

基于改进概率数据关联滤波的红外小运动目标跟踪

李正周^{①②} 金钢^{②③} 董能力^{②③}

^①(重庆大学通信工程学院 重庆 400030)

^②(中国科学院光电技术研究所 成都 610209)

^③(中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)

摘要: 在跟踪弱小运动目标过程中, 低信噪比和高虚警率使得即使是在波门内也存在较多的虚假目标, 加大目标识别的不确定性, 降低跟踪的可靠性和精度。该文分析了红外成像系统中目标信号特点, 根据概率数据关联滤波的思想, 提出了一种基于目标幅度连续性和运动一致性的弱小目标跟踪识别方法, 重点比较了极大似然-概率数据关联滤波和改进算法的目标识别与跟踪性能。理论分析和实验结果表明, 该方法较大程度上减少了弱小目标跟踪过程中测量点与航迹关联的不确定性, 提高了目标识别与跟踪性能。

关键词: 弱小目标识别; 目标跟踪; 概率数据关联滤波; 多特征融合

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0953-04

A Novel Method for Tracking and Recognizing Infrared Dim and Small Moving Target Based on Modified Probabilistic Data Associating Filter

Li Zheng-zhou^{①②} Jin Gang^{②③} Dong Neng-li^{②③}

^①(Communication Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

^②(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

^③(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: During tracking dim and small moving targets in the electrooptical detecting system, many false alarms extracted in the tracking window for low signal-to-noise ratio and high false alarm ratio debase seriously the performance of target recognition and tracking. To solve this problem, the target characters of the infrared imaging tracking system are analyzed, and based on the idea of the probabilistic data association filter, a modified method, which integrates the continuity and consistency of target's amplitude and motion, is proposed. The emphases are laid on the comparison of the target recognition and tracking performances between the original maximum likelihood-probabilistic data associated filter and the proposed method. Some experimental results are included and the performance of target recognition and tracking is improved greatly.

Key words: Dim small target recognition; Target tracking; Probabilistic data associated filter; Multi-feature fusion

1 引言

由于弱小目标提供的信息少, 使得基于目标纹理信息的模板匹配^[1]、基于目标灰度概率密度梯度的均值偏移法^[2]和基于目标几何特征的不变矩^[3]等传统扩展目标跟踪方法难以保证弱小目标的检测与跟踪性能, 需要利用目标在序列图像上的信息边跟踪边识别边检测。目前, 识别与跟踪弱小运动目标的方法主要有跟踪分裂法、最近邻法及概率数据关联滤波法等3种。跟踪分裂法将航迹分裂成与测量点相同数量的子航迹, 然后采用多级假设检验或动态规划^[4, 5]判决子航迹是否目标真实航迹。显然, 跟踪分裂法需要组合各种可能发生的事件, 易造成测量点与航迹竞争, 更严重则会导致组合

爆炸, 不利于实时跟踪。为克服分裂法运算量大的问题, 最近邻法将以航迹预测中心最近的测量值作为该航迹的观测值, 并以此来预测与更新目标状态。但当存在杂波时, 即使少量杂波, 最近邻法也易跟踪发散。概率数据关联滤波法则依据目标运动信息, 计算各测量点的权重, 并以此生成一个新的测量值来更新航迹。该技术已在雷达、声纳等探测系统中得以广泛运用, 成为解决密集多杂波环境下单目标跟踪的较为有效的经典方法。Kirubarajan^[6-8]结合目标的幅度和运动信息, 提出了极大似然-概率数据关联滤波技术(Maximum Likelihood-Probabilistic Data Associated Filter, ML-PDAF), 较大程度上改善了目标跟踪性能。ML-PDAF认为目标幅度在时间上是不相关的, 并假设幅度越大的测量点是目标的可能性越大。然而, 在光电成像跟踪系统中, 目标幅度通常在短时间内几乎不变, 是相关性很强的马尔可夫平稳信号。因此, 有必要结合光电成像跟踪系统的特点改进

