

基于多初级假设的FM广播外辐射源雷达网航迹起始算法

胡越洋 易建新* 万显荣 程丰 徐苏霖

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: 基于调频(FM)广播信号的外辐射源雷达有着检测概率低、虚警率高、量测精度差的特点, 这给组网目标跟踪带来了极大挑战。一方面, 较高的虚警率使计算量增加, 组网算法的实时性受到考验; 另一方面, 检测概率低、方位角精度差造成冗余信息缺乏, 量测关联与航迹起始变得困难。为解决这些问题, 该文提出初级假设点和初级假设航迹的概念, 以及基于此概念的FM广播外辐射源雷达网航迹起始算法。首先构造可能的低维关联假设, 并解算出与其对应的初级假设点; 随后关联不同时刻的初级假设点, 形成多条可能的初级假设航迹; 最后联合多场雷达网数据进行假设航迹判决, 真实目标对应的初级假设航迹会得到确认, 错误关联导致的虚假初级假设航迹会被剔除。相比于已有算法, 所提算法有着更低的计算量, 更快的航迹起始速度, 仿真与实测结果均验证了所提算法的有效性。

关键词: FM广播外辐射源雷达; 初级假设; 航迹起始; 雷达网信息融合

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2024)03-0601-12

DOI: [10.12000/JR23155](https://doi.org/10.12000/JR23155)

引用格式: 胡越洋, 易建新, 万显荣, 等. 基于多初级假设的FM广播外辐射源雷达网航迹起始算法[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(3): 601–612. doi: 10.12000/JR23155.

Reference format: HU Yueyang, YI Jianxin, WAN Xianrong, *et al.* A track initiation method for FM-based passive radar network based on multiple elementary hypotheses[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 601–612. doi: 10.12000/JR23155.

A Track Initiation Method for FM-based Passive Radar Network Based on Multiple Elementary Hypotheses

HU Yueyang YI Jianxin* WAN Xianrong CHENG Feng XU Sulin

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Passive radars based on FM radio signals have low detection probability, high false alarm rates and poor accuracy, presenting considerable challenges to target tracking in radar networks. Moreover, a high false alarm rate increases the computational burden and puts forward high requirements for the real-time performance of networking algorithms. In addition, low detection probability and poor azimuth accuracy result in a lack of redundant information, making measurement association and track initiation challenging. To address these issues, this paper proposes an FM-based passive radar network based on the concepts of elementary hypothesis points and elementary hypothesis track, as well as a track initiation algorithm. First, we construct possible low-dimensional association hypotheses and solve for their corresponding elementary hypothesis points. Subsequently, we associate elementary hypothesis points from different frames to form

收稿日期: 2023-09-01; 改回日期: 2023-10-30; 网络出版: 2023-11-16

*通信作者: 易建新 jxyi@whu.edu.cn *Corresponding Author: YI Jianxin, jxyi@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61931015, 62071335, 62250024), 湖北省自然科学基金创新群体(2021CFA002), 中央高校自主科研项目(2042022dx0001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61931015, 62071335, 62250024), The Natural Science Foundation of Hubei Province of China (2021CFA002), The Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (2042022dx0001)

责任编辑: 周建江 Corresponding Editor: ZHOU Jianjiang

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

multiple possible elementary hypothesis tracks. Finally, by combining multi-frame radar network data for hypothesis track judgment, we confirm the elementary hypothesis tracks corresponding to the real targets, and eliminate the false elementary hypothesis tracks caused by incorrect associations. Result reveal that the proposed algorithm has lower computational complexity and faster track initiation speed than existing algorithms. Moreover, we verified the effectiveness of the proposed algorithm using simulation and experimental results.

Key words: FM-based passive radar; Elementary hypothesis; Track initiation; Information fusion of radar network

1 引言

外辐射源雷达是一种自身不发射电磁波,利用空间中已有的第三方信号进行探测的特殊雷达^[1-4]。在常见的商用信号中,调频(FM)广播信号凭借其覆盖范围广、辐射功率高、发射站众多等优势,而被广泛利用于组网探测^[5-10]。但相比于数字调制信号(例如DTMB, DVB-T信号等),基于FM广播信号的外辐射源雷达具有检测概率低、虚警率高、量测精度差的特点。除此之外,FM广播外辐射源雷达的探测性能在很大程度上取决于当前播放节目的类型^[11-14],这意味着雷达性能将会是时变的,给航迹起始带来了很大的挑战。

航迹起始是雷达网目标跟踪中的重要一环,目的是完成量测-量测的关联,并估计笛卡儿坐标系下的目标状态。经典的航迹起始算法包括直观法、逻辑法、Hough变换法^[15],交互式多模型-集成概率数据关联滤波器(Interacting Multiple Model-integrated Probabilistic Data Association Filters, IMM-IPDAF)方法^[16],近年来针对雷达网络的航迹起始问题,国内外学者提出了新的见解。文献^[17]提出一种概率多假设跟踪(Probabilistic Multi-Hypothesis Track, PMHT)算法,对量测似然函数求局部最大值,从得到的结果中选择部分点作为航迹起点;作为一种改进算法,文献^[18]进一步考虑了虚警密集时可能造成的误判,结合了多帧数据,提高了估计精度;文献^[19]提出似然比检验(Likelihood Ratio testing, LR testing)算法,通过近似实现了对所有关联事件的遍历;文献^[20-22]构造低维假设,以较低的时间复杂度得到接近最优解的性能;文献^[23]则是对观测域进行网格划分,当有较多的量测落入同一网格时,对这些量测作关联假设判决;文献^[24]研究了基于随机有限集(Random Finite Set, RFS)的航迹起始方法,此种方法无需执行显式的关联操作,可以降低高虚警率时的计算复杂度。

现有外辐射源雷达网航迹起始算法大都是针对如DTMB, DVB-T信号等第三方信号设计,直接应用于FM广播外辐射源雷达网效果不佳。以文献^[22]

为例,在2D场景下,算法至少需要3个收发对同时检测到目标才能完成量测互联判决、航迹起始,但FM广播外辐射源雷达检测概率较低,在一些信号覆盖率不高的区域难以满足该条件,导致航迹起始慢甚至无法起始。本文在此基础上将低维假设所需的量测个数进一步降低为两个,具体做法可以概括为:将不同收发对的量测两两组合,计算得出笛卡儿坐标系下的坐标与速度,并记作初级假设点;对于符合条件的初级假设点进行合并,作为航迹起点;剩余的初级假设点序贯地联合多场数据组成初级假设航迹,对达到设定长度的初级假设航迹进行判决以实现航迹起始。接下来本文对此问题进行建模,并介绍所提航迹起始算法,最后通过仿真和实测数据验证所提算法的有效性。

