

数据关联算法在光电探测系统中的应用

李炎冰¹, 巩华², 陈洪亮¹, 周德召¹, 程小亮¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000; 2. 空装重点型号部, 北京 100843)

摘要: 由于光电探测系统采用被动的红外探测方式, 当系统处在工作状态时, 视场中地面背景下与周围环境温差较大的红外热源均有可能被光电探测系统当作目标检出。针对这一问题, 研究了几种常用的数据关联方法, 针对杂波问题建立数学模型, 采用联合概率数据关联算法进行仿真。仿真结果表明, 该算法能有效排除闪烁杂波, 很好地解决地面红外热源的干扰问题。

关键词: 光电探测; 红外热源; 联合概率数据关联; 目标探测

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0077-03

Application of Data Association Algorithm in Photoelectric Detection System

LI Yan-bing¹, GONG Hua², CHEN Hong-liang¹, ZHOU De-zhao¹, CHENG Xiao-liang¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment Institute, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Air Force Armament Department, Beijing 100843, China)

Abstract: The optical detection system works in the mode of passive infrared detection, and when the system works in normal condition, all the infrared heat sources on the ground may be detected as targets because of the large temperature differences between them and the surrounding environment. To solve this problem, we studied several commonly used data association algorithms, built up a mathematical model for the clutter problem, and made simulation to the algorithm through Joint Probability Data Association (JPDA). The results show that the algorithm can effectively remove the flicker noise, and solve the interference problem caused by the heat sources on the ground.

Key words: photoelectric detection; infrared heat sources; Joint Probability Data Association (JPDA); target detection

0 引言

光电探测系统与有源跟踪相比具有抗电子干扰能力强、隐蔽性好、定位精度高、探测隐身目标能力强等特点, 是现代战斗机的重要组成部分。但光电探测系统仅能够提供方位和俯仰角信息, 属于被动跟踪, 且得到的目标信息中存在大量虚警和杂波。因此需要分析目标与背景特性, 结合数据建立数据库, 并利用数据关联算法对大气紊流、阳光反射等闪烁杂波进行排除。目前, 国内外学者对数据关联算法的理论研究很多, 各种改进算法也层出不穷, 但数据关联算法的应用论文比较少。栾铸徽将最近邻联合概率数据关联算法应用

到舰载雷达跟踪中; 李辉、张安等人将两点式数据关联算法应用到多目标跟踪中。本文通过比较几种经典数据关联算法的优缺点, 将联合概率数据关联算法应用到地面红外热源干扰的仿真实验中, 取得了良好的效果。

1 背景及杂波的红外辐射特性分析

光电探测设备在正常工作模式下的目标背景一般是天空或者地面。在某种条件下, 背景辐射在探测器上形成的辐照度会比目标产生的辐照度高出几个数量级, 并且变化复杂; 而由于地面各种物质如水域、山川、草地、植被、岩石、房屋建筑等对天空辐射的反射率相差很大, 因此研究地面背景比天空背景更复杂, 对实战的意义更明显。地面背景辐射波长主要集中在两个区域: 一种是反射的太阳光辐射, 其中包括天空散射的阳

光辐射,这部分辐射主要在近红外区;另一种是地球本身的辐射,其辐射主要集中在波长4 μm 以上的区域^[1]。

对地面杂波进行分析,发现主要是由大气紊流、阳光反射等造成的闪烁点。闪烁点因不稳定性在光电探测系统检测画面上产生大量闪烁点,造成虚警率增加,严重影响产品性能。

2 数据关联算法性能分析

为了降低虚警率,需要采用数据关联算法对闪烁杂波进行剔除。数据关联是跟踪过程中的关键部分,也是实现多目标跟踪的前提。本文对几种经典数据关联算法进行分析比较。

2.1 最近邻域标准滤波器

最近邻域标准滤波器(NNKF)的基本原理是:如果只有1个量测落入相关波门内,则直接用该量测进行航迹更新;如果有多个量测落入相关波门内,则要取统计意义上离被跟踪目标距离最小的候选回波作为目标回波,也就是使新息加权范数