2006-10-19 收到, 2007-04-09 改回

国家 863 计划项目(2002AA731042), 重庆市科委自然科学基金(CS TC2006BB2161)和重庆大学人才引进基金资助课题

ML-PDAF 技术以提高弱小目标识别与跟踪能力。

本文利用目标幅度连续性和运动轨迹一致性进行目标运动分析,提出了一种基于改进概率数据关联滤波的弱小目标跟踪识别方法。理论分析和实验结果表明,该方法减少了弱小目标跟踪过程中测量点与航迹关联的不确定性,提高了目标检测跟踪的可靠性。

2 极大似然-概率数据关联滤波及其缺点

弱小运动目标可利用的有效特征主要有目标的幅度和目标的运动信息。由于信噪比很低,在跟踪窗口内可能会检测出多个或者一个测量点也没有,不满足 Kalman 滤波理论关于有且只有一个正确测量点的基本假设,只有通过计算这些测量点的加权组合量作为当前时刻的观测值来更新目标状态。

令 k 时刻测量点集合为

$$\mathbf{z}(k) = \{z_i(k), \eta_i(k)\}_{i=1}^{m(k)} \quad (1)$$

式中 $m(k)$ 是波门内有效测量点数, $z_i(k)$ 是第 i 个量测的运动测量值, $\eta_i(k)$ 是第 i 个量测的幅度测量值。那么截至到 k 时刻的所有有效测量集合定义为 \mathbf{Z}^k , 其表达式为

$$\mathbf{Z}^k = \{z(j)\}_{j=1}^k \quad (2)$$

测量点或来自于目标,或源于虚警。因此,定义 k 时刻联合事件:

$$\theta_i(k) = \{z_i(k), \eta_i(k) \text{ 是源于目标的测量值}\}, i = 1, \dots, m(k) \quad (3)$$

$$\theta_0(k) = \{k \text{ 时刻所有测量都是虚警}\} \quad (4)$$

则各事件的条件概率为

$$\begin{aligned} \beta_i(k) &= p\{\theta_i(k) | \mathbf{Z}^k\} = p\{\theta_i(k) | z(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} \\ &= \frac{p\{z(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} p\{\theta_i(k) | m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\}}{p\{z(k)\}} \\ &= \frac{p\{z_i(k), \eta_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} p\{\theta_i(k) | m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\}}{p\{z(k)\}} \quad (5) \end{aligned}$$

目标运动特征和幅度特征相互独立,应有

$$\begin{aligned} p\{z_i(k), \eta_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} \\ = p\{z_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} p\{\eta_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} \quad (6) \end{aligned}$$

$$p\{z(k), \eta(k)\} = p\{z(k)\} p\{\eta(k)\} \quad (7)$$

目标运动信息有如下基本假设^[9]: (1)如测量点源于目标,则该观测值服从以预测观测值为均值的正态高斯分布;(2)如测量点来自于虚警,则该观测值在跟踪窗内服从独立均匀分布。即有

$$\begin{aligned} p_1\{z_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} &= \frac{1}{2\pi |s_z(k)|^{1/2}} \\ &\cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} [z_i(k) - z(k|k-1)]^T s_z^{-1}(k) [z_i(k) - z(k|k-1)]\right\} \quad (8) \end{aligned}$$

$$p_0\{z_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} = \frac{1}{V_G} \quad (9)$$

式中 s_z 为目标位置观测方差, V_G 为跟踪窗口的大小。

信号幅度是目标的固有属性,也是从杂波中识别目标的主要依据。极大似然-概率数据关联滤波算法^[7]假设噪声和真实目标的幅度概率密度函数分别为 $p_0(\eta)$ 和 $p_1(\eta)$ 。

$$p_0(\eta) = \eta \exp(-\eta^2/2) \quad (10)$$

$$p_1(\eta) = \frac{\eta}{1+d} \exp\left[-\frac{\eta^2}{2(1+d)}\right] \quad (11)$$