2 系统模型

2.1 运动模型

由于所讨论的场景中,忽略目标高度对跟踪精度影响很小,本文采用2D的离散化连续白噪声加速模型(Discretized Continuous White Noise Acceleration, DCWNA)^[25]对目标运动进行建模,目标状态可以表示为

$$\mathbf{x} = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T \quad (1)$$

其中, $\mathbf{p} = [x \quad y]^T$, $\mathbf{v} = [\dot{x} \quad \dot{y}]^T$ 分别表示目标的位置与速度,上标T为转置, k 表示场次, T 表示相邻场次之间的时间间隔,那么 kT 时刻的目标状态可记作 $\mathbf{x}(k)$,目标的运动方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q}) \otimes \begin{bmatrix} T^3/3 & T^2/2 \\ T^2/2 & T \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{u}(k)$ 是服从零均值高斯分布的过程噪声,协方差矩阵为 \mathbf{Q} , \mathbf{F} 为状态转移矩阵, \otimes 表示克罗内克积, \mathbf{I}_n 表示 $n \times n$ 的单位对角阵, $\mathbf{q} \triangleq [q_x \quad q_y]^T$

表示过程噪声功率谱密度, $\text{diag}(\cdot)$ 是以括号内变量为对角元素构造的对角矩阵。

2.2 量测模型

不失一般性, 假定所考虑的FM广播外辐射源雷达网为多发一收架构, 发射站的坐标为 $\mathbf{p}_{n_t} = [x_{n_t} \ y_{n_t}]^T$, ($n_t = 1, 2, \dots, N_t$), 接收站坐标设置为坐标原点, 在此设定下共形成 N_t 个收发对, 均可用于目标探测。第 n_t 个收发对得到的目标量测表示为

$$\begin{aligned} z_{n_t} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_{n_t}) + \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_{n_t}) &= \begin{bmatrix} r_b \\ v_b \\ \theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \|\mathbf{p}\| + \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{n_t}\| \\ \left(-\frac{\mathbf{p}}{\|\mathbf{p}\|} - \frac{\mathbf{p} - \mathbf{p}_{n_t}}{\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{n_t}\|} \right)^T \cdot \mathbf{v} \\ \text{atan2}(x, y) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5) \quad (6)$$

量测值包含双基距离、双基速度与方位角, 但需要注意的是, 对于FM广播外辐射源雷达, 方位角的误差水平较高, 距离误差也是在千米量级, 所以直接用单收发对的量测解算笛卡儿坐标不能得到让人满意的结果。式(5)和式(6)中, $\boldsymbol{\omega}$ 为量测误差, $\text{atan2}(\cdot)$ 是四象限反正切函数。

除了可能包含数量未知的目标量测之外, 每个收发对还会产生虚警, 假设虚警的个数服从泊松分布, 在观测域中服从均匀分布。

3 多初级假设航迹起始

本文所提的FM广播外辐射源雷达网目标跟踪算法流程如图1所示, 由于航迹维持算法与现有文献[21]保持一致, 在此不作赘述, 重点讨论后续的航迹起始算法。假设在第 k 场已经完成了航迹维持, 现针对未关联上的量测介绍所提算法。用 $\mathbf{Z}_{n_t}^k$ 表示收发对 n_t 在 k 时刻未在航迹维持步骤关联上的量测集合, 集合的势为 $M_{n_t}^k$ 。

步骤1 初级假设点构造

在外辐射源雷达网中, 不同收发对得到的量测值是发射站位置和目标状态的函数, 难以直观看出互相之间的关联关系, 于是通过构造最初级的假设来将其转换到笛卡儿坐标。初级的含义是构造的假设中未知数个数等于方程个数, 也即不存在冗余信息来判定假设的正确与否。具体做法是: 遍历所有收发对两两组合的情况, 随后遍历该收发对组合中量测两两组合的情况。由于目标高度被忽略, 两个双基距离即可实现椭圆定位^[26], 两个双基速度可实现速度解算。于是经此步骤后, 双基量测值被转换为笛卡儿坐标系下的初级假设点。图2以3个收发对、每个收发对均有两个量测为例, 展示了初级假设点的构造。由于有一个公共焦点的两个椭圆最多会产生两个交点, 所以每次组合会形成两个初级假设点。

步骤2 初级假设点筛选

虽然步骤1构造的是最低维的关联假设, 但是当收发对个数与量测个数较多时, 初级假设点数目仍相当可观。假定每个收发对有 M 个量测, 那么初级假设点的个数为 $2C_{N_t}^2 M^2$ 。实际处理中, 希望进一步

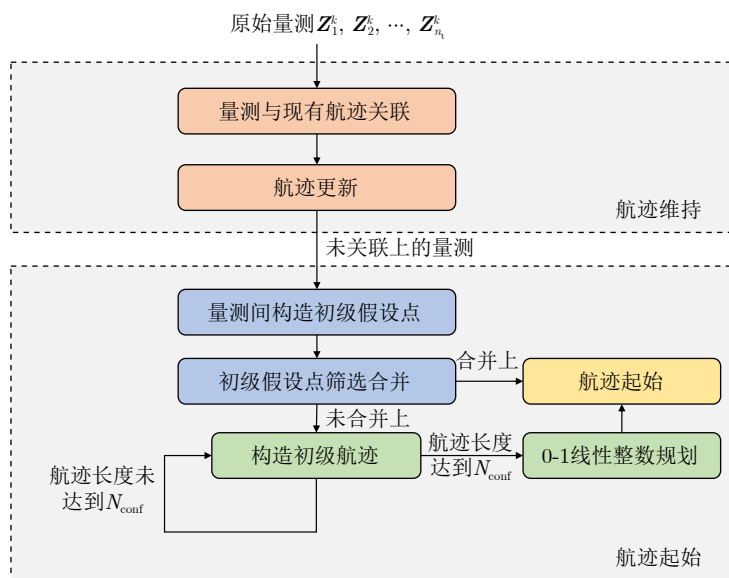


图1 组网跟踪算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed tracking algorithm for radar network

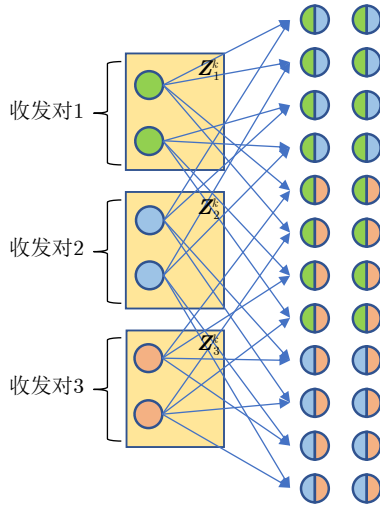


图2 初级假设点构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of constructing elementary hypothesis points

减少点数, 以便缩短后续运算耗时, 为此需要采取一些简单快速的筛选方式。后文将在不引起歧义的情况下省略场次索引 k , 用 $\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)} \triangleq [\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)} \ \hat{\mathbf{x}}_L^{(i)} \ \hat{\mathbf{y}}_L^{(i)} \ \hat{\mathbf{y}}_L^{(i)}]$ 表示第 i 个初级假设点。

如前文所述, FM广播外辐射源雷达的方位角量测精度不高, 但是可以用来判别初级假设点是否成立。式(7)给出了判别方式:

$$\left| \text{atan2}(\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)}, \hat{\mathbf{y}}_L^{(i)}) - \theta \right| < \theta_{\text{threshold}} \quad (7)$$

