

## 复杂干扰杂波环境下三维目标检测前跟踪算法

薄钧天<sup>1</sup>, 张嘉毫<sup>1\*</sup>, 于洪波<sup>2</sup>, 张翔宇<sup>3</sup>, 罗峰谊<sup>1</sup>, 俞溪<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 王衡峰<sup>1</sup>, 孟进<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学电磁能技术全国重点实验室, 湖北武汉 430033; 2. 海军航空大学信息融合研究所, 山东烟台 264001;

3. 海军航空大学青岛校区航空电子工程与指挥系, 山东青岛 266041)

**摘要:**针对因随机假目标干扰、强杂波存在的复杂环境中三维目标检测问题,提出一种基于平行线坐标变换的多层次检测前跟踪算法。雷达量测点被先后置于规格化后的径向距离-时间平面、方位角-时间平面和俯仰角-时间平面分层次进行非相参积累和点迹筛选,每次筛选只对上一层的筛选结果进行处理,再根据先验信息进行航迹约束和航迹融合,得到最终检测结果。通过仿真对算法进行性能验证和分析,结果显示,该算法在不同信干杂比、量测误差和杂波密度下均能有效滤除虚假量测点,实现真实航迹的检测。

**关键词:**目标检测;干扰杂波;平行线坐标变换;检测前跟踪;雷达;非相参积累

**中图分类号:**TN957.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)05-026-11

论文  
拓展

## 3D target track before detect algorithm in complex environment with interference and clutter

BO Juntian<sup>1</sup>, ZHANG Jiahao<sup>1\*</sup>, YU Hongbo<sup>2</sup>, ZHANG Xiangyu<sup>3</sup>, LUO Fengyi<sup>1</sup>, YU Xi<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WANG Hengfeng<sup>1</sup>, MENG Jin<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China;

3. Department of Avionics Engineering and Command, Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of 3D target detection in complex environment with random false target interference and strong clutter, a multi-level track before detect algorithm based on the parallel-line-coordinate transformation was proposed. Radar measurement points were placed in the normalized radial range-time plane, azimuth-time plane and pitch angle-time plane successively, the non-coherent accumulation and points filtering were carried out in each level, and each level was processed only on the results of the previous level. Based on the prior information, track constraint and track fusion were carried out to obtain the final detection result. The performance of the algorithm was verified and analyzed through simulation. The results show that the proposed algorithm can effectively filter out false measurement points and achieve the detection of real tracks under different signal-to-interference clutter ratios, measurement errors, and clutter density.

**Keywords:** target detection; interference and clutter; parallel-line-coordinate transformation; track before detect; radar; non-coherent accumulation

作为在电磁空间中吞吐信息的“港口”,雷达的发展已历经近90年,这期间,无论是最初的英国“本土链”雷达,还是之后的脉冲多普勒雷达、相控阵雷达,或是现如今研究较为广泛的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)雷达<sup>[1]</sup>,每一代军民雷达都在各自领域中创造了一个又一个的奇迹,从更多维度定义了雷达的功能

与作用。

但雷达技术不断发展的同时,其所面临的挑战也越来越严重,这其中包括频谱资源的日益紧张、电磁环境的日益复杂、干扰及隐身技术的改进与革新等。传统的目标检测跟踪技术中,一般采用设置门限的方式首先提取高能量回波量测点,再关联多帧点迹<sup>[2]</sup>。然而在当前电磁环境下,随机假目标干扰、强杂波等产生的虚假目标量测点

收稿日期:2022-11-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFF1500100);国家杰出青年科学基金资助项目(52025072);中国科协青年人才托举工程资助项目(2021-JCJQ-QT-009);电磁能技术全国重点实验室基金资助项目(6142217210501,614221720200106)

第一作者:薄钧天(1996—),男,山西太原人,博士研究生,E-mail:bojuntian@163.com

\*通信作者:张嘉毫(1990—),男,湖南浏阳人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:jjhao.z@hotmail.com

引用格式:薄钧天,张嘉毫,于洪波,等.复杂干扰杂波环境下三维目标检测前跟踪算法[J].国防科技大学学报,2024,46(5):26-36.

Citation: BO J T, ZHANG J H, YU H B, et al. 3D target track before detect algorithm in complex environment with interference and clutter[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(5): 26-36.

表现出了高能量水平、非高斯和非平稳的特点<sup>[3]</sup>,从而使真实目标成为“弱目标”,造成雷达对目标检测跟踪的困难。检测前跟踪(track before detect, TBD)<sup>[4]</sup>技术利用真实目标航迹中量测点之间的关联性,通过多帧积累提高信干杂比(signal to interference clutter ratio, SICR),再设置门限提取目标航迹实现真实目标的检测跟踪。典型的 TBD 技术包括基于投影变换<sup>[5]</sup>、直方图概率多假设跟踪<sup>[6]</sup>、粒子滤波<sup>[7]</sup>和动态规划<sup>[8]</sup>等,这些方法各有优缺点。基于平行线坐标变换(parallel-line-coordinate transformation, PT)的 PT-TBD<sup>[9]</sup>技术是新发现的基于投影变换的 TBD 技术,在计算机直线检测<sup>[10]</sup>、车道线检测<sup>[11]</sup>、雷达二维航迹检测<sup>[9]</sup>领域中均有应用,且该方法性能优于基于 Hough 变换(Hough transformation, HT)的 HT-TBD 技术。

传统在三维坐标下基于投影变换的微弱目标检测<sup>[12]</sup>问题中,主要采用的仍是 HT-TBD 技术。其中:文献[13]采用三维 Hough 变换的方式直接进行检测,计算量极大;文献[14]利用 Hough 变换的局部丢失不敏感特性,采用随机选取量测点的方式减小计算量,但该方法对观测帧数有一定的要求;文献[15]结合 Hough 变换方法和逻辑法,在 2 个投影平面串行处理得出最后结果,但该方法选用的仍是目标  $x-z$  或  $y-z$  坐标进行 Hough 变换,易引入雷达量测时存在的量测误差;文献[16]提出了一种修正三级 Hough 变换方法,将点迹依次在径向距离-时间、方位角-时间和仰角-时间平面进行映射,取得了不错的效果。由于针对三维坐标的 PT-TBD 方法目前尚未见到报道,且 PT-TBD 技术性能优于 HT-TBD 技术,将平行线坐标变换引入三维坐标下的目标检测将是一个有益的尝试。

针对上述问题,本文将平行线坐标变换引入三维目标的 TBD 算法中,采用多层次降维的方式优化算法复杂度。理论推导和仿真实验验证了所提方法的目标检测性能和计算复杂度。

## 1 模型建立

假设雷达位于三维坐标原点,扫描周期为  $T$ ,共接受  $K$  帧数据。空域中存在  $M$  个目标,第  $m$  个目标的状态矢量<sup>[17]</sup>为:

$$\mathbf{X}_k^m = [r_k^m, \theta_k^m, \varphi_k^m, p_k^m]^T \quad (1)$$

式中, $r_k^m$ 、 $\theta_k^m$ 、 $\varphi_k^m$  和  $p_k^m$  分别代表  $k$  时刻第  $m$  个目标的径向距离、方位角、俯仰角和回波功率。雷达对目标的量测方程<sup>[17]</sup>可表示为:

$$\mathbf{Z}_k^m = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_k^m + \mathbf{V}_k^m \quad (2)$$