$d^2(z) = [z - \hat{z}(k+1/k)]' S^{-1}(k+1)[z - \hat{z}(k+1/k)]$ (1) 达到极小的量测^[2]。

2.2 概率数据互联算法

概率数据互联算法(PDAF)把所有候选回波都作为目标真实量测值进行考虑,并根据不同的相关情况计算出各个回波来自目标的概率,然后对不同回波进行加权,把各个候选回波的加权和作为等效回波,从而对目标的状态进行更新^[3]。

考虑一个已经建立航迹的目标,量测的预测值

$$\hat{z}(k/k-1) = H_k \hat{X}(k/k-1) \quad (2)$$

$$\beta_i(k) = P\{\theta_i(k)/Z^k\} \quad (3)$$

式中, $\beta_i(k)$ 表示在 k 时刻,第 i 个量测是来自目标这一事件的后验概率。显然

$$\sum_{i=1}^{m_k} \beta_i(k) = 1 \quad (4)$$

$$\hat{X}(k/k) = \sum_{i=1}^{m_k} \beta_i(k) \hat{X}_i(k/k) \quad (5)$$

式中: $\hat{X}(k/k)$ 为第 i 个量测为真的条件下的状态估计; $\beta_i(k)$ 的计算与探测器的检测概率和波门体积有关。

2.3 联合概率数据互联算法

联合概率数据互联算法(JPDA)与PDAF的不同之处在于引入了“聚”的概念^[4]。它综合考虑聚内的所有目标和量测,在计算互联概率时需要考虑多条航迹对测量的竞争,有竞争的加权值要有所减少,以体现其他目标对该量测的竞争。

为了表示跟踪波门内量测和目标之间的关系,Bar-Shalom引入了确认矩阵的概念。确认矩阵被定义为

$$\Omega = [\omega_{jt}] = \begin{bmatrix} \omega_{10} & \cdots & \omega_{1T} \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_{m_0 0} & \cdots & \omega_{m_0 T} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\omega_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{量测 } j \text{ 落入目标 } t \text{ 的确认门内} \\ 0 & \text{量测 } j \text{ 没落入目标 } t \text{ 的确认门内} \end{cases}, t=0,$ 表示没有目标与量测对应,即 Ω 对应的列元素 ω_{j0} 全都是1,这就意味着此时的量测都来源于杂波或者虚警。

设 $\theta_{jt}(k)$ 表示量测 j 源于目标 t 的事件,而事件 $\theta_{j0}(k)$ 表示量测 j 源于杂波或虚警。按照概率数据互联的定义有

$$\beta_{jt}(k) = P\{\theta_{jt}(k) | Z^k\} \quad j=1,2,\dots,m_k, t=0,1,\dots,T \quad (7)$$

表示第 j 个量测与目标 t 互联的概率,且

$$\sum_{j=0}^{m_k} \beta_{jt}(k) = 1 \quad (8)$$

则 k 时刻目标 t 的状态估计为

$$\hat{X}^t(k|k) = E[X^t(k) | Z^k] = \sum_{j=0}^{m_k} \beta_{jt}(k) \hat{X}_j^t(k|k) \quad (9)$$

式中,

$$\hat{X}_j^t(k|k) = E[X^t(k) | \theta_{jt}(k), Z^k] \quad (10)$$

第 j 个量测与目标互联的概率的算式为

$$\beta_{jt}(k) = P\{\theta_{jt}(k) | Z^k\} = P\left\{\bigcup_{i=1}^{n_k} \theta_{jt}^i(k) | Z^k\right\} = \sum_{i=1}^{n_k} \hat{\omega}_{jt}^i(\theta_i(k)) P\{\theta_i(k) | Z^k\} \quad (11)$$