θ 和 $\theta_{\text{threshold}}$ 表示雷达量测的方位角和角度判决门限。

$$[\mathbf{D}_{\text{dist}}]_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } (\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)} - \hat{\mathbf{x}}_L^{(j)})^T [\text{cov}(\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)}) + \text{cov}(\hat{\mathbf{x}}_L^{(j)})]^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)} - \hat{\mathbf{x}}_L^{(j)}) < \eta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$\text{cov}(\cdot)$ 表示对应的估计误差协方差矩阵, 门限 η 由给定的关联概率根据卡方分布计算得到。距离矩阵的某一元素等于1表示对应两个点状态接近。与文献[22]不同之处在于, 在此需要额外定义点占用矩阵 $\mathbf{O}_{\text{p,occu}}$ 来描述两个初级假设点是否关联到了同一个量测, 由式(11)给出。

$$[\mathbf{O}_{\text{p,occu}}]_{i,j} = \begin{cases} 1, & \hat{\mathbf{x}}_L^{(i)} \text{和} \hat{\mathbf{x}}_L^{(j)} \text{关联到了同一个量测} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

定义 $\mathbf{O}_{\text{p,occu}}$ 的意义是每个量测最多只能对应一个目标, 如果 $[\mathbf{O}_{\text{p,occu}}]_{i,j} = 1$, 并且选定 $\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)}$ 为真, 这相当于 $\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)}$ 涉及的量测已被确认使用, $\hat{\mathbf{x}}_L^{(j)}$ 应被删去。初级假设点合并可按照如下步骤执行。

(1) 对矩阵 \mathbf{C}_{comp} 和 \mathbf{D}_{dist} 做元素乘积, 即 $\mathbf{C}_{\text{comp}} \odot \mathbf{D}_{\text{dist}}$;

(2) 找出元素乘积矩阵中具有最大维数的全1子阵;

此外还可以根据目标速度的先验信息, 设定速度上下限 v_{min} 与 v_{max} , 添加速度的判决条件:

$$v_{\text{min}} < \sqrt{(\hat{\mathbf{x}}_L^{(i)})^2 + (\hat{\mathbf{y}}_L^{(i)})^2} < v_{\text{max}} \quad (8)$$

不符合式(7)、式(8)的初级假设点可分为两类, 其一为关联假设错误导致, 应当被删去; 其二为虽关联假设正确, 但位置、速度误差较大(超出阈值)导致, 为避免影响后续融合精度, 亦当被删去。设剩下的点数为 M_s 。

步骤3 初级假设点合并

当一个目标被超过两个收发对检测到时, 那么会产生多个初级假设点, 并在目标位置附近聚集。此步骤的核心在于整理空间中相近的初级假设点, 对符合条件的进行合并, 并转换为候选目标。借鉴已有算法[22]的思路, 定义相容矩阵 \mathbf{C}_{comp} 和距离矩阵 \mathbf{D}_{dist} 来具体描述初级假设点之间的相容关系和状态接近与否。由于筛选后剩余 M_s 个初级假设点, 那么矩阵 \mathbf{C}_{comp} 与 \mathbf{D}_{dist} 的均为 $M_s \times M_s$ 的方阵。具体地, 相容矩阵 \mathbf{C}_{comp} 的第 i 行第 j 列的元素定义为

$$[\mathbf{C}_{\text{comp}}]_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{初等假设点}i\text{和}j\text{不相容} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中, 两个初级假设点不相容是指包含以下两种情况的任意一种: (1)两个点有着相同的收发对组合方式; (2)两个点含一个相同收发对但量测不相同。

距离矩阵 \mathbf{D}_{dist} 定义为

(3) 利用全1子阵中初级假设点关联到的量测值重新估计位置和速度, 从而实现初级假设点合并;

(4) 在点占用矩阵 $\mathbf{O}_{\text{p,occu}}$ 中找出全1子阵对应的行, 记录下元素为1的列的索引 \mathbf{d}_{del} ;

(5) 删除索引为 \mathbf{d}_{del} 的初级假设点, 删除元素乘积矩阵以及点占用矩阵 $\mathbf{O}_{\text{p,occu}}$ 中索引为 \mathbf{d}_{del} 的行和列;

(6) 对剩余的元素乘积矩阵重复步骤(2)到步骤(5), 直至找不到维数大于等于2的全1子阵。

经上述操作后, 在空间中聚集的初级假设点被合并, 转换为候选目标。候选目标至少由来自3个不同收发对的量测构成, 具备冗余信息来进行关联假设判定, 对于通过判定的候选目标即可作为航迹起点。剩余未合并的初级假设点不会被直接丢弃, 假定其数量为 M_f , 输入进后续步骤。

步骤4 初级假设航迹构造

没有完成合并的初级假设点意味着其在空间中散布, 但并不一定是由虚警和错误关联造成的, 因

为检测概率低、共同覆盖信号少、探测性能时变等原因, 目标极有可能仅被两个收发对同时检测到。本文将通过构造初级假设航迹的方式, 联合多场探测结果, 实现对这一类目标的航迹起始。

假定 k 时刻已经存在 $M_t(k)$ 个初级假设航迹 $\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k), (i=1, 2, \dots, M_t(k))$, 航迹占用矩阵记为 $\mathbf{O}_{t,occu}(k)$, 矩阵的定义与点占用矩阵类似, 矩阵 i 行 j 列取 1 表示对应的两个初级假设航迹存在关联到同一个量测的情况, 也即是两个初级假设航迹之间存在矛盾, 不能同时为真。

$$[\mathbf{O}_{t,occu}]_{i,j} = \begin{cases} 1, & \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)} \text{ 和 } \hat{\mathbf{X}}_L^{(j)} \text{ 关联到了同一个量测} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

那么在 $k+1$ 时刻遍历 M_t 个初级假设点分配给 $M_t(k)$ 个初级假设航迹的所有情况, 同时也考虑以初级假设点为航迹头建立新的初级假设航迹的情况, 于是初级假设航迹数量变为 $M_t(k+1) = [M_t(k) + 1] M_t$ 个, 航迹占用矩阵更新为

$$\mathbf{O}_{t,occu}(k+1) = \mathbf{J}_{M_t(k)+1} \otimes \mathbf{O}_{p,occu} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{t,occu}(k) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{J}_{M_t+1} \quad (13)$$

\mathbf{J}_n 表示 $n \times n$ 的全 1 矩阵, 式(13)第 1 项与第 2 项分别是由初级假设点和由初级假设航迹导致的更新后航迹对量测的占用。用 $\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)$ 和 $\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1), (i=1, 2, \dots, M_t(k+1))$ 表示更新后第 i 个初级假设航迹在 k 和 $k+1$ 时刻对应的初级假设点, 通过计算马氏距离实现对假设航迹的剪枝

$$\tilde{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) = \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) - \mathbf{F} \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k) \quad (14)$$

$$d^{(i)}(k+1) = \tilde{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1)^T \left\{ \text{cov} \left[\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) \right] + \mathbf{F} \text{cov} \left[\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k) \right] \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \right\}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) \quad (15)$$

$$d^{(i)} \begin{matrix} \text{保留} \\ \leq \eta \\ \text{删除} \end{matrix} \quad (16)$$

