

基于空管雷达的航迹回溯方法研究与实现

孙伟峰

四创电子股份有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月31日

摘 要

针对空管雷达在复杂杂波环境下容易出现航迹关联错误、目标跟踪丢失的问题, 本文提出了一种基于多假设回溯处理的航迹回溯方法。该方法在航迹跟踪错误发生后的前八帧数据中, 通过六种回溯处理任务, 结合直线模型与圆形模型, 对暂时航迹进行多模型匹配计算, 直至找到正确的回溯点迹, 并重新初始化航迹滤波器。实际应用表明, 该方法能够有效恢复错误跟踪的航迹, 显著提高航迹连续性和跟踪精度。

关键词

空管雷达, 航迹回溯, 多假设处理, 数据关联, 航迹跟踪

Research and Implementation of Trajectory Retrospective Method Based on Air Traffic Control Radar

Weifeng Sun

SunCreate Electronics Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: June 29, 2026; accepted: July 21, 2026; published: July 31, 2026

Abstract

To address the issues of track association errors and target tracking loss in Air Traffic Control (ATC) radar under complex clutter environments, this paper proposes a trajectory retrospective method based on multi-hypothesis processing. Within the first eight frames after a tracking error occurs, the method performs six retrospective processing tasks. It combines linear and circular motion models to carry out multi-model matching calculations on tentative tracks until the correct retrospective plot is found, and then re-initializes the track filter. Practical application results demonstrate that this method can effectively recover erroneously tracked trajectories and significantly improve track continuity and tracking accuracy.

Keywords

Air Traffic Control Radar, Trajectory Retrospection, Multi-Hypothesis Processing, Data Association, Track Tracking

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统的雷达系统由天馈、发射、接收、信号处理、航迹处理、监控显示等分系统组成，各分系统之间相互关联、协同工作。其中，航迹处理与信号处理是现代雷达系统的两大核心组成部分。雷达接收到的回波信号首先在信号处理服务器中进行处理，实现杂波抑制、干扰信号滤除和目标信号检测等功能；航迹处理则在此基础上，最大限度地提取目标的坐标信息与特征信息，对监测区域内的目标运动轨迹进行估计，并预测其在下一时刻的位置，从而实现高精度实时跟踪。

为了实现空中目标的持续稳定跟踪，航迹处理需要对接收到的点迹进行数据关联、跟踪滤波、平滑预测等一系列运算。在数据关联过程中，由于杂波和干扰信号的存在，点迹与航迹之间可能发生错误关联。一旦出现错误关联，航迹在下一时刻的位置预测值将与目标实际位置产生较大偏差。若此时航迹波门内仍存在点迹且位置靠近预测值，则航迹将再次关联错误，而真实目标点迹则可能被当作暂时航迹处理。经过若干帧后，原始航迹因连续未能关联到有效点迹而被删除，而真实目标点迹在连续关联若干帧后却生成新的航迹。为避免此类问题，本文提出了一种航迹回溯处理方法。

随着城市化进程加快，建筑物日益密集，高速公路等基础设施不断延伸，架设于城市内部的雷达面临日益复杂的杂波环境，对航迹处理的鲁棒性提出了更高要求。本文正是在此背景下，围绕航迹回溯技术开展研究。

近年来，针对复杂环境下航迹跟踪问题的研究取得了大量成果。经典方法如交互多模型(IMM)、联合概率数据关联(JPDA)和多假设跟踪(MHT)等已在目标机动与杂波共存的条件中展现出良好性能[1]-[3]。其中，IMM通过切换多个运动模型提高机动目标跟踪精度[2]；JPDA对多个点迹与航迹之间进行加权概率关联，适用于中低密度杂波[1]；MHT通过延迟决策保留多个关联假设，常用于高复杂度场景[4][5]。然而，上述方法普遍对计算资源要求高，且在工程实时系统中难以同时保证高准确率与低延迟。尤其是在航迹错误关联已经发生、滤波状态发散后，以上方法缺乏主动回溯机制，难以对历史帧数据进行纠正。