式中, $\mathbf{Z}_k^m = [\hat{r}_k^m, \hat{\theta}_k^m, \hat{\varphi}_k^m, \hat{p}_k^m]^T$  表示  $k$  时刻第  $m$  个目标的量测向量, $\hat{r}_k^m$ 、 $\hat{\theta}_k^m$ 、 $\hat{\varphi}_k^m$  和  $\hat{p}_k^m$  分别代表  $k$  时刻雷达对第  $m$  个目标的径向距离、方位角、俯仰角和回波功率的量测值, $\mathbf{H}$  为量测向量, $\mathbf{V}_k^m$  表示量测噪声。

三维空间中,除真实目标外,还存在杂波、干扰等,当总体 SICR 较低时,严重影响雷达对目标的探测。将除真实目标点外的其他点迹统称为虚假目标点,则  $k$  时刻第  $n$  个虚假目标的等效量测矢量为  $\mathbf{Z}_k^n = [\hat{r}_k^n, \hat{\theta}_k^n, \hat{\varphi}_k^n, \hat{p}_k^n]^T$ 。

则雷达对量测点回波功率的量测值为:

$$\hat{p}_k = \begin{cases} p_k + \gamma_k, & \text{真实目标量测点} \\ p_k' + \gamma_k, & \text{虚假目标量测点} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p_k'$  表示虚假目标回波功率; $\gamma_k$  为高斯白噪声,用于描述量测过程中出现的起伏特性; $p_k$  由雷达方程<sup>[18]</sup>得出。

$$p_k = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 r_k^4} \quad (4)$$

式中, $P_t$  为雷达发射功率, $G$  为天线的方向增益, $\sigma$  为雷达截面积(radar cross section, RCS), $\lambda$  为发射信号波长。假设总体 SICR 为  $\xi$ ,则虚假量测点的回波功率<sup>[19]</sup>为:

$$p_k' = \frac{\bar{p}_k}{10^{\xi/10}} + \gamma_k' \quad (5)$$

式中, $\bar{p}_k$  为全部真实目标量测点的平均功率, $\gamma_k'$  用于构造虚假量测点起伏特性。

## 2 算法原理

算法总体上分为 4 部分,分别是基于径向距离-时间平面、方位角-时间平面、俯仰角-时间平面的 3 层平行线坐标变换点迹筛选以及航迹约束与融合。由于理论类似,本文只详细介绍基于径向距离-时间平面的平行线坐标变换点迹筛选,而基于方位角-时间平面和俯仰角-时间平面的点迹筛选通过简单类比即可。

### 2.1 平行线坐标变换点迹筛选

平行线坐标变换是一种点到线变换,已被应用于计算机直线检测和二维雷达目标检测中。对于三维目标检测,在短时间内, $x-y-z$  坐标下目标运动轨迹可近似为直线,但考虑到三维坐标的平行线坐标变换计算量较大且量测误差的存在将使目标量测轨迹产生较大变化,而通常情况下,时间的量测误差可忽略不计,因此选用径向距离-时间坐标系、方位角-时间坐标系和俯仰角-时

间坐标系分 3 层采用平行线坐标变换的方法进行点迹筛选。

由于目标的时间数据与径向距离数据存在数量级的差距,为避免时间维度数据信息丢失,首先进行数据规格化处理,规格化系数为:

$$\zeta = 10^{\lg |r_{\max}/K|} \quad (6)$$

式中,  $r_{\max}$  表示所有量测点径向距离的最大值。对规格化后的数据进行平行线坐标变换,在  $r - \zeta \cdot k$  平面上建立垂直于  $r$  轴的 2 条到  $\zeta \cdot k$  轴距离均为  $d$  且分立于其两侧的平行直线,设为  $L_1$  和  $L_2$ 。为便于后续网格化处理,参数  $d$  的取值为:

$$d = 0.5 \cdot \{ \max[\max(\Phi_r), \max(\zeta \cdot \Phi_k)] - \min(-\Phi_r) \} \quad (7)$$

式中,  $\max(\cdot)$  表示取最大值,  $\min(\cdot)$  表示取最小值,  $\Phi_r$  表示所有量测点径向距离数据构成的集合,  $\Phi_k$  表示所有量测点时间数据构成的集合。则直线方程为:

$$\begin{cases} L_1: r = -d \\ L_2: r = d \end{cases} \quad (8)$$

再取直线  $L_3$  和  $L_4$ ,与直线  $L_1$  和  $L_2$  构建新平面,直线  $L_3$  和  $L_4$  的方程为:

$$\begin{cases} L_3: \zeta \cdot k = d \\ L_4: \zeta \cdot k = -d \end{cases} \quad (9)$$

对于  $r - \zeta \cdot k$  平面上坐标为  $(r_0, \zeta \cdot k_0)$  的点,构建其在平行线坐标系下的线段,即在规格化后的  $\zeta \cdot k$  轴上找到纵坐标为  $r_0$  的点  $(0, r_0)$ ,在直线  $L_1$  上找到纵坐标为  $-\zeta \cdot k_0$  的点  $(-d, -\zeta \cdot k_0)$ ,在直线  $L_2$  上找到纵坐标为  $\zeta \cdot k_0$  的点  $(d, \zeta \cdot k_0)$ ,分别连接点  $(0, r_0)$  和点  $(-d, -\zeta \cdot k_0)$  以及点  $(0, r_0)$  和点  $(d, \zeta \cdot k_0)$  形成两条线段  $l_{01}$  和  $l_{02}$ ,其所在直线的方程分别为:

$$\begin{cases} \zeta \cdot k = \frac{r_0 + \zeta \cdot k_0}{d} r + r_0 \\ \zeta \cdot k = \frac{r_0 - \zeta \cdot k_0}{d} r + r_0 \end{cases} \quad (10)$$

所有量测点按照上式完成点到线变换后,原属于同一条直线的量测点将会在新平面内交于一点,但考虑到目标机动和量测误差的存在,目标并非进行严格的直线运动,而更近似为分段折线运动。因此对新平面进行网格化处理,将其分为  $w \times w$  个网格,每个网格为边长为  $d/w$  的正方形。

网格化处理后,构建能量积累矩阵  $W_e$  和二值积累矩阵  $W_b$  进行基于能量和二值的双重非相参积累。这样做的目的是考虑到目标航迹间能量存在差异,防止强目标峰值淹没弱目标。

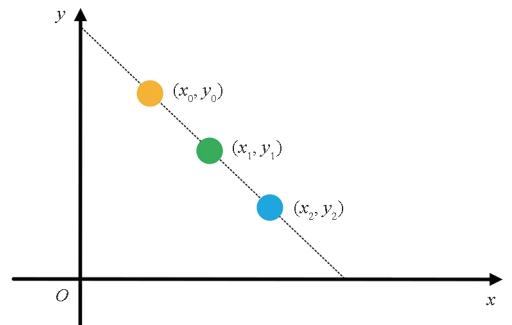
对于网格  $(\alpha', \beta')$ ,若量测点  $(r_0, \zeta \cdot k_0)$  所变