令经剪枝后剩余的初级假设航迹数目为 M_p , 同时删去航迹占用矩阵 $\mathbf{O}_{t,occu}(k+1)$ 中对应的行和列, 并计算其 $k+1$ 时刻的负对数似然比来表征关联代价, 记为 $\text{LR}^{(i)}(k+1)$ 。似然比是指如下两种假设下的似然函数之比:

H_1 : 初级假设点与初级假设航迹为正确关联;

H_0 : 初级假设点为虚警(非正确关联下亦等同于虚警)。

$$\text{LR}^{(i)}(k+1) = -\ln \frac{p \left[\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) \mid \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k), H_1 \right]}{p \left[\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) \mid H_0 \right]} \quad (17)$$

假设 $\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1)$ 是由 $k+1$ 时刻收发对 p 中的第 m 个量测 $z_p^m(k+1)$ 以及收发对 q 中的第 n 个量测 $z_q^n(k+1)$ 构成的, 那么分子可以写为

$$\begin{aligned} & p \left[\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) \mid \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k), H_1 \right] \\ &= p \left[z_p^m(k+1), z_q^n(k+1) \mid \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k), H_1 \right] \\ &= p \left[z_p^m(k+1) \mid \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k), H_1 \right] \\ & \quad \cdot p \left[z_q^n(k+1) \mid \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k), H_1 \right] \\ &= P_d^2 \frac{1}{\sqrt{\det(2\pi\mathbf{S}_p^{(i)}) \cdot \det(2\pi\mathbf{S}_q^{(i)})}} \\ & \quad \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[z_p^m(k+1) - \mathbf{h}_p(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right]^T (\mathbf{S}_p^{(i)})^{-1} \right. \\ & \quad \cdot \left. \left[z_p^m(k+1) - \mathbf{h}_p(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right] \right\} \\ & \quad \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[z_q^n(k+1) - \mathbf{h}_q(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right]^T (\mathbf{S}_q^{(i)})^{-1} \right. \\ & \quad \cdot \left. \left[z_q^n(k+1) - \mathbf{h}_q(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right] \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, P_d 为检测概率, $\mathbf{h}_p(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k))$ 是收发对 p 的量测预测值, $\mathbf{S}_p^{(i)}$ 是第 i 个初级假设航迹在收发对 p 下的新息协方差矩阵, 它是收发站位置和 $\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)$ 的函数。对于分母, 设虚警数服从泊松分布, 均值为 N_{fa} , 另设虚警在观测域中服从均匀分布, 观测域容积记为 $|\text{FoV}|$, 那么分母可以写为

$$\begin{aligned} p \left[\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k+1) \mid H_0 \right] &= p \left[z_p^m(k+1) \mid H_0 \right] \\ & \quad \cdot p \left[z_q^n(k+1) \mid H_0 \right] \\ &= \left(\frac{N_{fa}}{|\text{FoV}|} \right)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

根据式(17)、式(18)、式(19)可得

$$\begin{aligned} & \text{LR}^{(i)}(k+1) \\ &= \frac{1}{2} \left[z_p^m(k+1) - \mathbf{h}_p(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right]^T \\ & \quad \cdot (\mathbf{S}_p^{(i)})^{-1} \left[z_p^m(k+1) - \mathbf{h}_p(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right] \\ & \quad + \frac{1}{2} \left[z_q^n(k+1) - \mathbf{h}_q(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right]^T \\ & \quad \cdot (\mathbf{S}_q^{(i)})^{-1} \left[z_q^n(k+1) - \mathbf{h}_q(\hat{\mathbf{X}}_L^{(i)}(k)) \right] \\ & \quad + \ln \frac{N_{fa}^2 \sqrt{\det(2\pi\mathbf{S}_p^{(i)}) \cdot \det(2\pi\mathbf{S}_q^{(i)})}}{P_d^2 |\text{FoV}|^2} \end{aligned} \quad (20)$$

步骤5 初级假设航迹确认

初级假设航迹每一场只与一个初级假设点关联, 换言之, 初级假设航迹每一场只被两个收发对检测到, 所以单场数据不具备冗余信息, 需要充分利用时间序列信息。于是此步中, 只对达到特定长度 N_{conf} 的初级假设航迹作确认判别。

假设剪枝后的 M_p 个航迹中一共有 M_c 个达到 N_{conf} 长度, 将这些备选航迹在 $\mathbf{O}_{t,\text{occu}}(k+1)$ 矩阵中对应的行列取出, 形成航迹占用子矩阵 $\mathbf{O}_{\text{sub,occu}}(k+1)$, 矩阵大小为 $M_c \times M_c$ 。定义航迹得分向量 $\boldsymbol{\lambda}$, 大小为 $M_c \times 1$, 向量元素对应每个备选航迹的得分, $\boldsymbol{\rho}$ 为二进制分配向量, 大小为 $M_c \times 1$, $\mathbf{1}_{M_c}$ 为全1列向量, 大小为 $M_c \times 1$ 。具体地

$$[\boldsymbol{\lambda}]_i = \sum_{j=k-N_{\text{conf}}+2}^{k+1} \text{LR}^{(i)}(j) \quad (21)$$

$$[\boldsymbol{\rho}]_i = \begin{cases} 1, & \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)} \text{ 被确认为真实航迹} \\ 0, & \hat{\mathbf{X}}_L^{(i)} \text{ 被判定为虚假航迹} \end{cases} \quad (22)$$

于是初级假设航迹确认可以转换为0-1型整数线性规划问题:

$$\begin{aligned} & \min_{\boldsymbol{\rho}} \{ \boldsymbol{\rho}^T \boldsymbol{\lambda} \} \\ & \text{s.t. } \mathbf{O}_{\text{sub,occu}}(k+1) \boldsymbol{\rho} \leq \mathbf{1}_{M_c} \end{aligned} \quad (23)$$

解出 $\boldsymbol{\rho}$ 后即完成备选航迹的确认。最后删除相应的初级假设航迹与 $\mathbf{O}_{t,\text{occu}}(k+1)$ 中对应的行列即可。

为了更加直观地展示所提算法, 考虑3发1收FM广播外辐射源雷达网目标探测场景, 共设置3个目标如图3(a)所示, 虚警个数设置为30。其中目标1在第1场就被3个收发对同时检测到, 而目标2和目标3在每一场均只被两个收发对检测到。图3(b)展示了算法步骤1执行后构造出的初级假设点, 经步骤2的角度与速度筛选后, 得到图3(c)所示的结果, 可以看到其点数已大为缩减。由于目标1被3个收发对同时检测到, 经步骤3的合并后可以形成图3(d)中的航迹头。对于目标2和目标3, 其在第 N_{conf} 场形成了3条初级假设航迹如图3(e), 其中航迹1(得分8.2)和航迹3(得分7.7)分别对应真实目标3和目标2, 航迹2(得分8.0)是因为量测错误关联得到的虚假航迹。图中给出的航迹占用子矩阵表明: 航迹1和航迹2之间存在量测共用情况, 不可能同时为正确关联, 航迹2和航迹3同理, 为使航迹总得分最大, 应当选取航迹1和航迹3为真, 最终总得分为15.9。