本文提出的航迹回溯方法不同于上述主流策略，其核心创新在于：在航迹关联错误发生后，不依赖全局假设树，而是在有限的前八帧时间窗口内，通过六种轻量化回溯任务进行针对性的点迹重匹配，结合直线与圆形运动模型，成功找回真实目标点迹并重新初始化滤波器。与MHT相比，本文方法避免了组合爆炸；与IMM和JPDA相比，本方法具备显式的错误纠正能力，更适合工程部署。该方法体现了在特定雷达实时处理系统中的独创性与实用优势。

2. 数据关联

航迹连续性的维持依赖于高效、稳健的点迹与航迹关联算法。本文采用相关隶属度算法进行点迹与航迹的关联处理。对于待处理点迹，首先根据其方位信息确定所处扇区，然后以该扇区为中心，在左右各扩展一个扇区的范围内搜索航迹，进行遍历相关处理。

每条航迹在进行状态位置更新后会根据当权航迹的位置, 扫描周期和航迹速度来预测航迹下一帧的位置(航迹预测值), 然后以航迹预测位置中心加上距离前沿和距离后沿以及方位前沿、方位后沿形成的扇形区域作为本航迹的相关波门。点迹与航迹进行相关处理时, 首先判断点迹是否落入航迹波门内。若落入, 则进一步计算点迹相对于航迹的速度是否处于优化参数配置的最小跟踪速度与最大跟踪速度之间。若满足速度条件, 则计算点迹与航迹之间的相关隶属度。相关隶属度的计算运用了隶属度算法, 它不是指某一个特定的算法, 而是一类用于计算某个元素属于一个模糊集合程度的方法和函数。本文采用了三角形隶属函数来分别计算距离隶属度、速度隶属度、航向隶属度和帧间距离隶属度, 然后根据参数配置的距离因子、速度因子、航向因子和帧间距离因子加权得到综合隶属度即相关隶属度; 然后将计算得到的隶属度值与预设的相关门限进行比较, 若大于门限, 则将该点迹插入航迹的相关点迹链中等待后续处理。通过相关处理后, 一条航迹可能与多个点迹相关上, 这时就需要航迹的最佳点迹选择处理, 最佳点迹选择的原则是找出与航迹相关隶属度最大的点作为航迹的目标点, 根据这个原则找出来的点迹可能不是真正属于这条航迹的目标点, 真正的目标点由于不是最佳点迹将被释放进入暂时航迹处理模块进行处理, 或者由于飞机转弯而使本帧的目标点迹丢失从而关联到其它点迹上。下一帧进行处理时, 可能正好在相关上错的点迹后的航迹波门里由点迹并且计算出来的相关隶属度比较高从而使得航迹有一次跟踪错误, 但它并不会一直错误跟踪, 因为很快航迹就会出现在波门里没有点迹的情况, 为解决这一问题, 本文引入了航迹回溯处理功能。

3. 回溯算法

航迹最佳点迹选择处理后, 可能出现以下两种错误情况:

- 1) 航迹关联了错误的点迹, 而真实目标点迹被丢弃, 进入暂时航迹处理流程;
- 2) 目标机动转弯导致航迹丢点, 航迹跟踪偏离, 后续真实目标点迹同样进入暂时航迹处理流程。

针对上述问题, 本文提出了一种基于多假设处理算法的航迹回溯方法。该方法在航迹跟踪错误发生后的第 1 帧至第 8 帧之间, 对暂时航迹的相关点迹进行多模型匹配计算, 直到找到正确的回溯点迹。此时, 航迹回溯成功, 随后对航迹滤波器进行重新初始化, 恢复后续航迹滤波跟踪处理。