其中 d 是信噪比。

设检测算法的检测概率和虚警概率分别为 P_D 和 P_{FA} , 门限为 τ 。虚警和源于目标的测量点的概率密度函数可分别表示为 $p_0^\tau(\eta)$ 和 $p_1^\tau(\eta)$ 。

$$p_0^\tau(\eta) = p_0(\eta) / P_{FA} \quad (12)$$

$$p_1^\tau(\eta) = p_1(\eta) / P_D \quad (13)$$

那么第 i 个测量点幅度的似然函数 $\rho_i(k)$ 为

$$\begin{aligned} \rho_i(k) &= \frac{p_1^\tau(\eta_i)}{p_0^\tau(\eta_i)} = \frac{P_{FA}}{P_D} \frac{1}{1+d} \exp\left[\frac{\eta_i^2 d}{2(1+d)}\right] \\ &= p\{\eta_i(k) | \theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} \quad (14) \end{aligned}$$

同时,由于各测量点为真实目标的先验概率相同,即有

$$p\{\theta_i | m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} = \begin{cases} \frac{1 - P_{FA}^{m(k)}}{m(k)}, & i = 1, \dots, m(k) \\ P_{FA}^{m(k)}, & i = 0 \end{cases} \quad (15)$$

考虑概率归一化条件,将式(8),式(9),式(14)和式(15)代入式(5)中并整理可得各测量点的权重为

$$\beta_i(k) = \begin{cases} \frac{e_i(k) \rho_i(k)}{b(k) + \sum_{i=1}^{m(k)} e_i(k) \rho_i(k)}, & i = 1, \dots, m(k) \\ \frac{b(k)}{b(k) + \sum_{i=1}^{m(k)} e_i(k) \rho_i(k)}, & i = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中

$$b(k) = \frac{P_F^{m(k)} m(k)}{[1 - P_F^{m(k)}] V_G} \quad (17)$$

$$e_i(k) = \frac{1}{2\pi |s_z(k)|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \mathbf{v}_{zi}(k)^T s_z^{-1}(k) \mathbf{v}_{zi}(k)\right] \quad (18)$$

$$\mathbf{v}_{zi}(k) = z_i(k) - z(k|k-1) \quad (19)$$

式(16)表明测量点的信号幅度越大则其权重 $\beta_i(k)$ 也越大。然而,噪声和虚警的幅度往往大于目标信号幅度,这势必导致目标状态估计出现较大偏差,影响目标跟踪精度,严重则会发生目标跟踪错误。导致此结果的主要原因是式(14)对信号幅度似然函数的定义,假设目标信号幅度在时间上是不相关的。事实上,在光电跟踪系统中,目标幅度通常在短时间内几乎不变的,具有很强的相关性。

3 改进概率数据关联滤波法

目标信号幅度 $a(k)$ 在短时间内变化很小,其状态方程可为

$$a(k) = a(k-1) + \xi(k) \quad (20)$$

式中 $\xi(k)$ 是零均值高斯白噪声, 其方差为 $Q_a(k)$ 。观测方程表示为

$$\eta(k) = a(k) + \varepsilon(k) \quad (21)$$

式中 $\varepsilon(k)$ 是目标幅度的观测噪声, 服从零均值高斯分布, 即 $\varepsilon(k) \sim N(0, R_a)$ 。

通常情况下, 目标信号幅度服从以预测幅度为均值的高斯正态分布, 而噪声、虚警的幅度是独立、等概率分布的, 两者的概率分布函数可分别表示为

$$p_1(\eta_i(k)|\theta_i(k), m(k), \mathbf{Z}^{k-1}) = \frac{1}{2\pi s_a(k)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[\eta_i(k) - a(k|k-1)]^2}{2s_a(k)}\right\} \quad (22)$$

$$p_0(\eta_i(k)|\theta_i(k), m_k, \mathbf{Z}^{k-1}) = \frac{1}{\eta_{\max}(k) - \tau(k)} \quad (23)$$

式中 $s_a(k)$ 是幅度的观测方差, $\eta_{\max}(k)$ 为幅度观测最大值, $\tau(k)$ 是检测算法计算出的门限。

令 $v_{ai}(k)$ 表示第 i 个测量点的信号幅度与预测幅度的偏差。

$$v_{ai}(k) = \eta_i(k) - a(k|k-1) \quad (24)$$

那么结合式(22)-式(24), 第 i 个测量点的幅度概率密度函数为

$$p\{\eta_i(k)|\theta_i, m(k), \mathbf{Z}^{k-1}\} = \begin{cases} [\eta_{\max}(k) - \tau(k)]^{-m(k)+1} \frac{1}{2\pi s_a(k)^{1/2}} \\ \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} v_{ai}(k)^T s_a^{-1}(k) v_{ai}(k)\right], & i = 1, \dots, m(k) \\ [\eta_{\max}(k) - \tau(k)]^{m(k)}, & i = 0 \end{cases} \quad (25)$$