线段穿过其中且满足式(11)和式(12),则对能量积累矩阵和二值积累矩阵中对应于网格  $(\alpha', \beta')$  的元素按照时刻信息进行积累。

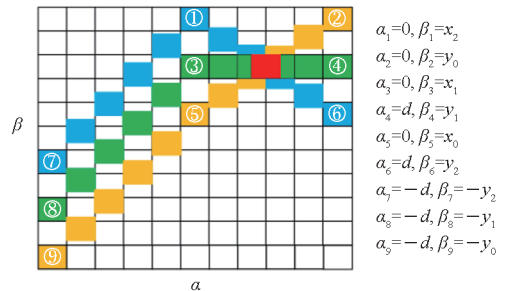
$$\begin{cases} \frac{\zeta \cdot k_0 + r_0}{d} \left( \alpha' \frac{2d}{w} - d \right) + r_0 > \frac{2d}{w} (\beta' - 1) - d \\ \frac{\zeta \cdot k_0 + r_0}{d} \left( \alpha' \frac{2d}{w} - d \right) + r_0 \leq \frac{2d}{w} \beta' - d \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{\zeta \cdot k_0 - r_0}{d} \left( \alpha' \frac{2d}{w} - d \right) + r_0 > \frac{2d}{w} (\beta' - 1) - d \\ \frac{\zeta \cdot k_0 - r_0}{d} \left( \alpha' \frac{2d}{w} - d \right) + r_0 \leq \frac{2d}{w} \beta' - d \end{cases} \quad (12)$$

经平行线坐标变换后进行积累的方式如图 1 所示,以 3 个点为例,首先将  $x - y$  二维平面上的点迹经平行线坐标变换映射到  $\alpha - \beta$  平面,网格化处理后,原属于同一条直线的点的积累值均会积累在  $\alpha - \beta$  平面上的一个或多个网格内。例如图 1(b) 中,分别代表量测点  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  的黄色方块、绿色方块以及蓝色方块形成交集,交集用红色方块表示,该红色方块跨越 4 个网格,因此,量测点  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  的积累值将会在红色方块所跨越的 4 个网格内积累。



(a)  $x - y$  平面  
(a)  $x - y$  plane



(b)  $\alpha - \beta$  平面  
(b)  $\alpha - \beta$  plane

- ①  $\alpha_1=0, \beta_1=x_2$
- ②  $\alpha_2=0, \beta_2=y_0$
- ③  $\alpha_3=0, \beta_3=x_1$
- ④  $\alpha_4=d, \beta_4=y_1$
- ⑤  $\alpha_5=0, \beta_5=x_0$
- ⑥  $\alpha_6=d, \beta_6=y_2$
- ⑦  $\alpha_7=-d, \beta_7=-y_2$
- ⑧  $\alpha_8=-d, \beta_8=-y_1$
- ⑨  $\alpha_9=-d, \beta_9=-y_0$

图 1 平行线坐标变换

Fig. 1 Parallel-line-coordinate transformation

积累采用合并积累的方式,即若网格内的所有量测点时刻均不同,则将积累值直接相加;若网格内存在时刻相同的量测点,则该网格只积累该时刻能量最大量测点的能量和二值。

$$b_k^{(\alpha',\beta')} = \begin{cases} 1, & m_k^{(\alpha',\beta')} > 0 \\ 0, & m_k^{(\alpha',\beta')} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$p_k^{(\alpha',\beta')} = \begin{cases} \max(p_k), & m_k^{(\alpha',\beta')} > 0 \\ 0, & m_k^{(\alpha',\beta')} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} W_b(\alpha',\beta') = W_b(\alpha',\beta') + b_k^{(\alpha',\beta')} \\ W_e(\alpha',\beta') = W_e(\alpha',\beta') + p_k^{(\alpha',\beta')} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $m_k$  代表穿过网格  $(\alpha',\beta')$  中  $k$  时刻量测点所变线段的个数, 网格  $b_k^{(\alpha',\beta')}$  代表  $k$  时刻网格  $(\alpha',\beta')$  需积累的二值,  $p_k^{(\alpha',\beta')}$  代表  $k$  时刻网格  $(\alpha',\beta')$  需积累的能量。

设置二值积累门限  $\eta_b$  和能量积累门限  $\eta_p$ , 提取积累值均超过各自门限的网格内航迹。

基于方位角 - 时间平面和俯仰角 - 时间平面的 2 层点迹筛选按照类似步骤进行。需要注意的是, 数据规格化并非刻意对时间信息进行, 方位角和俯仰角量测数据的数量级范围若小于时间量测, 则需对方位角和俯仰角数据进行规格化。

### 2.2 航迹约束与融合

在合并积累过程中, 由于部分虚假量测点的能量高于真实量测点, 且两个积累结果都会存在峰值簇拥现象, 因此在积累时, 真实航迹中可能会被错误地引入虚假量测点。

利用虚假航迹无法在多个坐标系内均能保持线性的特点, 将提取的所有航迹在三维  $x - y - z$  坐标下进行虚假航迹删除。航迹被保留的原则是满足速度约束条件和航向约束条件。

根据先验信息, 目标飞行的最大速度为  $v_{\max}$ , 最小速度为  $v_{\min}$ , 相邻两个帧间航迹的最大转向角为  $\phi_{\max}$ , 则任取相邻的  $k_1, k_2$  和  $k_3$  时刻 ( $k_1 < k_2 < k_3$ ), 对于第  $\tilde{m}$  个待检测航迹的量测点  $Z_{k_1}^{\tilde{m}}$ 、 $Z_{k_2}^{\tilde{m}}$  和  $Z_{k_3}^{\tilde{m}}$ , 若满足

$$\begin{cases} v_{\min} \leq \frac{\|Z_{k_{i+1}}^{\tilde{m}} - Z_{k_i}^{\tilde{m}}\|}{|k_{i+1} - k_i|} \leq v_{\max}, & i \in \{1, 2\} \\ \arccos \frac{(Z_{k_1}^{\tilde{m}} - Z_{k_2}^{\tilde{m}})^T \cdot (Z_{k_2}^{\tilde{m}} - Z_{k_3}^{\tilde{m}})}{|k_1 - k_2| \cdot |k_2 - k_3|} \leq \phi_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

则认为第  $\tilde{m}$  个待检测航迹不是虚假航迹。

完成航迹约束的结果中, 除由真实目标量测点构成的航迹外, 仍可能存在能够与真实目标量

测点构成的航迹中满足多坐标下航迹线性的虚假目标点, 表现为航迹冗余, 且真实航迹可能表现为多条部分量测点组成的短航迹, 因此需要进行航迹融合。

对于两条航迹, 若超过  $\eta_k$  个量测点重合, 则对这两条航迹进行融合处理, 其中  $\eta_k$  满足

$$\eta_k = \begin{cases} K/2, & K \text{ 为偶数} \\ (K-1)/2 + 1, & K \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (17)$$