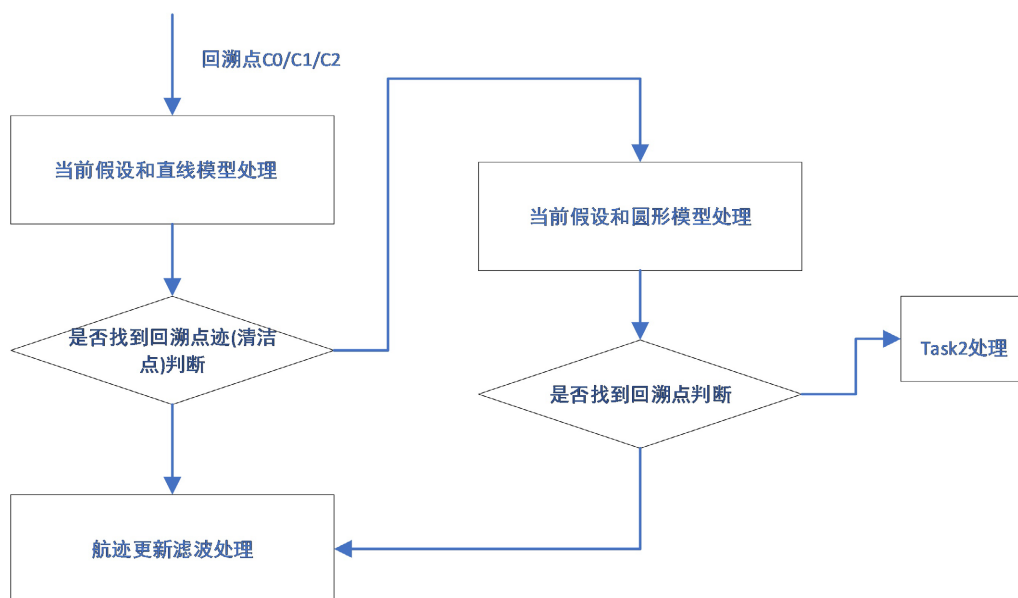


Figure 1. Flowchart of retrospective processing task 1

图 1. 回溯处理任务 1 流程图

为实现航迹回溯功能，本文设计了六项回溯处理任务，具体如下：

回溯处理任务 1：采用新的假设与清洁点处理，结合直线模型与圆形模型进行回溯点迹查找；

回溯处理任务 2：采用旧的假设与清洁点处理，结合常速度直线模型进行回溯点迹查找；

回溯处理任务 3：采用新的假设与轻杂波点处理，结合直线模型进行回溯点迹查找；

回溯处理任务 4：采用旧的假设与轻杂波点处理，结合常速度直线模型进行回溯点迹查找；

回溯处理任务 5：采用新的假设与重杂波点处理，结合常速度直线模型进行回溯点迹查找；

回溯处理任务 6：仅回溯一点，采用常速度直线模型进行回溯点迹查找。

各回溯任务的处理流程分别如图 1 至图 6 所示。