考虑概率归一化, 并将等式(8), 式(9), 式(15)和式(25)代入式(5), 可得各测量点的权重为

$$\beta_i(k) = \begin{cases} \frac{e_i(k)}{b(k) + \sum_{i=1}^{m(k)} e_i(k)}, & i = 1, \dots, m(k) \\ \frac{b(k)}{b(k) + \sum_{i=1}^{m(k)} e_i(k)}, & i = 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中

$$b(k) = \frac{m(k) P_{FA}^{m(k)}}{[\eta_{\max}(k) - \tau(k)](1 - P_{FA}^{m(k)}) V_G} \quad (27)$$

$$e_i(k) = \frac{1}{2\pi |s_z(k)|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \mathbf{v}_{zi}(k)^T \mathbf{s}_z^{-1}(k) \mathbf{v}_{zi}(k)\right] \cdot \frac{1}{2\pi s_a(k)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} v_{ai}(k)^T s_a^{-1}(k) v_{ai}(k)\right] \quad (28)$$

在计算出各测量点的权重 β_i 后, 就可由全概率公式计算当前时刻目标幅度和运动特征的观测值:

$$a(k|k) = \sum_{i=0}^{m(k)} \beta_i a_i(k|k) \quad (29)$$

$$\mathbf{X}(k|k) = \sum_{i=0}^{m(k)} \beta_i(k) \mathbf{X}_i(k|k) \quad (30)$$

此后, 利用 Kalman 滤波预测和更新目标状态信息, 即目标的位置和幅度, 并在跟踪窗内识别和跟踪目标。

4 试验及分析

图1是外场采集的红外序列图像, 白色方框内的亮点是要跟踪的空间目标, 其完全淹没于强起伏的闪烁噪声中。通过对以目标为中心, 大小为 20×20 像素的邻域进行统计, 该序列图像平均信噪比为 1.5, 平均对比度为 0.45。目标检测参数为检测概率 $P_D = 0.97$, 虚警概率 $P_{FA} = 0.1$ 。

图2是跟踪过程中在波门内检测到的测量点个数。多数情况下是2个, 最多时为4个, 最少时一个都没有, 此时目标漏检。图3是采用原 ML-PDAF 方法所检测到的目标轨迹和真实轨迹的误差曲线。在第60帧左右, 跟踪误差较大, 有6-7个像素, 没能正确识别目标, 发生跟踪错误。分析图像发现, 在这几帧图像的波门内出现一个运动迅速且亮度较强的目标, 短时间内波门被其拖走。对该序列图像进行统计, 高低方向精度为 0.94 像素, 方位方向精度为 0.91 像素(均方意义下)。

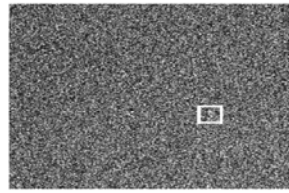


图1 红外图像

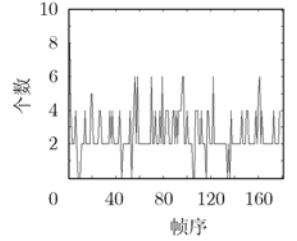
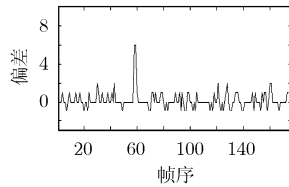
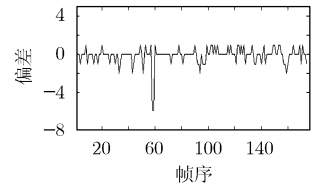