融合时, 删除相同时刻能量较小的量测点, 保留能量较大的量测点, 再将两条航迹合并为一条航迹并按照时间顺序排列, 得到最终结果。

## 3 仿真实验与分析

### 3.1 场景仿真

设置一个三维  $x - y - z$  坐标系下的场景, 雷达位于坐标原点, 共检测  $K = 7$  帧数据, 扫描周期为  $T = 1$  s。雷达存在量测误差, 其中测距误差  $\Delta_r = 30$  m, 方位向测角误差  $\Delta_\theta = 0.2^\circ$ , 俯仰向测角误差  $\Delta_\varphi = 0.1^\circ$ 。三维空间内存在大量虚假量测点, 其数目服从每帧 100 个的 Poisson 分布, 总体 SICR 为 5 dB。共存在 2 个真实目标, 其运动参数如表 1 所示。

表 1 目标运动参数

Tab.1 Target motion parameters

目标	初始位置/m	运动速度/(m/s)
目标 1	(2 000, 4 000, 500)	(100, 110, 50)
目标 2	(3 000, 3 800, 480)	(130, -90, 15)

三维  $x - y - z$  坐标系下量测的点迹结果如图 2 所示。

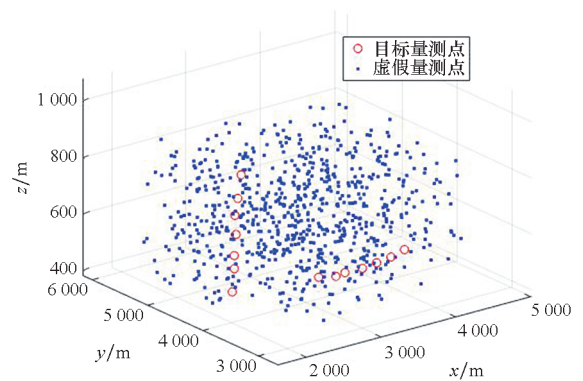


图 2 三维坐标雷达量测

Fig.2 Radar measurements of 3D coordinate

进行径向距离 - 时间平面的规格化处理, 求得规格化系数为  $\zeta = 965.6165$ , 将所有量测点置

于规格化后的径向距离 - 时间坐标平面下,结果如图 3 所示。

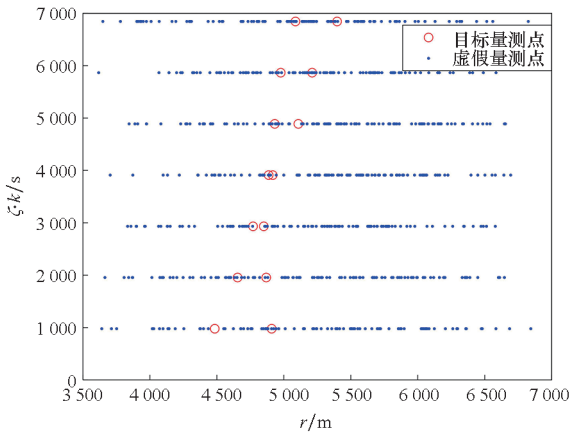


图 3 径向距离 - 时间坐标雷达量测

Fig. 3 Radial range-time coordinate radar measurements

构建 4 条直线  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  形成新平面,求得:

$$\begin{cases} L_1: r = -6\,760.3 \text{ m} \\ L_2: r = 6\,760.3 \text{ m} \\ L_3: \zeta \cdot k = 6\,760.3 \text{ s} \\ L_4: \zeta \cdot k = -6\,760.3 \text{ s} \end{cases} \quad (18)$$

对规格化后的径向距离 - 时间平面量测点进行平行线坐标变换,结果如图 4 所示。

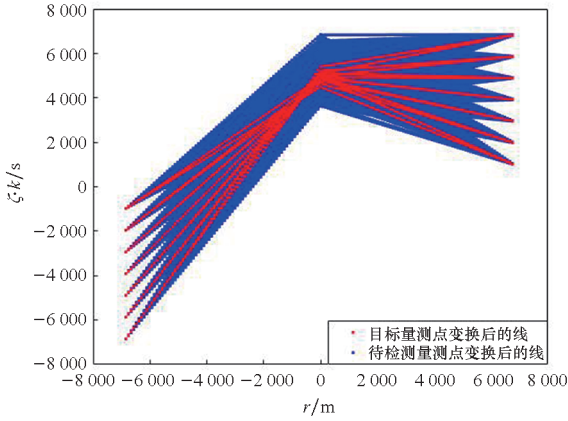


图 4 平行线坐标变换结果

Fig. 4 Result of parallel-line-coordinate transformation

网格化新平面,考虑到雷达测距误差为 30 m,将其平均分为  $150 \times 150$  个边长为 45.068 8 m 的正方形网格。设置能量积累矩阵  $W_e$  和二值积累矩阵  $W_b$ ,进行基于能量和二值的双重积累,结果分别如图 5 和图 6 所示。且为保证检测概率,设置较低的积累门限,能量积累门限设为  $0.6 \max(W_e)$ ,二值积累门限设为 3.6。

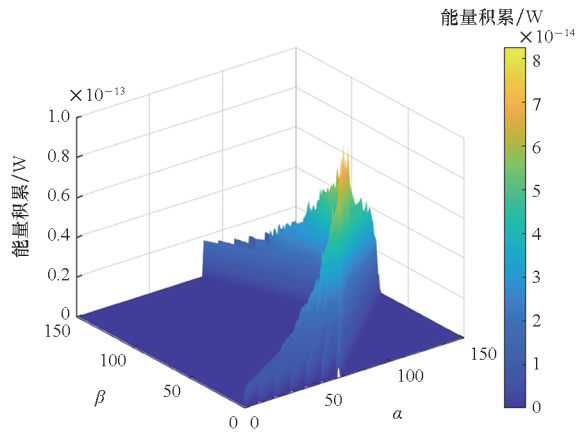


图 5 第一层能量积累

Fig. 5 Energy accumulation in layer 1

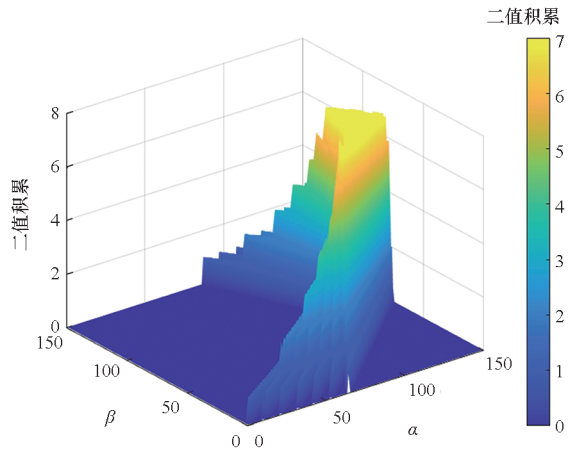


图 6 第一层二值积累

Fig. 6 Binary accumulation in layer 1

提取均超过门限的网格内航迹,在三维  $x - y - z$  坐标下的结果如图 7 所示。

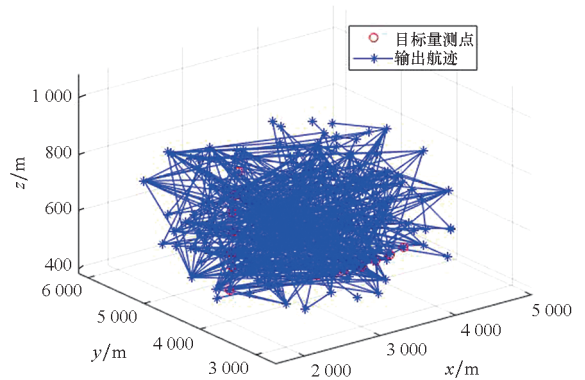


图 7 第一层检测结果

Fig. 7 Detection result of layer 1

可以看出,经过第一层的处理后,算法有效删除了部分虚假量测点,真实航迹也被保留,但仍存在大量虚假量测点所构成的虚假航迹未被删除。此时未被删除的所有航迹均满足在第一层规格化