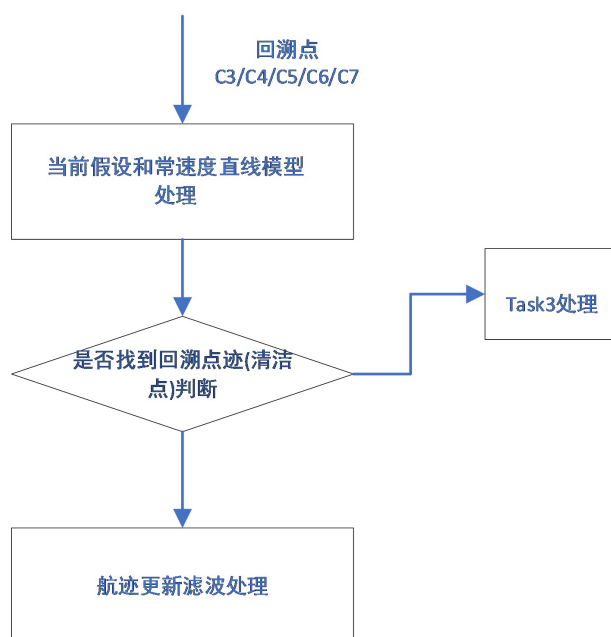


Figure 2. Flowchart of retrospective processing task 2

图 2. 回溯处理任务 2 流程图

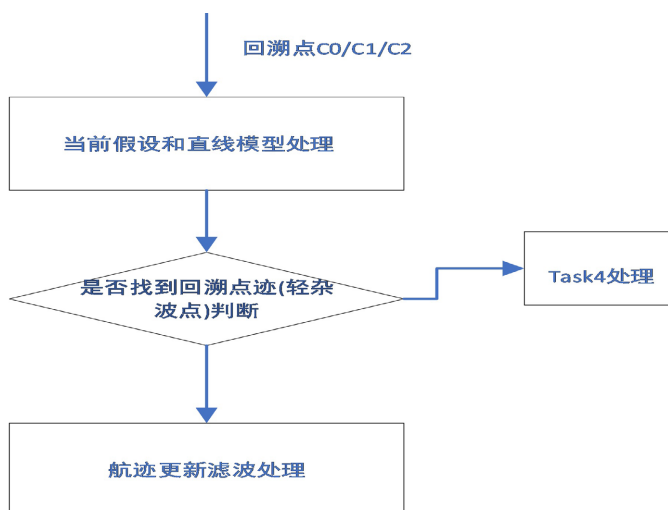


Figure 3. Flowchart of retrospective processing task 3

图 3. 回溯处理任务 3 流程图

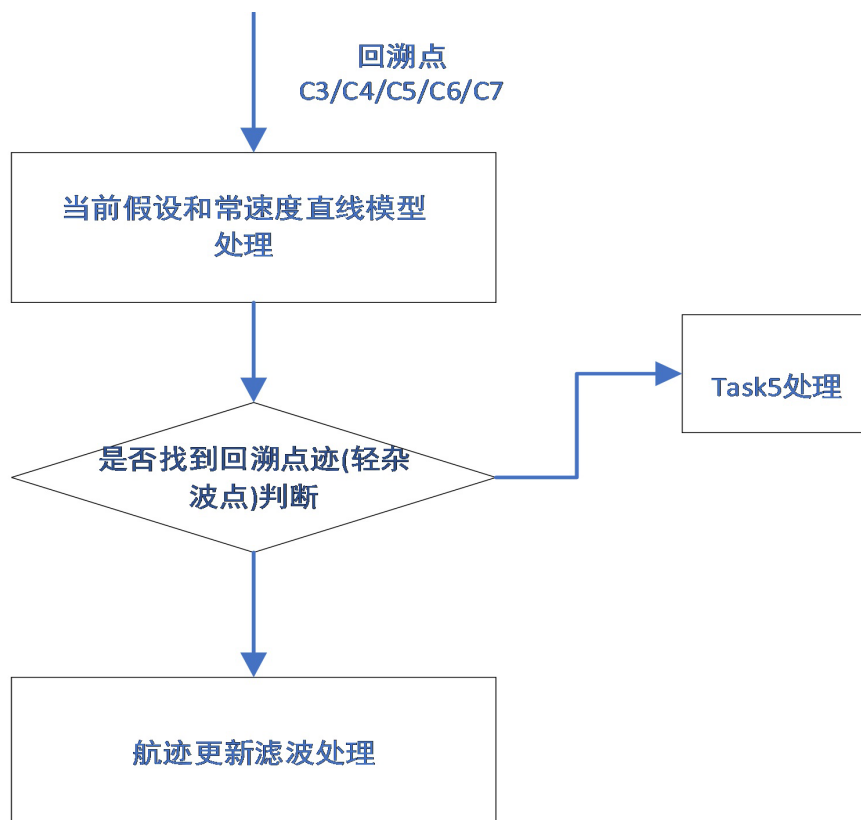


Figure 4. Flowchart of retrospective processing task 4

图 4. 回溯处理任务 4 流程图

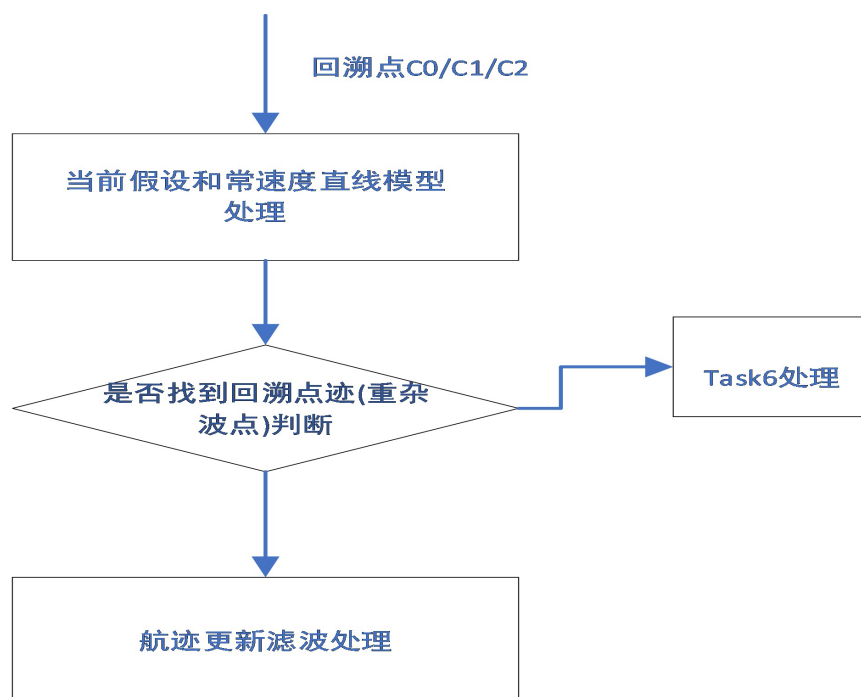


Figure 5. Flowchart of retrospective processing task 5

图 5. 回溯处理任务 5 流程图