图2 波门内测量点个数



(a) 高低方向



(b) 方位方向

图3 ML-PDAF 的跟踪误差

图4是目标信号幅度 $a(k)$ 的变化曲线。从图中可看出, 目标信号的幅度在短时间内变化缓慢, 帧间相关性很强, 因此将其视为马尔可夫平稳信号是合理的。

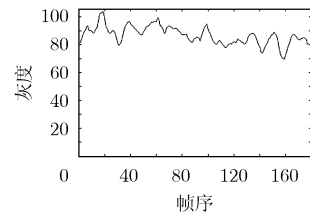


图4 目标信号幅度

图5是采用本文提出的改进算法检测到的目标轨迹与真实轨迹的误差曲线,残差近似为白噪声。目标识别的正确率高于ML-PDAF的识别率,且没有发生跟踪错误。对该序列图像进行统计,高低方向的跟踪精度在为0.67像素,方位方向的跟踪精度为0.59像素(均方意义下)。由此可见,改进算法较ML-PDAF精度有所提高。

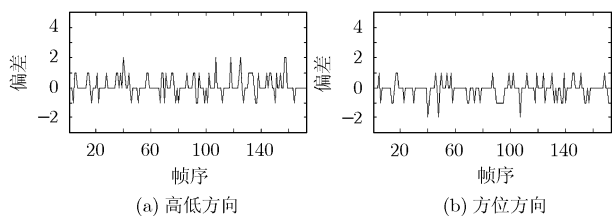


图5 改进方法的跟踪误差

5 结束语

本文利用光电成像跟踪系统中目标幅度连续性和运动轨迹一致性,提出了基于改进概率数据关联滤波的小弱运动目标跟踪识别新技术。理论分析和实验结果表明,目标信号的幅度在短时间内变化缓慢,帧间相关性很强,将其视为马尔可夫平稳信号是合理的。该方法减少了小弱目标跟踪过程中测量点与航迹关联的不确定性,提高了目标检测跟踪的可靠性和精度。

参考文献

- [1] 牛秩峰, 沈林成. 基于变形模板的多目标识别与定位[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 1026-1030.
Niu Zhi-feng and Shen Lin-cheng. Multiple target recognition and location using deformable templates in downward looking image [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(6): 1026-1030.
- [2] 程建, 杨杰. 一种基于均值偏移的红外目标跟踪新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(3): 231-235.
Cheng Jian and Yang Jie. Novel infrared object tracking method based on mean shift [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2005, 24(3): 231-235.
- [3] 张坤华, 王敬儒, 张起衡. 基于边界不变矩的扩展目标识别方法[J]. 光电工程, 2005, 32(8): 1-5.
Zhang Kun-hua, Wang Jin-ru, and Zhang Qi-heng. Method for recognizing extended target based on boundary invariants [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(8): 1-5.
- [4] 强勇, 焦李成, 保铮. 动态规划算法进行弱目标检测的机理研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(6): 721-727.
Qiang Yong, Jiao Li-cheng, and Bao Zheng. Study on mechanism of dynamic programming algorithm for dim target detection [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(6): 721-727.
- [5] Succary R and Cohen A, *et al.* A dynamic programming algorithm for point target detection: practical parameters for DPA [J]. *Signal and Data Processing of Small Targets 2001, Proceeding of SPIE Vol.4473: 96-100.*
- [6] Kirubarajan T and Bar-Shalom Y. Low observable target motion analysis using amplitude information [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron System*, 1996, 32(4): 1367-1384.
- [7] Chummun M R, Kirubarajan T, and Bar-Shalom Y. An adaptive early-detection ML/PDA estimator for LO targets with EO sensors [C]. 2000 IEEE on Aerospace Conference Proceedings, 18-25 March 2000, Vol.3: 449-464.
- [8] Kirubarajan T and Bar-Shalom Y. Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter [J]. *Proc. IEEE*, 2004, 92(3): 536-557.
- [9] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 221-224, 268-270.
Zhou Hong-ren, Jing Zhong-liang, and Wang Pei-de. Tracking of maneuvering targets[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991: 221-224, 268-270.

李正周: 男, 1974年生, 博士, 讲师, 主要从事目标识别与跟踪、图像信号处理及惯性制导。

金 钢: 男, 1958年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为目标识别与跟踪、激光传输与成像。

董能力: 男, 1969年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为系统辨识、目标识别与跟踪。