后的径向距离 - 时间平面上为直线航迹这一特性。为进一步提取滤除虚假航迹,进行第二层和第三层的检测。

按照相同的思路,依次在规格化后的方位角 - 时间平面、俯仰角 - 时间平面进行点迹筛选,每次只对上一层处理结果进行处理。求得两个平面的规格化系数依次为 5.664 6 和 31.474 3,构成  $\zeta \cdot \theta - k$  平面和  $\zeta \cdot \varphi - k$  平面,则得到方位角 - 时间平面上的量测点迹(如图 8 所示)、能量积累(如图 9 所示)、二值积累(如图 10 所示)、检测出的航迹(如图 11 所示)和在俯仰角 - 时间平面上的量测点迹(如图 12 所示)、能量积累(如图 13 所示)、二值积累(如图 14 所示)、检测出的航迹(如图 15 所示)。

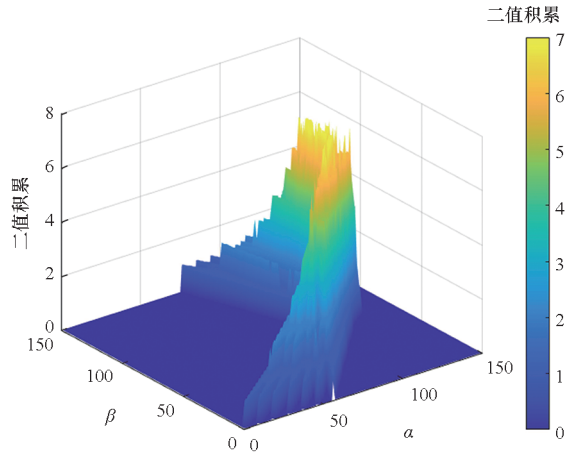


图 10 第二层二值积累

Fig. 10 Binary accumulation in layer 2

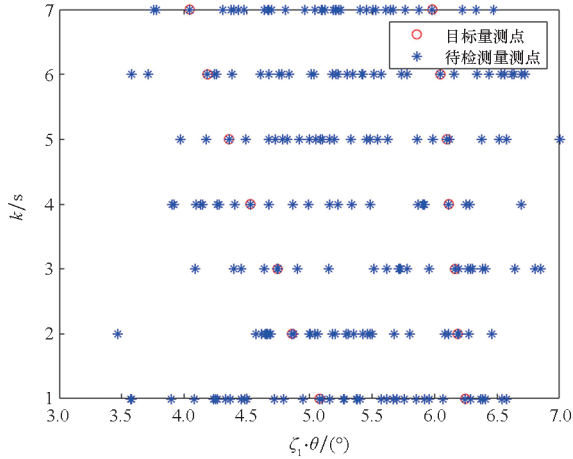


图 8 方位角 - 时间坐标雷达量测

Fig. 8 Azimuth angle-time coordinate radar measurements

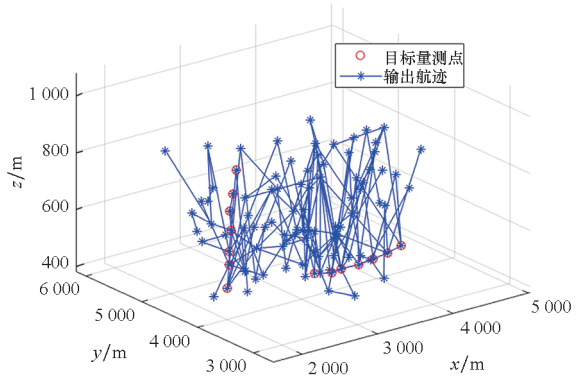


图 11 第二层检测结果

Fig. 11 Detection result of layer 2

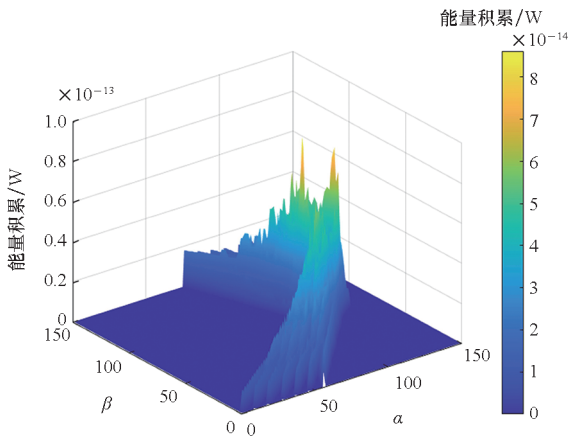


图 9 第二层能量积累

Fig. 9 Energy accumulation in layer 2

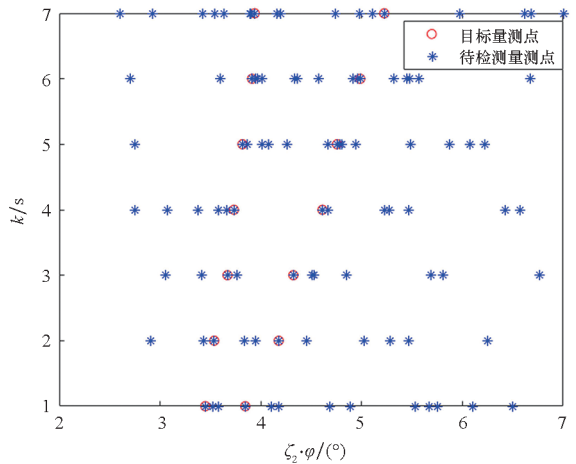


图 12 俯仰角 - 时间坐标雷达量测

Fig. 12 Pitch angle-time coordinate radar measurements

可以看出,随着算法的进行,虚假量测点所代表的航迹逐渐被剔除,而真实目标航迹一直被保留。但发现,检测结果中仍存在较多的虚假航迹,在三维  $x - y - z$  坐标下进行航迹约束,设目标飞

行最大速度为  $v_{\max} = 210 \text{ m/s}$ ,最小速度为  $v_{\min} = 90 \text{ m/s}$ ,帧间航迹的最大转向角为  $\phi_{\max} = 90^\circ$ ,得到的航迹约束结果如图 16 所示。