4 仿真与实测数据验证

4.1 仿真实验

仿真场景设置为3发1收FM广播外辐射源雷达网, 根据对实测数据的误差统计情况, 将双基距离、双

基速度以及方位角的量测噪声标准差设置为1000 m, 1 m/s以及10°。考虑探测的目标为民航客机, 机动性不强, 所以过程噪声功率谱密度取 $q_x = q_y = 1 \text{ m}^2/\text{s}^3$, 速度上下限分别为340 m/s和20 m/s。综合考虑方位角量测噪声大小和初级假设点的定位误差水平后取方位角判决门限为20°, N_{conf} 设置为3。每个收发对每场的虚警个数按照均值为100的泊松分布生成, 虚警在观测域中均匀分布。仿真数据时长为200场, 场次时间间隔为2 s。对比算法选用文献[22]和文献[18]中的算法, 后文中用对比算法1、算法2表示。由于对比算法2的航迹起始门限取决于目标个数, 所以在仿真过程中, 将目标真实数目设置为对比算法2的先验信息。此外, 仿真还给出的一组参考值, 参考值是在量测-目标关联关系已知的情况下, 直接进行数据融合得到的结果, 其可视作对应仿真场景中航迹起始速度的性能上限。

共设置两种仿真场景来验证所提算法在计算速度、航迹起始速度上的提升。具体的性能衡量指标选用最优子模式分配(Optimal SubPattern Assignment, OSPA)距离[27]。OSPA距离用于衡量多目标跟踪性能的好处在于其不仅可以计算对目标的跟踪精度, 还对跟踪算法导致的航迹漏起始、错误起始实施惩罚, 其数值越小, 表明跟踪结果和真值越接近, 阶数选取为2, 截断距离2000 m。

在仿真场景1中, 所有的收发对检测概率均设置为0.7, 用于模拟信号稳定、探测性能较好的情况。观测域中共设置6个目标, 目标的信息由表1给出。

通过50次蒙特卡罗仿真, 将场景1的平均OSPA距离随时间变化绘制如图4(b)所示, 图4(a)则展示了某次仿真中的目标真实航迹。可以看出在探测性能较好的情况下, 所提算法和对比算法1的性能均十分出色, 所提算法的OSPA距离略优于对比算法1, 其收敛速度更快, 且十分接近参考值。在后续的场次中, 出现了所提算法甚至优于参考值的情况, 其原因在于: 参考算法将所有目标量测均用于航迹更新, 所提算法则是执行航迹-量测关联后再进行的航迹更新, 相当于对量测做了一定程度上的筛选, 增加了运动模型信息在航迹更新过程中的权重。在此仿真场景中, 目标机动性不强, 量测误差较大, 所以所提算法会稍优于参考值。对比算法2的性能表现则明显不如其余算法, 原因在于其航迹起始概率较高。

图5展示了所提算法和对比算法1估计出的平均航迹数量, 由于假定对比算法2已知目标真实个数, 所以此处不作对比。从图中可以看出所提算法在第10场左右时, 估计的航迹数量即与真实值一致, 而对比算法1直到50场左右才能准确估计航迹数量,

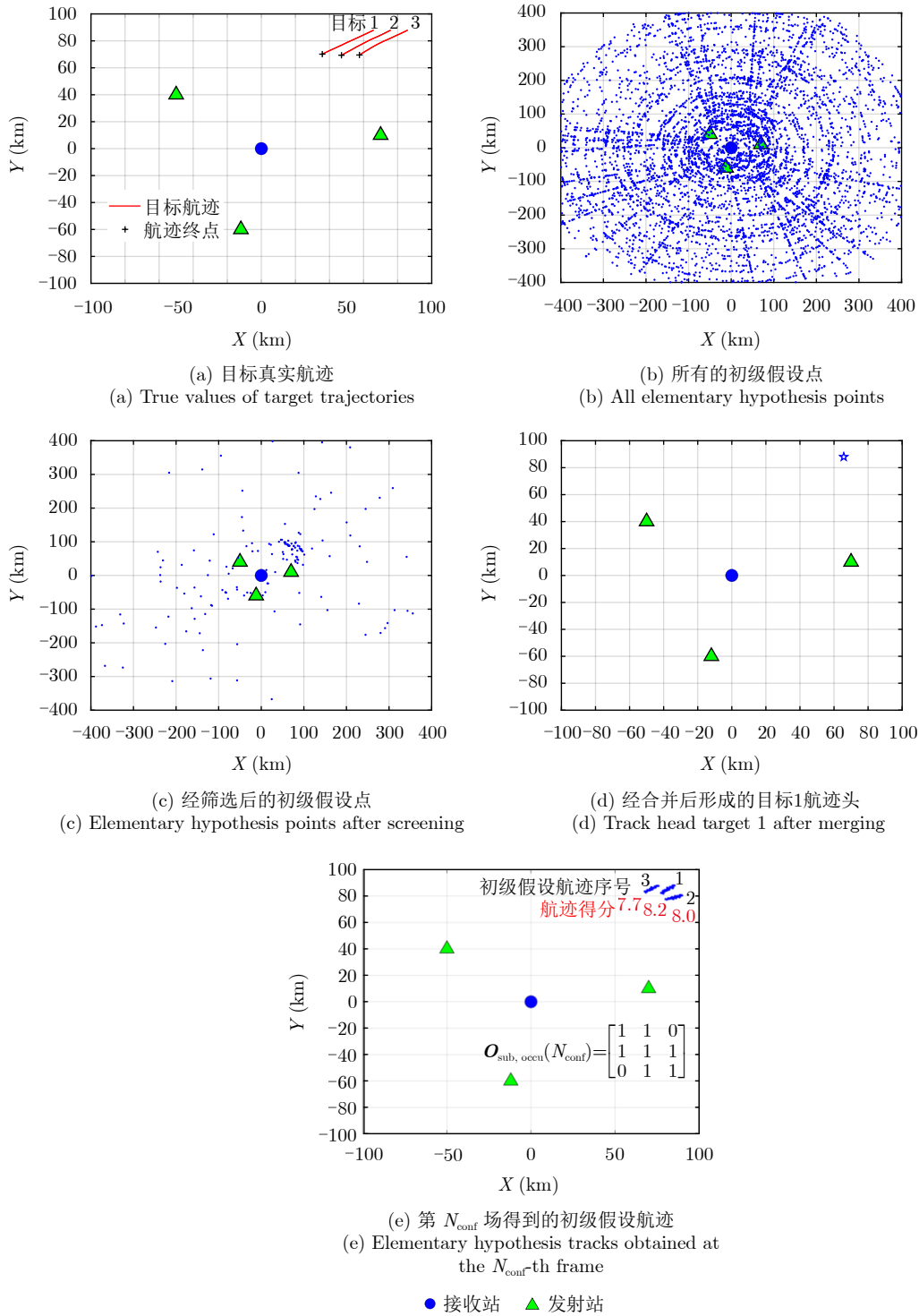


图3 所提算法执行过程中间结果

Fig. 3 Intermediate results of the proposed algorithm execution process

表1 仿真目标信息

Tab. 1 Information of targets in simulation

目标	初始位置(km)	初始速度(m/s)	目标出现场序号	目标终止场序号
1	[150, 130]	[-150, -90]	1	200
2	[80, -100]	[20, -100]	1	200
3	[-150, 100]	[180, -60]	1	200
4	[70, -120]	[100, 100]	1	200
5	[55, 15]	[20, -200]	1	200
6	[-100, 30]	[80, 180]	1	200