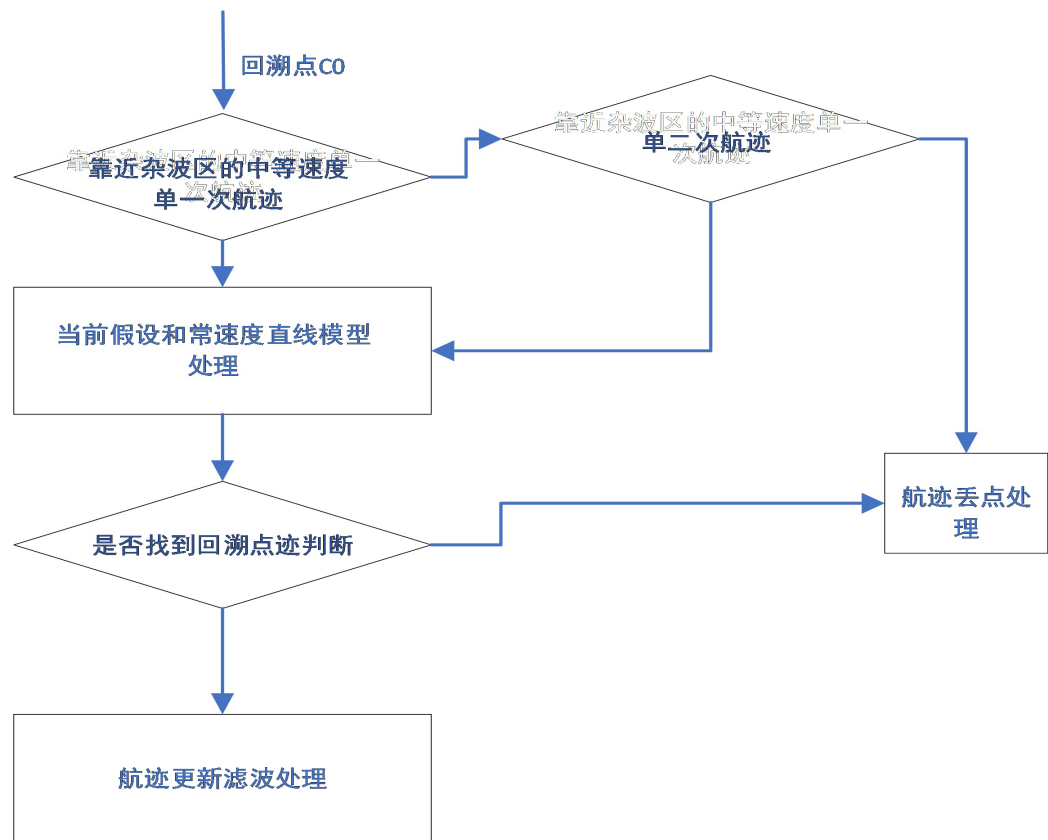


Figure 6. Flowchart of retrospective processing task 6
图 6. 回溯处理任务 6 流程图

上述六项任务覆盖了不同杂波环境、不同假设条件以及不同运动模型下的回溯需求，形成了完整的回溯处理机制，提高了算法在复杂场景下的适应能力。

4. 实际应用

为验证本文所提出的航迹回溯方法的有效性与适应性，基于某航管一次雷达实际采集的现场数据构建了测试数据集。该数据集来源于西南某空管雷达站，覆盖了城市及近郊典型空域，环境具有较高的地物杂波密度与突发干扰。数据总时长为 3 小时，共包含 28 批目标航迹，其中 8 批为高机动目标(包括盘旋、转弯、机动爬升等)，其余为匀速巡航目标。目标形态涵盖小型无人机、民用客机及直升机。数据按 1 帧/10 秒的刷新率进行采样，每批航迹平均包含约 40 到 70 个点迹。该数据集能充分反映雷达在复杂杂波环境下航迹关联错误、目标转弯丢点等典型问题，为回溯算法的有效性验证提供了科学依据。

