 GLRT 检测结果, (c)、(g) 分别为 (b) 和 (f) 姿态修正后

的结果, (d)、(h) 为 MHT 检测后 (a) 和 (c) 中检测出来的真实目标(“十”字形所示)。

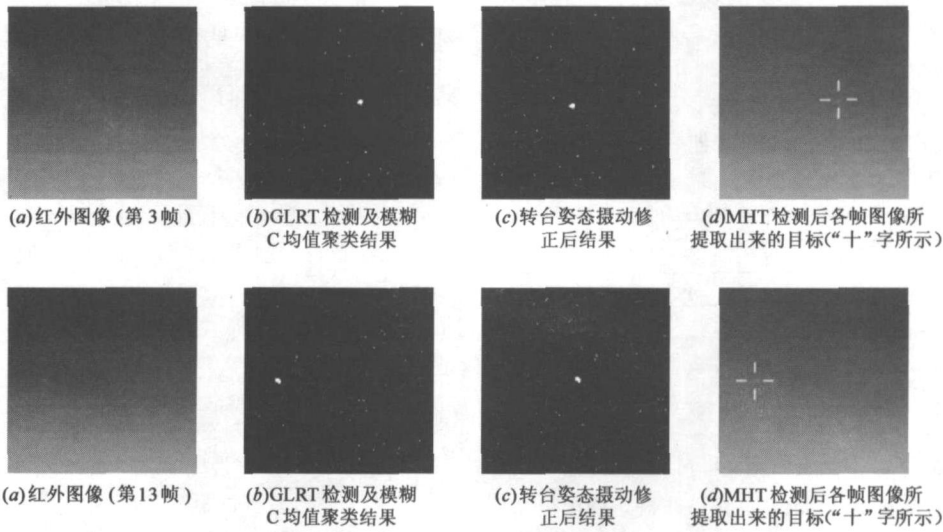


图 1 半实物仿真试验中目标检测结果

3.2 算法性能分析

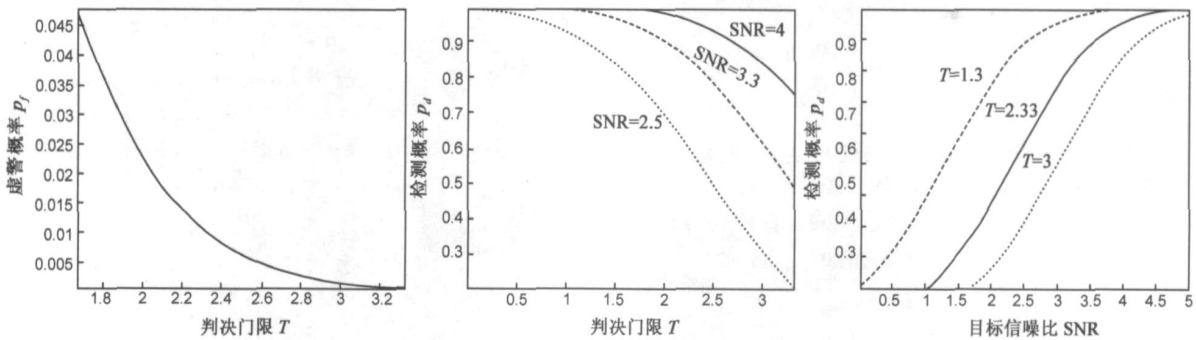
前面对运动平台下弱目标检测算法的 2 维 GLRT 检测, MHT 判决和姿态修正算法进行了详细的分析, 并给出了相应的检测结果, 下面分析该算法的统计检测性能和计算复杂度。

定义目标在邻域内的信噪比为:

$$SNR = \frac{\hat{\alpha}}{\sigma_w} \quad (11)$$

则 Gaussian 噪声条件下 2 维 GLRT 算法的检测概率 p_d 和虚警概率 p_f , 分别为^[1]

$$p_d = P\{l(i, j) > T | H_1\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{SNR - T}{\sqrt{2}}\right) \quad (12)$$



(a) 虚警概率 p_f 与判决门限 T 之间的关系 (b) 检测概率 p_d 与判决门限 T 之间的关系 (c) 检测概率 p_d 与目标信噪比 SNR 之间的关系

图 2 检测算法的统计性能及其与 SNR 的关系

为了使 2 维 GLRT 检测算法达到一定的虚警概率和检测概率水平, 仍然要求图像中的目标有较高的信噪比, 不过如果采用 MHT 准则来进行判决, 则可大大降低单帧检测时的信噪比要求, 下面对 MHT 的统计性能作进一步的分析。