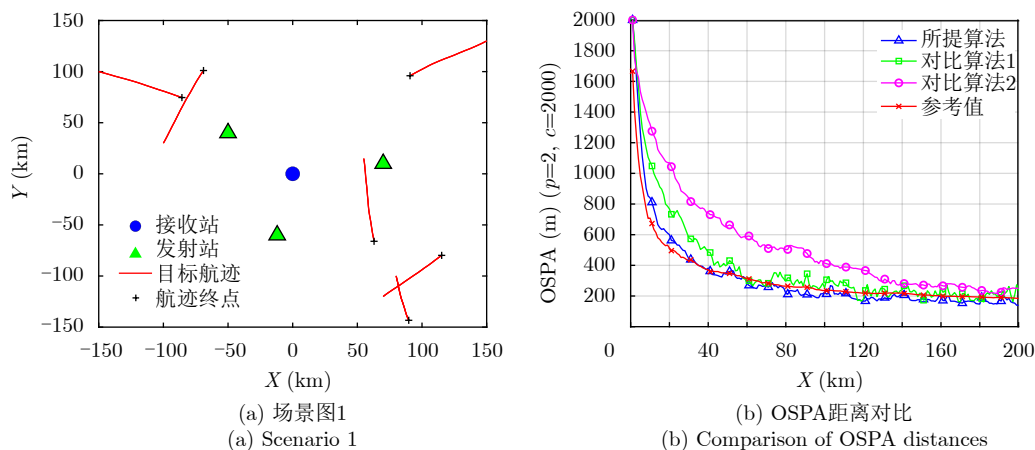


图4 场景1仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the scenario 1

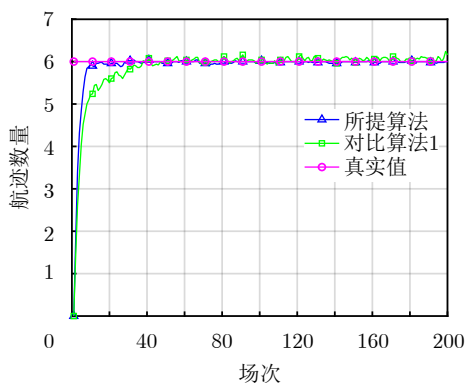


图5 场景1平均航迹数量对比

Fig. 5 Comparison of the average number of tracks obtained by different algorithms in scenario 1

这意味着所提算法能够更快完成航迹起始,同时也解释了为何图4(b)中所提算法的OSPA距离有更快的收敛速度。

此外,所提算法在计算速度方面同样有所提升。由于航迹起始算法的耗时主要取决于所构造的关联假设个数,所以此处对比不同算法关联假设个数的表达式。假设雷达网为 N 发1收,每个收发对的量测个数均为 M ,那么所提算法和对比算法2均是构造 $2C_N^2 M^2 = N^2 M^2 - N M^2$ 个关联假设,对比算法1则是构造 $C_N^3 M^3 = M^3 (N^3 - 3N^2 + 2N) / 6$ 个关联假设,时间复杂度分别为 $O(N^2 M^2)$ 和 $O(N^3 M^3)$ 。可见所提算法和对比算法2有着相近的计算速度,对比算法1的计算速度最慢。在“配置为CPU: Intel Core i5-9600KF,内存: 16 GB,运行平台为Matlab R2020a”的条件下,所提算法完成一轮仿真平均耗时为91.7 s,对比算法1为2559.4 s,对比算法2为106.4 s,这印证了上述理论分析。可见所提算法耗时最短,更加适用于虚警、收发对多的情况。

在仿真场景2中,我们将参数设置得更加贴合实际情况。为了模拟FM广播外辐射源雷达探测性能受所播内容影响,将3个收发对的检测概率设置为每隔50场发生一次改变,具体参数由表2给出。同时将场景1中的6个目标初始点位设置为目标出生点位,每间隔40场会有1个新目标在出生点附近生成,新目标的初始速度和表1中保持一致,借此模拟真实场景中的飞机飞行航线,并进行100次蒙特卡罗仿真。图6(a)展示了某次仿真中的跟踪场景图,目标均是由图中的6个出生点位附近出发,共出发30架次目标。

图6(b)绘制了平均OSPA距离随时间变化曲线,可见由于存在新目标的生成,OSPA距离呈现锯齿状。在目标生成的场次,4种算法的OSPA距离均会出现跳变,而所提算法会更快地收敛到较低的水平,在此场景下其性能表现仅次于参考值。图7展示了所提算法和对比算法1估计出的航迹个数对比,航迹个数曲线整体均呈现阶梯状,两种算法均能正确反映目标个数的增长趋势。但是所提算法能够更快地对新生目标完成航迹起始,估计的航迹个数更加准确。

通过上述仿真结果,论证了所提算法在检测性能良好的场景下,有着更快的航迹起始速度,更优

表2 各收发对不同时刻的检测概率

Tab. 2 Detection probability of radar stations at different times

收发对序号	场次			
	1~50	51~100	101~150	151~200
收发对1	0.7	0.7	0.5	0.5
收发对2	0.5	0.8	0.7	0.8
收发对3	0.8	0.5	0.8	0.7

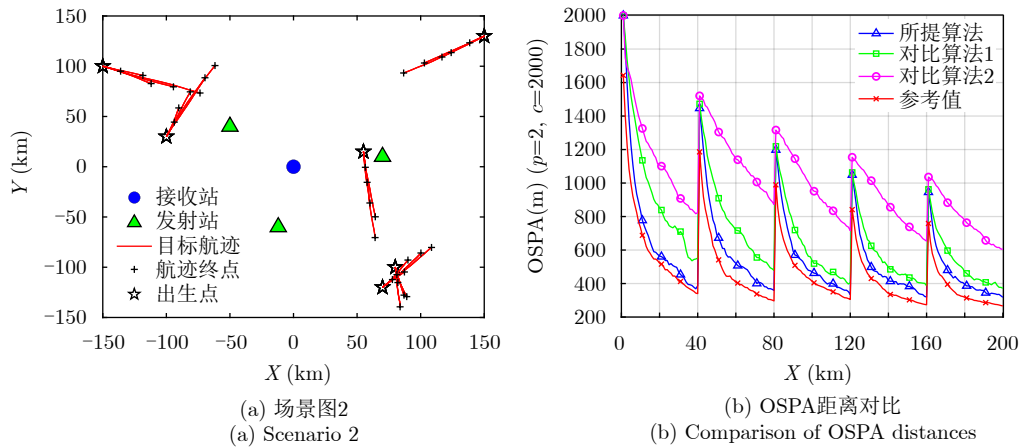


图6 场景2仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the scenario 2

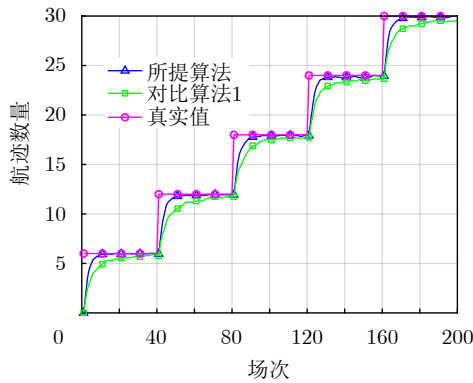


图7 场景2平均航迹数量对比

Fig. 7 Comparison of the average number of tracks obtained by different algorithms in scenario 2