式中: $\theta_{jt}^i(k)$ 表示在第 i 个联合事件中,有效量测 j 源于目标 t 的事件; $\theta_i(k)$ 表示第 i 个联合事件; n_k 表示联合事件的总数,而

$$\hat{\omega}_{jt}^i(\theta_i(k)) = \begin{cases} 1 & \theta_{jt}^i(k) \subset \theta_i(k) \\ 0 & \theta_{jt}^i(k) \not\subset \theta_i(k) \end{cases} \quad (12)$$

2.4 数据关联算法仿真结果

2.4.1 单个目标的跟踪

假设目标初始状态为 $X(0) = [1500 \text{ m} \quad 500 \text{ m/s}; 1500 \text{ m} \quad 400 \text{ m/s}]$,采样间隔 $T=1 \text{ s}$,仿真步数 $N=50$,观测误差为 $\sigma_x=100 \text{ m}, \sigma_y=100 \text{ m}$,过程噪声 $q=10 \text{ m}^2/\text{s}^2$,进行10次蒙特卡罗仿真。用卡尔曼滤波器进行一步预测,建立自适应跟踪门,在测量值的周围产生均匀分布的杂波。仿真结果如图1~图3所示。

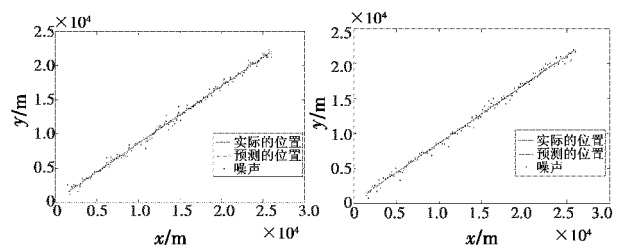


图1 NNKF目标跟踪仿真图 图2 PDAF目标跟踪仿真图
Fig.1 Simulation result of target tracking with NNKF Fig.2 Simulation result of target tracking with PDAF

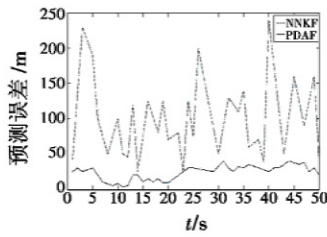


图 3 NNKF 和 PDAF 的误差曲线比较
Fig. 3 Error curves of NNKF and PDAF

NNKF 和 PDAF 通常都用于单个目标的跟踪,也可用于稀疏杂波环境下的多目标跟踪,但误差较大。由仿真图 3 也可以看出,概率数据关联算法性能远远优于最近邻算法,并且在密集杂波环境下,最近邻算法更容易误跟、错跟^[5]。

2.4.2 多个目标的跟踪

假设两个目标的起始状态为 $X(1)=[1500\text{ m } 300\text{ m/s}; 500\text{ m } 400\text{ m/s}]$, $X(2)=[500\text{ m } 400\text{ m/s}; 1500\text{ m } 300\text{ m/s}]$ 。观测误差为 $\sigma_x = \sigma_y = 100\text{ m}$,过程噪声分量为 $q_1 = q_2 = 2\text{ m/s}^2$,探测概率为 $P_D = 0.9$,正确量测落入跟踪门内的概率为 $P_c = 0.99$,关联门限 $\gamma = 16$,采样间隔 $T = 1\text{ s}$,波门内的期望杂波数 $m = 2$,进行 100 次蒙特卡罗仿真,仿真结果如图 4 ~ 图 7 所示。