发现航迹约束后的检测结果仍有满足目标

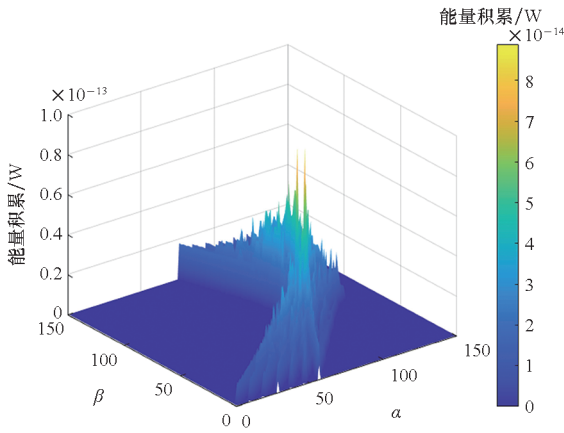


图 13 第三层能量积累

Fig. 13 Energy accumulation in layer 3

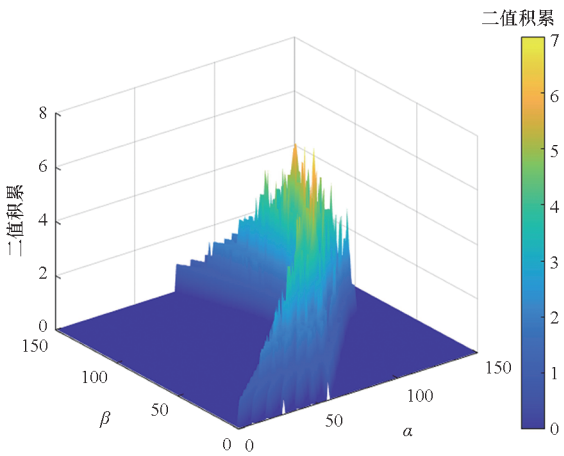


图 14 第三层二值积累

Fig. 14 Binary accumulation in layer 3

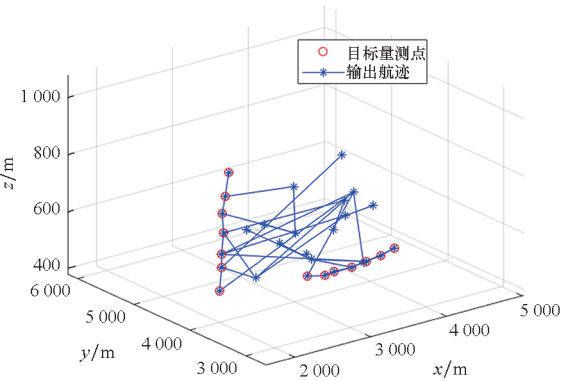


图 15 第三层检测结果

Fig. 15 Detection result of layer 3

飞行规律的虚假量测点存在,且真实目标量测点构成的航迹也存在冗余现象,再对得到的检测结果进行航迹融合处理,得到结果如图 17 所示,发现算法完整地检测出两条航迹,且不存在冗余现象。

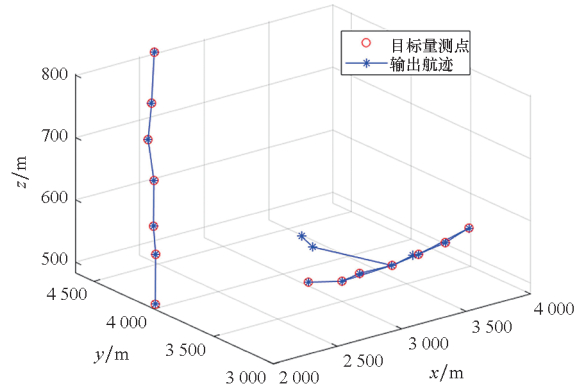


图 16 航迹约束结果

Fig. 16 Track constraint result

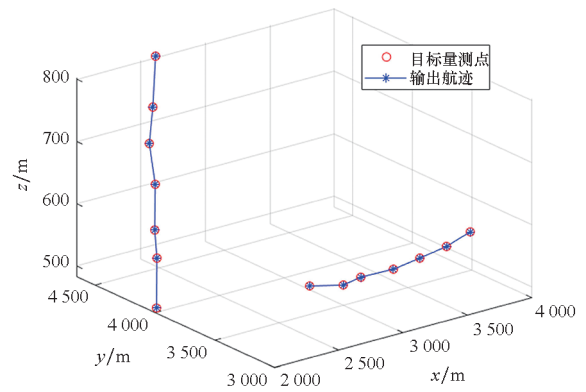


图 17 航迹融合结果

Fig. 17 Track fusion result

### 3.2 性能分析

#### 3.2.1 信干杂比对算法性能的影响

由于本文算法的本质是通过非相参积累提高目标航迹整体的积累值,从而在充满虚假量测点的环境中检测目标,因此与虚假量测点相比,真实目标量测点能量越高检测效果必然越好,通过 Monte-Carlo 仿真讨论总体信干杂比对算法性能的影响。

在本文仿真的 7 帧检测背景下,认为每条航迹中存在 4 帧的真实目标量测点被检测到即为该目标航迹被检测出,即用参数  $\delta_q^{m,k}$  表示第  $q$  次 Monte-Carlo 仿真中第  $m$  个目标在第  $k$  帧中的真实量测点是否被检测出。

$$\delta_q^{m,k} = \begin{cases} 1, & \text{检测到} \\ 0, & \text{未检测到} \end{cases} \quad (19)$$

再令参数  $\gamma_q^m$  表示第  $q$  次 Monte-Carlo 仿真中第  $m$  个目标是否被检测出。

$$\gamma_q^m = \begin{cases} 1, & \sum_{k=1}^7 \delta_q^{m,k} \geq 4 \\ 0, & \sum_{k=1}^7 \delta_q^{m,k} < 3 \end{cases} \quad (20)$$

则  $Q$  次 Monte-Carlo 仿真后第  $m$  个目标的检测概率为:

$$P_d^m = \frac{\sum_{q=1}^Q \gamma_q^m}{Q} \quad (21)$$

在  $Q = 300$  次 Monte-Carlo 仿真下观察 SICR 在  $0 \sim 10$  dB 范围内本文算法对 2 个目标以及将 2 个目标全部检测出的检测概率变化,计算依据式(19)~(21),结果如图 18 所示。

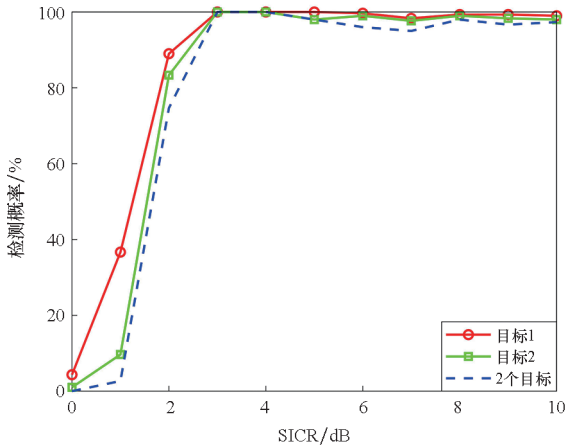


图 18 不同 SICR 下算法的检测概率

Fig. 18 Detection probability of the algorithm under different SICR

观察得:SICR 为 0 dB 时,算法对 2 个目标的检测概率均低于 10%;SICR 在  $0 \sim 3$  dB 范围内,检测概率随着目标回波强度的增加而增加;当 SICR 大于等于 3 dB 时,算法对 2 个目标的检测概率以及算法将 2 个目标检测出的概率均高于 90%。可以说明,本文算法的目标回波强度满足一定强度时具有较高的检测概率。