的目标跟踪结果,更低的时间复杂度;在检测性能时变且检测概率较低的场景下,所提算法仍能保证

准确且快速地估计航迹个数,更加适用于FM广播外辐射源雷达网。

4.2 实测数据处理结果

本文通过外场实验结果来验证所提算法有效性,并给出对比结果。外场实验数据由武汉大学于2022年9月在武汉市周边采集,数据长度为10 min。实验场景如图8所示,可以看出,图中的4个发射站与1个接收站构成4发1收FM广播外辐射源雷达网。4个发射站依次为武汉龟山电视塔、武汉八分山、赤壁宝塔山、汉川发射塔,对应的信号频率为103.8 MHz, 94.8 MHz, 102.7 MHz, 107.2 MHz,接收站为一个七元均匀圆阵。

该实验中,通过广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)设备获取探测空域中飞行目标的实时经纬度,并以此作为

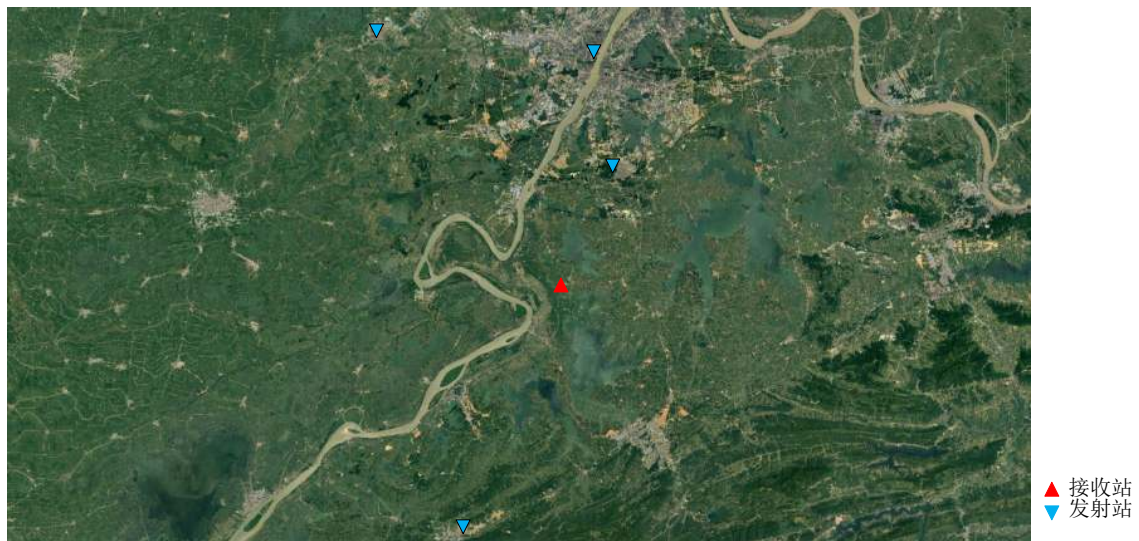
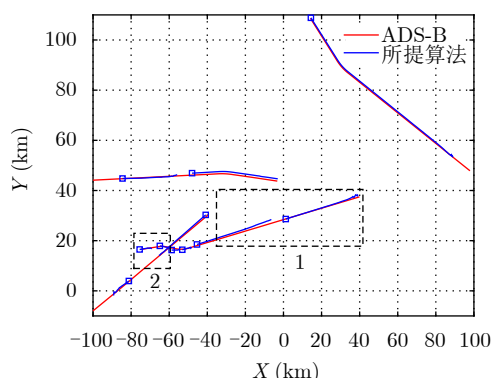


图8 外场实验站位分布

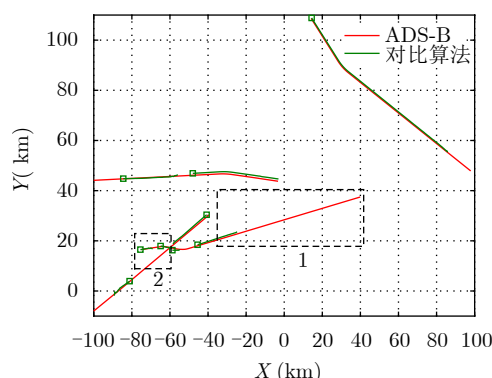
Fig. 8 Deployment of radar network stations for field experiment

目标真值来衡量雷达网目标跟踪效果。图9展示了所提算法与对比算法1的跟踪结果，共选取4条典型

航迹。由于对比算法2需要依靠目标个数这一先验信息来确定航迹起始门限，所以此处不作对比。



(a) 所提算法跟踪结果
(a) Tracking results of the proposed algorithm



(b) 对比算法1跟踪结果
(b) Tracking results of the comparison algorithm 1

图9 实测数据跟踪结果

Fig. 9 Tracking results of experimental data

对于东北方的目标，各站检测概率较高，两种算法均能形成连续的航迹。对于图中起点在(50, 40) km附近的目標(图9中虚线框1)，本文所提算法能更早完成航迹起始，而对比算法在后半段才能形成断断续续的短航迹，其原因在于飞行过程的前半段仅有赤壁发射站和汉川发射站能够以较高概率检测到该目标，难以达到对比算法的起始条件。对于图中起点在(-100, -10) km附近的目標(图9中虚线框2)，两种算法均出现航迹断裂的情况，但是所提算法能够更早地重新起始航迹。

5 结语

本文针对FM广播外辐射源雷达检测概率低、虚警率高、量测精度差的特性，提出一种基于多初级假设的航迹起始算法。相比起现有算法，所提算法进一步降低了关联假设所需的量测个数。通过仿真分析，所提算法在检测性能稳定且良好的场景下，能够实现更快的航迹起始，跟踪结果略优于现有算法，运算耗时大大缩减；在检测性能时变的场景下，所提算法的跟踪结果明显优于现有算法，对于目标个数的估计更加准确。一组外场实验的跟踪结果对比同样表明所提算法的航迹连续性更好，能够更早形成目标航迹。仿真与实测结果均论证了所提算法性能的优良，以及其在FM广播外辐射源雷达网中的实用性。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参考文献