该回溯算法已成功应用于最新研制的某波段航管一次雷达数据处理模块中。为验证算法有效性，分别选取两批机动目标，对比未使用回溯算法与使用回溯算法后的航迹跟踪效果。

图 7 展示了批号为 T0007 的目标在回溯处理前后的实际跟踪图。处理前，航迹在目标机动段出现了明显的偏离与中断；经回溯处理后，航迹连续性与平滑性显著提升，跟踪轨迹与目标真实运动轨迹吻合良好。

图 8 展示了批号为 0011 的目标在回溯处理前后的实际跟踪图。处理前，航迹受杂波干扰出现了错误关联，目标跟踪丢失；经回溯处理后，航迹成功恢复，跟踪稳定性明显增强。

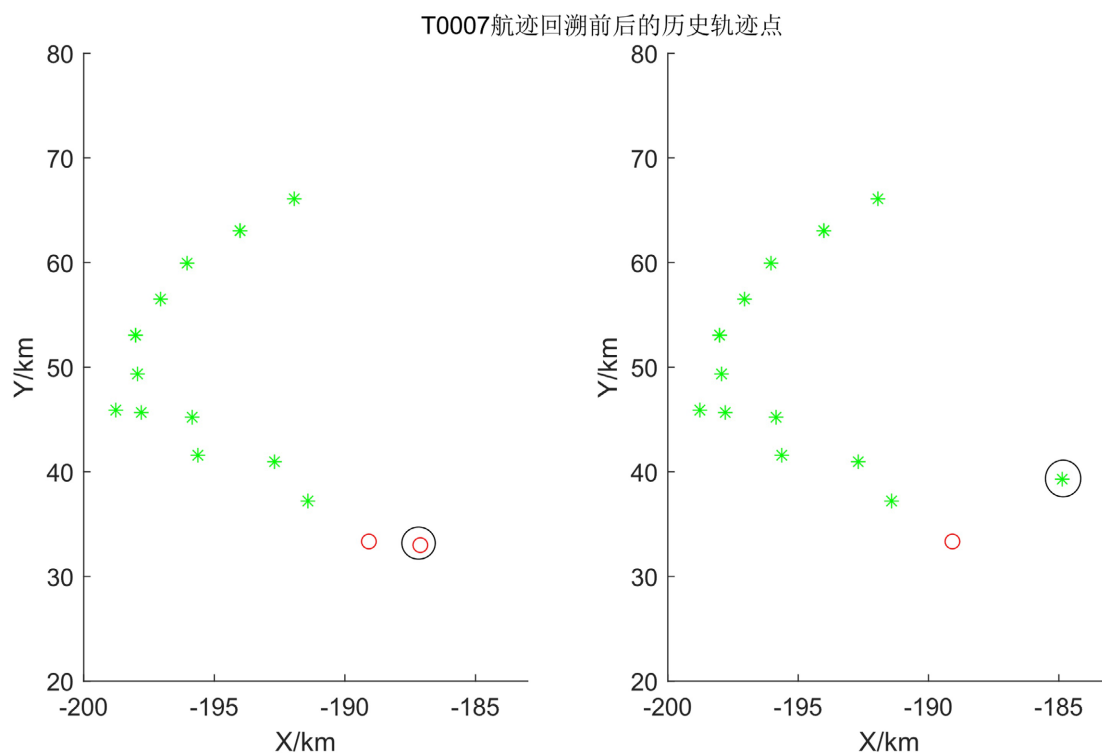


Figure 7. Actual tracking plots of target T0007 before and after retrospective processing