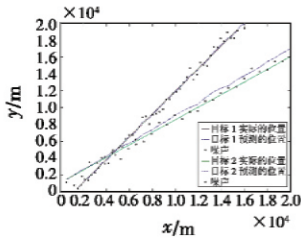


图 4 PDAF 算法多目标跟踪仿真图

Fig. 4 Simulation result of multi-target tracking with PDAF

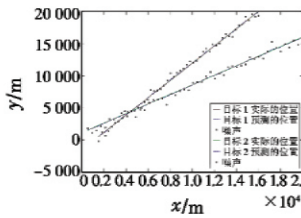


图 6 JPDA 算法多目标跟踪仿真图

Fig. 6 Simulation result of multi-target tracking with JPDA

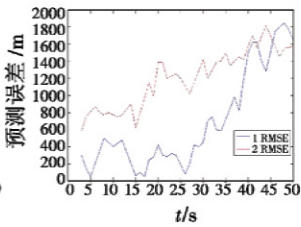


图 5 PDAF 算法的均方误差曲线

Fig. 5 The error curve of PDAF

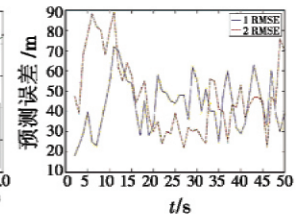


图 7 JPDA 算法的均方误差曲线

Fig. 7 The error curve of JPDA

从仿真结果图 4、图 5 可以看出,在密集杂波环境下,PDAF 算法对两交叉目标的跟踪结果发散,对目标的跟踪误差较大;而从图 6、图 7 可以看出,同样在密集杂波环境下,JPDA 算法滤波结果比较理想,能够对两交叉目标进行良好的跟踪。

综上所述,在单目标跟踪环境下,最近邻算法计算

比较简单,但只适用于在稀疏回波环境中跟踪慢速目标;而概率数据关联算法是一种全邻算法,综合考虑了关联门内所有的量测信息,所以概率数据关联算法相对来说更准确一些,但其计算量稍大。在多目标跟踪环境下,由于概率数据关联算法没有考虑落入多个目标相交波门内的公共回波,所以该算法不适合跟踪多目标;而联合概率数据关联算法通过引入确认矩阵的概念来综合考虑各个量测的目标来源情况,对多目标跟踪较为准确。

3 解决方案及仿真结果

通过对杂波特点的分析,本文采用 JPDA 算法对潜目标进行关联,算法流程如图 8 所示。依据关联结果采用序列概率比测试 (SPRT) 方法对闪烁杂波进行排除。利用 JPDA 每帧关联后,计算每条航迹的得分分数,经过 n 次扫描所得到的航迹分数函数可以通过累加的方法求出。由于闪烁杂波不能在每帧中稳定出现,无法形成稳定航迹,因此闪烁杂波的航迹分数很低,本文通过设置合理阈值很容易将其剔除。仿真图像如图 9、图 10 所示。图 9 所示为检测结果,出现了很多虚警,图 10 为杂波剔除算法运行后的结果,只有真实的目标保留下来,其他干扰被抑制。

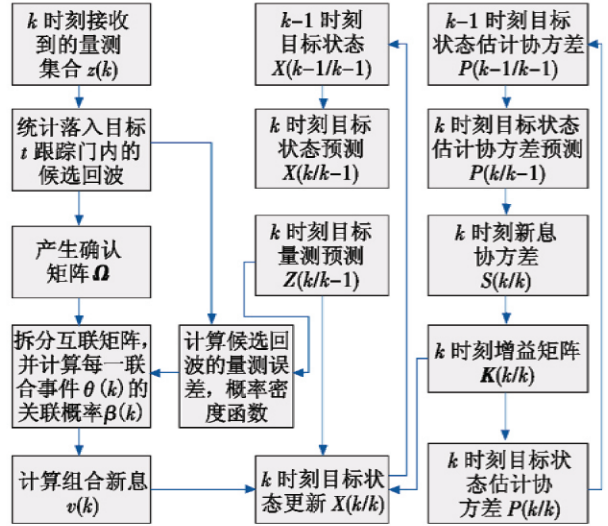


图 8 算法流程图
Fig. 8 The flow chart of the algorithm

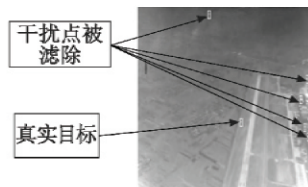


图 9 目标检测结果
Fig. 9 The result of target detection

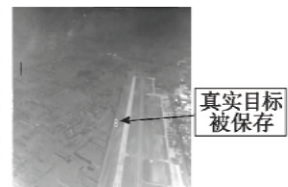


图 10 加载杂波剔除算法后的结果
Fig. 10 The result after loading clutter eliminating algorithm

(下转第 93 页)