根据式(8)和式(9)的 MHT 目标判决准则, 在连续 K 帧图像中, 只有出现次数超出 M 次的目标才可能是真实的目标, 但并不要求是连续出现的。此时, 算法的检测概率 P_D 和虚警概率 P_F 分别为

表 1 给出了单帧检测概率 $p_d = 0.9$, 单帧虚警概率 $p_f = 0.01$ 时, 几种不同 K 值和 M 值条件下所得到的最终的检测概率 P_D 和虚警概率 P_F 。

由表 1 可见, 在合适的条件下, 如果选择 K 为 5, M 为 3,

$$P_D = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i} p_d^i (1 - p_d)^{n-i} \quad (14)$$

$$P_F = \sum_{i=m}^n \binom{n}{i} p_f^i (1 - p_f)^{n-i} \quad (15)$$

或者选择 K 为 4, M 为 3, 能够保证具有较高的检测概率 (> 0.94), 同时保持了相当低的虚警概率 ($< 10^{-5}$), 即在 SNR 约为 3.612 时, 能够取得非常好的检测效果. 另外, 当选择 K 为 4, M 为 3 时, 如果仅要求 $P_d = 0.9$ 和 $P_f = 0.01$, 则此时单帧虚警概率 $p_f =$ 和检测概率 p_d 仅需要选择为: $P_f = 0.14$, $p_d = 0.86$, 相应地, 图像中满足检测条件的目标的最低 SNR 为 2.36. 这说明, 通过 2 维 GLRT 和 MHT 处理后, 目标检测算法已经能够可靠检测信噪比很低的目标.

表 1 不同 K 值和 M 值条件下的算法的检测概率 P_D 和虚警概率 P_F

K	M	检测概率 $P_D(p_d = 0.9)$	虚警概率 $P_F(p_f = 0.01)$
4	2	0.9963	6×10^{-4}
4	3	0.9477	3.97×10^{-6}
5	2	0.9995	0.001
5	3	0.9914	9.8×10^{-6}
5	4	0.9185	5×10^{-8}

实际应用中, 可根据系统对检测概率 P_D 、虚警概率 P_F 和 SNR 的要求, 合理选择 K 和 M 的值, 并进一步确定门限值 T , 就能够设计出性能优良的弱目标检测算法.

4 小结

本文针对机载IRST系统和弹载成像导引头实时信息处理的要求, 提出了一种运动平台条件下的空时联合检测跟踪弱目标检测算法. 该算法首先在空间上实现 2 维广义最大似然比检测, 然后利用 IMU 提供的平台姿态角消除平台姿态摄动的影响, 最后在时间上通过多级假设检验剔除干扰目标, 达到检测真实目标的目的. 不同于一般 3 维匹配算法等将图像序列简单看做 3 维数字信号的思想, 本算法对目标检测过程分解为空间(2 维 GLRT 检测)和时间(MHT 判决)两个步骤, 两步骤串行执行, 从而有效地降低了算法的计算复杂度, 在当前数字信号处理器(DSP)或 FPGA 的计算能力下, 该算法已能满足成像信息处理系统的实时性要求.

参考文献:

- [1] J N Sanders Reed. Maximum likelihood detection of unresolved moving targets[J]. IEEE Trans, 1998, AES 34(7): 844- 858.
 [2] G Van Keuk. MHT extraction and track maintenance of a target formation[J]. IEEE Trans, 2002, AES 38(1): 288- 294.

- [3] S D Blostein. Detecting small moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing [J]. IEEE Trans, 1991, SP 39(7): 1611- 1629.
 [4] P Wei, W Ku. Analysis of multiframe target detection using pixel statistics[J]. IEEE Trans, 1995, AES 31(1): 238- 246.
 [5] 王平. 光学图像中弱信号小目标检测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1697- 1700.
 [6] R O Duda, P E Hart, D G Stork. 模式分类(第 2 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 13- 17.
 [7] 娄寿春. 导弹制导技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1989. 50- 55.

作者简介:



王平男, 1976 年 5 月出生于湖北省公安县, 博士. 现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授, 获军队科技进步一等奖 1 项, 从事成像制导与自动目标识别、计算机视觉、智能信息处理等方面的研究工作.

E-mail: wangping@nudt.edu.cn



张焱女, 1975 年 6 月出生于山东济南市, 博士研究生. 现为国防科技大学电子科学与工程学院讲师, 获军队科技进步一等奖 1 项, 从事图像处理、计算机视觉与模式识别等方面的工作. E-mail: atrthreefire@nudt.edu.cn



沈振康男, 1936 年 5 月出生于上海市, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 政府特殊津贴享受者, 获国家、军队科技进步奖 6 项. 在国内外发表学术论文 100 余篇.

E-mail: somewping@sina.com