图 7. 批号 T0007 回溯处理前后实际跟踪图

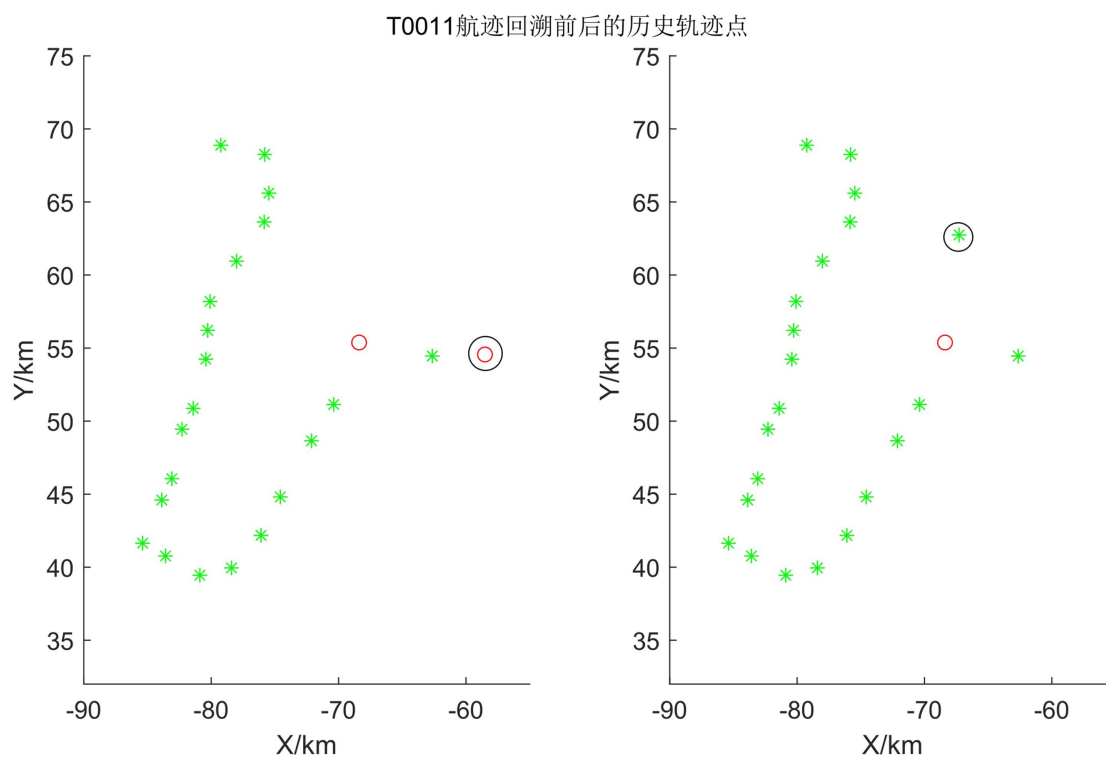


Figure 8. Actual tracking plots of target 0011 before and after retrospective processing

图 8. 批号 0011 回溯处理前后实际跟踪图

实际应用结果表明, 本文提出的航迹回溯方法能够有效应对复杂杂波环境下的航迹关联错误问题, 显著提高航迹跟踪的鲁棒性与连续性, 具有良好的工程应用价值。

5. 结语

本文针对空管雷达在复杂环境下航迹容易错误关联甚至丢失的问题, 提出了一种基于多假设处理的航迹回溯方法。通过设计六种回溯处理任务, 结合直线模型与圆形模型, 在航迹跟踪错误后的前八帧内进行回溯点迹查找与航迹滤波器重初始化。实际工程应用验证了该方法在提升航迹连续性、减少航迹中断方面的有效性。后续研究将围绕回溯算法的实时性优化以及在多雷达融合系统中的推广应用展开。

参考文献

- [1] 张明, 李强. 雷达数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [2] 王伟, 刘军. 复杂环境下雷达航迹跟踪算法研究[J]. 现代雷达, 2021, 43(5): 23-28.
- [3] Blackman, S. and Popoli, R. (1999) Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House.
- [4] 陈志杰, 赵永强. 空管雷达航迹处理关键技术综述[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123-130.
- [5] 李建勋, 敬忠良. 多传感器数据融合中的航迹关联算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 721-726.