- [1] 万显荣, 易建新, 占伟杰, 等. 基于多照射源的被动雷达研究进展与发展趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(6): 939-958. doi: 10.12000/JR20143.
WAN Xianrong, YI Jianxin, ZHAN Weijie, *et al.* Research progress and development trend of the multi-illuminator-based passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(6): 939-958. doi: 10.12000/JR20143.
- [2] 万显荣, 易建新, 程丰, 等. 单频网分布式外辐射源雷达技术[J]. 雷达学报, 2014, 3(6): 623-631. doi: 10.12000/JR14156.
WAN Xianrong, YI Jianxin, CHENG Feng, *et al.* Single frequency network based distributed passive radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(6): 623-631. doi: 10.12000/JR14156.
- [3] KUSCHEL H. Approaching 80 years of passive radar[C]. 2013 International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2013: 213-217. doi: 10.1109/RADAR.2013.6651987.
- [4] COLONE F, BONGIOANNI C, and LOMBARDO P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar. Part I: Target detection[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(4): 28-39. doi: 10.1109/MAES.2013.6506827.
- [5] POUILLIN D and FLECHEUX M. Recent progress in Passive Coherent Location (PCL) concepts and technique in France using DAB or FM broadcasters[C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1-5. doi: 10.1109/RADAR.2008.4721009.
- [6] SLAVOV A, SANDENBERGH S, O'HAGAN D, *et al.* Multiple FM-based passive bistatic pairs for robust target detection with improved position accuracy[C]. 2022 23rd

- International Radar Symposium (IRS), Gdansk, Poland, 2022: 332–337. doi: [10.23919/IRS54158.2022.9905050](https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9905050).
- [7] PLŠEK R, STEJSKAL V, PELANT M, *et al.* FM based passive coherent radar: From detections to tracks[C]. 2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, Capri, Italy, 2011: 123–127.
- [8] ZHANG Chenqi, WU Yong, WANG Jun, *et al.* FM-based multi-frequency passive radar system[C]. 2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Hong Kong, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/ICSPCC.2016.7753668](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2016.7753668).
- [9] TUYSUZ B, URBINA J V, and MATHEWS J D. Effects of the equatorial electrojet on FM-based passive radar systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 4082–4088. doi: [10.1109/TGRS.2017.2687830](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2687830).
- [10] FU Yan, WAN Xianrong, ZHANG Xun, *et al.* Side peak interference mitigation in FM-based passive radar via detection identification[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(2): 778–788. doi: [10.1109/TAES.2017.2665079](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2665079).
- [11] O'HAGAN D W, KUSCHEL H, UMMENHOFER M, *et al.* A multi-frequency hybrid passive radar concept for medium range air surveillance[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2012, 27(10): 6–15. doi: [10.1109/MAES.2012.6373907](https://doi.org/10.1109/MAES.2012.6373907).
- [12] ZAIMBASHI A, DERAKHTIAN M, and SHEIKHI A. Invariant target detection in multiband FM-based passive Bistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 720–736. doi: [10.1109/TAES.2013.120248](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120248).
- [13] BONGIOANNI C, COLONE F, and LOMBARDO P. Performance analysis of a multi-frequency FM based passive Bistatic Radar[C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720805](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720805).
- [14] BHARADWAJ L S, SWEETLIN P, and VISHNU O C. FM based passive radar tracking of targets under poor waveforms[C]. 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Bangalore, India, 2022: 1599–1603. doi: [10.1109/MAPCON56011.2022.10047271](https://doi.org/10.1109/MAPCON56011.2022.10047271).
- [15] 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: 108–125.
HE You, XIU Jianjuan, GUAN Xin, *et al.* Radar Data Processing with Applications[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 108–125.
- [16] HELMICK R E and WATSON G A. Interacting multiple model integrated probabilistic data association filters (IMM-IPDAF) for track formation on maneuvering targets in cluttered environments[C]. Proceedings of SPIE 2235, Signal and Data Processing of Small Targets 1994, Orlando, USA, 1994: 460–471. doi: [10.1117/12.179097](https://doi.org/10.1117/12.179097).
- [17] CHOI S, CROUSE D, WILLETT P, *et al.* Multistatic target tracking for passive radar in a DAB/DVB network: Initiation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(3): 2460–2469. doi: [10.1109/TAES.2015.130270](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.130270).
- [18] BAEK J, LEE J, SHIM H, *et al.* Target tracking initiation for multi-static multi-frequency PCL system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10558–10568. doi: [10.1109/TVT.2020.3012135](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3012135).
- [19] DAUN M, NICKEL U, and KOCH W. Tracking in multistatic passive radar systems using DAB/DVB-T illumination[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(6): 1365–1386. doi: [10.1016/j.sigpro.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.09.005).
- [20] YI Jianxin, WAN Xianrong, CHENG Feng, *et al.* Deghosting for target tracking in single frequency network based passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 2655–2668. doi: [10.1109/TAES.2015.130424](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.130424).
- [21] SHU Kan, YI Jianxin, WAN Xianrong, *et al.* A hybrid tracking algorithm for multistatic passive radar[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(2): 2024–2034. doi: [10.1109/JSYST.2020.2994009](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2994009).
- [22] YI Jianxin, WAN Xianrong, LEUNG H, *et al.* MIMO passive radar tracking under a single frequency network[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(8): 1661–1671. doi: [10.1109/JSTSP.2015.2464188](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2464188).
- [23] BOZDOĞAN A Ö and EFE M. Track initiation using multiple bistatic range and range rate measurements with multidimensional assignment algorithm[C]. 2010 IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference, Diyarbakir, Turkey, 2010: 435–438. doi: [10.1109/SIU.2010.5650348](https://doi.org/10.1109/SIU.2010.5650348).
- [24] LIU Zongxiang, ZHU Xiaoping, and HUANG Bingjian. Track initiation technique and its application in PHD filter[C]. 2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, China, 2018: 822–826. doi: [10.1109/ICSP.2018.8652496](https://doi.org/10.1109/ICSP.2018.8652496).
- [25] BAR-SHALOM Y, LI X R, and KIRUBARAJAN T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001: 267–295. doi: [10.1002/0471221279](https://doi.org/10.1002/0471221279).
- [26] MALANOWSKI M and KULPA K. Two methods for target localization in multistatic passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 572–580. doi: [10.1109/TAES.2012.6129656](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129656).
- [27] SCHUHMACHER D, VO B T, and VO B N. A consistent metric for performance evaluation of multi-object filters[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3447–3457. doi: [10.1109/TSP.2008.920469](https://doi.org/10.1109/TSP.2008.920469).

作者简介

胡越洋, 博士生, 研究方向为雷达数据处理中的目标跟踪和信息融合。

易建新, 博士, 副教授、博士生导师, 研究方向为外辐射源雷达信号处理、非线性信号处理。

万显荣, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向为新体制雷达设计, 如外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理。

程 丰, 博士, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、无线电海洋遥感和雷达软件工程。

徐苏霖, 博士生, 研究方向为FM广播外源雷达信号处理、稀疏雷达信号处理。

(责任编辑: 于青)