高检测概率意味着算法能够有效地发现真实目标,但并不确保检测结果能够不受干扰和杂波的影响,因为当检测的结果中仍包含较多虚假航迹时,仍会造成虚警从而影响对目标的判断。因此在不同总体 SICR 背景下观察算法虚假航迹率的变化以验证算法的性能。

在  $Q = 300$  次 Monte-Carlo 仿真下观察 SICR 在  $0 \sim 10$  dB 范围内算法的虚假航迹率  $P_v$  [19]。

$$P_v = \frac{\sum_{q=1}^Q v_q}{\sum_{q=1}^Q u_q} \quad (22)$$

式中,  $v_q$  为第  $q$  次 Monte-Carlo 仿真中产生的虚假航迹数,  $u_q$  为第  $q$  次 Monte-Carlo 仿真得到的总航迹数。仿真结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,虚假航迹率随 SICR 的增加

而减少,当 SICR 为 0 dB 和 1dB 时,虚假航迹率超过 0.9,证明检测结果基本为虚假航迹;当 SICR 由 2 dB 增长到 5 dB 时,虚假航迹率逐渐下降并趋近于 0;当 SICR 大于 5 dB 时,虚假航迹率为 0 ( $P_v$  结果保留 3 位小数),证明检测结果基本不存在虚假航迹,考虑到这个范围内算法对目标的检测概率高于 90%,证明算法在 SICR 大于 5 dB 时,能够清晰地检测出真实目标且不受干扰和杂波等影响,具有较好的性能。

表 2 不同 SICR 下的虚假航迹率

Tab. 2 False track rate under different SICR

SICR /dB	$P_v$	SICR /dB	$P_v$
0	0.969	6	0
1	0.914	7	0
2	0.705	8	0
3	0.439	9	0
4	0.152	10	0
5	0.002		

### 3.2.2 量测误差对算法性能的影响

量测误差的存在使雷达检测出的目标航迹发生形变,对于沿直线运动的目标航迹,将表现为分段折线。算法中的网格化处理有助于减轻量测误差对算法性能的影响,但帮助仍有限。量测误差对算法的影响程度需通过 Monte-Carlo 仿真进行观察。

在  $Q = 300$  次 Monte-Carlo 仿真下依次观察径向距离误差在  $0 \sim 500$  m、方位角误差在  $0^\circ \sim 5^\circ$  和俯仰角误差在  $0^\circ \sim 5^\circ$  时,本文算法对 2 个目标以及将 2 个目标全部检测出的检测概率变化,且当单个误差变量发生变化时,其余误差维持不变,则不同测距误差下的检测概率如图 19 所示。

随着测距误差的加大,算法对目标的检测概率存在下降趋势,但在 500 m 测距误差以内,算法对单个目标的检测概率保持在 90% 以上,对 2 个目标的全部检测概率能够高于 85%,因此本文算法在一定量测误差范围内能够保持较高检测概率。不同方位向测角误差下的检测概率如图 20 所示。

可以看出,方位向测角误差在  $0^\circ \sim 5^\circ$  范围内,本文算法对 2 个目标各自的检测概率以及将 2 个目标全部检测出来的概率均接近 100%,因此本文算法对一定方位向测角误差下的目标具备较



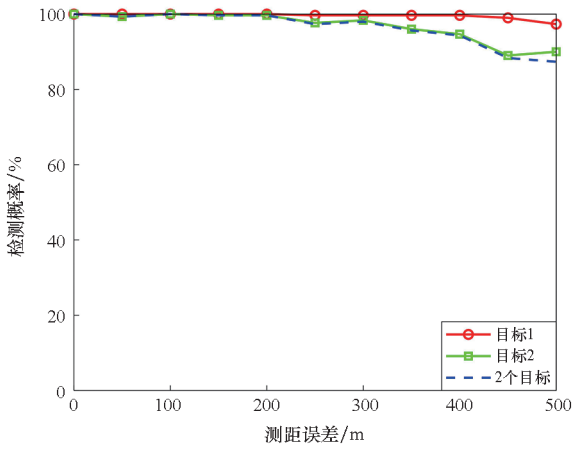


图 19 不同测距误差下算法的检测概率

Fig. 19 Detection probability of the algorithm under different range error

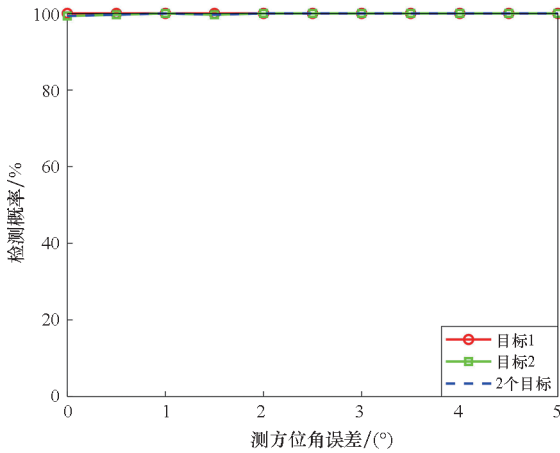


图 20 不同方位向测角误差下算法的检测概率

Fig. 20 Detection probability of the algorithm under different azimuth angle error

高检测概率。不同俯仰向测角误差下的检测概率如图 21 所示。

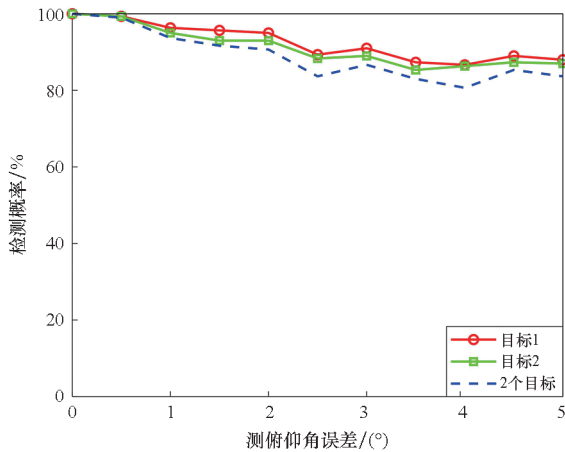


图 21 不同俯仰向测角误差下算法的检测概率

Fig. 21 Detection probability of the algorithm under different pitch angle error

在  $0^\circ \sim 5^\circ$  范围内,随着俯仰向测角误差的增大,本文算法对 2 个目标各自的检测概率均大于 85%,将 2 个目标全部检测出的概率大于 80%,证明本文算法在一定俯仰向测角误差下对目标具有较好的检测性能。

### 3.2.3 虚假量测点密度对算法性能的影响

虚假量测点的存在是干扰雷达检测目标的直接原因,其数目对算法的检测概率和处理时间均带来了严重挑战,在  $Q = 300$  次 Monte-Carlo 仿真下观察本文算法对目标的检测概率以及算法的运行时间,从而评估算法的性能,检测概率和运行时间随虚假量测点数目变化的曲线分别如图 22 和图 23 所示。