- [2] 俞辉, 蹇继贵, 王永骥. 多智能体有向网络的加权平均一致性[J]. 微计算机信息, 2007, 23(5): 239-241. (YU H, JIAN J G, WANG Y J. Weighted average-consensus for directed networks of multi-agent[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(5): 239-241.)
- [3] 谭拂晓, 关新平, 刘德荣. 非平衡拓扑结构的多智能体网络系统一致性协议[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1087-1092. (TAN F X, GUAN X P, LIU D R. Consensus protocol in networked multi-agent systems with non-balanced topology[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(10): 1087-1092.)
- [4] 吕红庆, 贾英民. 二阶线性多智能体网络平均一致性问题研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(8): 1130-1137. (LÜ H Q, JIA Y M. Research on multi-agent network of second-order[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(8): 1130-1137.)
- [5] 杨文. 多智能体系统一致性问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (YANG W. Consensus problem in multi-agent systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.)
- [6] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [7] 陈侠, 赵明明, 徐光延. 基于模糊动态博弈的多无人机空战策略研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 19-23. (CHEN X, ZHAO M M, XU G Y. Fuzzy dynamic game based operation strategy for multiple UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6): 19-23.)
- [8] 廖沫, 陈宗基. 基于多 Agent 分布协同拍卖的动态目标分配算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 180-196. (LIAO M, CHEN Z J. Dynamic target assignment method based on multi-agent decentralized cooperative auction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 180-196.)
- [9] BERTSEKAS D P. The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem[J]. Annals of Operations Research, 1988, 14(1): 105-123.
- [10] 于文涛, 彭军, 吴敏, 等. 基于拍卖的多智能体任务分配算法[J]. 计算机仿真, 2008, 25(12): 184-188. (YU W T, PENG J, WU M, et al. A MAS task allocation algorithm based on auction[J]. Computer Simulation, 2008, 25(12): 184-188.)
- [11] MOORE K L, LUCARELLI D. Decentralized adaptive scheduling using consensus variables [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2006, 17(10): 921-940.
- [12] REN W. Multi-vehicle consensus with a time-varying reference state [J]. System & Control Letters, 2007(1): 474-483.
- [13] WHEELER M, SCHRICK B, WHITACRE W, et al. Cooperative tracking of moving targets by a team of autonomous UAVs [C]//The 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE, 2006: 1-9.
- [14] 周锐, 吴雯漫, 罗广文. 自主无人机的分散化协同控制[J]. 航空学报, 2008, 29(s1): 26-32. (ZHOU R, WU W M, LUO G W. Decentralized coordination control of multiple autonomous UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(s1): 26-32.)

(上接第79页)

4 结束语

本文将联合概率数据关联算法应用到光电探测设备地杂波的滤除问题上。仿真结果表明, 该算法能有效剔除检测时由闪烁杂波产生的虚警, 提高了产品检测性能, 具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 赵强, 刘隆和. 红外成像制导及其目标背景特性分析[J]. 航天电子对抗, 2006, 22(1): 27-29. (ZHAO Q, LIU L H. IR imaging guidance and analysis of targets background characteristic[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2006, 22(1): 27-29.)
- [2] 何友, 修建娟, 关欣, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013. (HE Y, XIU J J, GUAN X, et al. Radar data processing with applications[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [3] 曾斯. 多机动目标跟踪中数据关联算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011. (ZENG S. Research on data association algorithm of multiple maneuvering target tracking [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [4] 张成宝. 密集目标环境下的数据关联算法研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2013. (ZHANG C B. Research on data association algorithm in dense clutter environment [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2013.)
- [5] 冯洋. 多目标跟踪的数据关联算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. (FENG Y. Research on data association algorithm of multiple target tracking[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.)