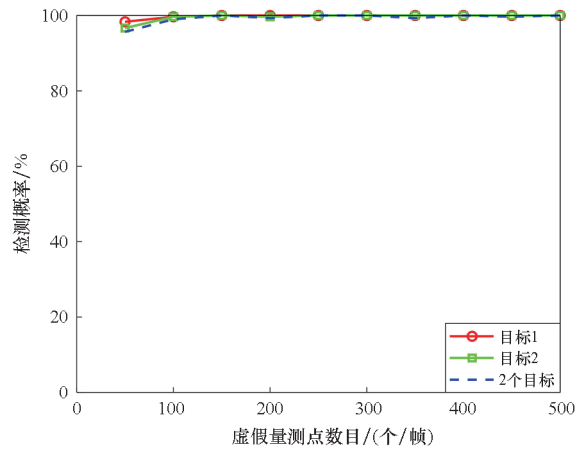


图 22 不同量测点数目下算法的检测概率

Fig. 22 Detection probability of the algorithm under different number of measurements

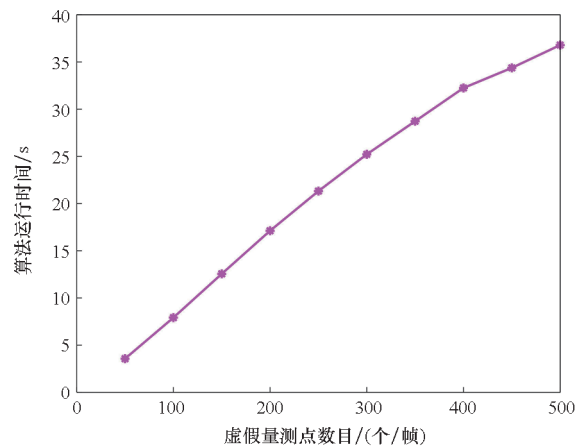


图 23 不同量测点数目下算法的运行时间

Fig. 23 Running time of the algorithm under different number of measurements

在不同量测点数目下,算法的检测概率均能保持在接近于 100% 的水平。但图 22 中有一个奇怪的现象,即虚假量测点数目为 50 个/帧时,算法的检测概率较低,这是由于总量测点数目减小,

在网格化处理中网格的真实宽度小于量测点数目较多时的真实宽度,这使得真实航迹的全部量测点落入同一个网格的概率下降,从而出现检测概率的下降。

随着虚假量测点数目的增加,算法需要处理的数据逐渐增多,这使得算法的运行时间也逐渐增长,其变化近似线性增长。

## 4 结论

本文提出一种基于平行线坐标变换的三维目标检测前跟踪算法,利用真实目标航迹在多个坐标平面内保持直线而虚假航迹不具备此特征的性质,依次在径向距离-时间平面、方位角-时间平面和俯仰角-时间平面对量测点进行平行线坐标变换,完成点到线的转换,通过网格化变换后的新平面实现基于能量和二值的非相参积累,提取满足双重门限的网格内航迹,最后在三维 $x-y-z$ 空间坐标下通过航迹约束与航迹融合实现最终的航迹确认。仿真结果显示,本文算法具备较好的目标检测性能,具有一定的工程实践意义。同时,由于平行线坐标变换本身为直线检测方法,因此本文算法尚不具备对沿非直线运动的目标进行检测的能力,这将在今后的研究中进行改进。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.  
YANG J Y. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 19-27. (in Chinese)
- [2] 杨威, 付耀文, 潘晓刚, 等. 弱目标检测前跟踪技术研究综述[J]. 电子学报, 2014, 42(9): 1786-1793.  
YANG W, FU Y W, PAN X G, et al. Track-before-detect technique for dim targets: an overview[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(9): 1786-1793. (in Chinese)
- [3] 刘宁波, 姜星宇, 丁昊, 等. 雷达大擦地角海杂波特性与目标检测研究综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2771-2780.  
LIU N B, JIANG X Y, DING H, et al. Summary of research on characteristics of radar sea clutter and target detection at high grazing angles[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(10): 2771-2780. (in Chinese)
- [4] BAO Z C, JIANG Q X, LIU F Z. Multiple model efficient particle filter based track-before-detect for maneuvering weak targets[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(4): 647-656.
- [5] YAN B, PAOLINI E, XU L P, et al. A target detection and tracking method for multiple radar systems [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-21.
- [6] DAVEY S J, VU H X, ARULAMPALAM S, et al. Histogram probabilistic multi-hypothesis tracker with colour attributes[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(8): 999-1008.
- [7] RISTIC B, ROSENBERG L, KIM D Y, et al. Bernoulli filter for tracking maritime targets using point measurements with amplitude[J]. Signal Processing, 2021, 181: 107919.
- [8] 倪瑞. 基于动态邻域的检测前跟踪算法的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.  
NI R. Research on track-before-detect algorithm based on dynamic neighborhood[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 薄钧天, 王国宏, 于洪波, 等. 基于平行线坐标变换的检测前跟踪算法[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 325644.  
BO J T, WANG G H, YU H B, et al. Track before detect algorithm based on parallel-line-coordinate transformation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 325644. (in Chinese)
- [10] DUBSKÁ M, HEROUT A. Real projective plane mapping for detection of orthogonal vanishing points[C]//Proceedings of the British Machine Vision Conference, 2013.
- [11] 朱鸿宇, 杨帆, 高晓倩, 等. 基于级联霍夫变换的车道线快速检测算法[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(1): 88-93.  
ZHU H Y, YANG F, GAO X Q, et al. A fast lane detection algorithm based on cascade Hough transform[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(1): 88-93. (in Chinese)
- [12] 杨升. 多雷达点迹融合前目标跟踪方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
YANG S. Research on target tracking before multi-radar plot fusion[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [13] MOQISEH A, NAYEBI M M. Combinational Hough transform for surveillance radar target detection in a 3-D data map[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2008: 1-6.
- [14] TOMBARI F, DI STEFANO L. Hough voting for 3D object recognition under occlusion and clutter[J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2012, 4: 20-29.
- [15] 王国宏, 苏峰, 何友. 三维空间中基于 Hough 变换和逻辑的航迹起始[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2198-2200.  
WANG G H, SU F, HE Y. Hough transform (HT) and logic based track initiator in three dimensional space[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2198-2200. (in Chinese)
- [16] 王国宏, 李岳峰, 于洪波, 等. 三维空间中高超声速目标修正三级 Hough 变换-检测前跟踪算法[J]. 电子与信息

- 学报, 2018, 40(4): 890 – 897.
- WANG G H, LI Y F, YU H B, et al. Modified triple-stage Hough transform track-before-detect algorithm in three-dimensional space for hypersonic target [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 890 – 897. (in Chinese)
- [17] 李岳峰, 王国宏, 李林, 等. 临近空间高超声速目标修正随机 Hough 变换 TBD 算法 [J]. *宇航学报*, 2017, 38(10): 1114 – 1123.
- LI Y F, WANG G H, LI L, et al. A modified randomized Hough transform TBD algorithm for hypersonic target in near space[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(10): 1114 – 1123. (in Chinese)
- [18] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- DING L F, GENG F L, CHEN J C. *Radar principles*[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [19] 薄钧天, 王国宏, 于洪波, 等. 临近空间高超声速多目标检测前跟踪算法[J]. *航空学报*, 2022, 43(5): 325299.
- BO J T, WANG G H, YU H B, et al. Track-before-detection algorithm for multiple hypersonic targets in near space[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 325299. (in Chinese)