

文章编号: 1671-0576(2023)03-0008-08

基于 DP-TBD 的协同组网雷达方位标定误差估计与目标检测

吴熙芃¹, 孙希平¹, 赵泽亚², 吴建新¹, 金 雪²

(1. 中山大学深圳电子与通信工程学院, 广东 深圳 518107;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 提出一种基于动态规划-检测前跟踪(dynamic programming track-before-detect, DP-TBD)的协同组网雷达方位角标定误差估计与目标检测算法。该算法将 DP-TBD 方法和多雷达协同处理相结合, 将各雷达的坐标统一到基准雷达坐标系上, 利用多部雷达进行 DP-TBD 处理, 得到各雷达的多帧累积值函数, 直接利用量测数据估计组网雷达的方位角标定误差, 再进行多部雷达的协同积累处理, 实现目标检测。该算法可显著提高高低信噪比条件下的目标检测性能。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 动态规划-检测前跟踪; 方位角标定误差; 协同组网雷达

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2023.03.002

Azimuth Calibration Error Estimation and Target Detection for Cooperative Networked Radars Based on DP-TBD

WU Xipeng¹, SUN Xiping¹, ZHAO Zeya², WU Jianxin¹, JIN Xue²

(1. School of Electronics and Communication Engineering, Shenzhen Campus of Sun

Yat-sen University, Shenzhen 518107, Guangdong, China; 2. Beijing Institute of

Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Azimuth calibration error estimation and target detection algorithm based on dynamic programming track-before-detect (DP-TBD) for cooperative networked radars was proposed. The algorithm combines the DP-TBD method and multi-radar cooperative processing, unifies the coordinate systems of each radar to the reference radar coordinate system, and obtains the multi-frame merit function of each radar by using DP-TBD processing of multiple radars, which can estimate the azimuth calibration error of the networked radars directly from the measurement data, and then performs cooperative

收稿日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(62101603); 航天科学基金(2019200M1001); 广东省自然科学基金(2021A1515011979); 中山大学中央高校基本科研业务费专项资金(22qntd0401)

作者简介: 吴熙芃(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事雷达目标检测与跟踪研究。

通信作者: 吴建新(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事雷达目标检测与抗干扰研究。

accumulation processing of multiple radars to achieve target detection. The algorithm can significantly improve the target detection performance at low signal-to-noise ratio. The simulation results verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: DP-TBD; azimuth calibration error; cooperative networked radars

0 引言

在多雷达组网的目标检测与跟踪系统中,雷达系统标定误差的存在将直接影响组网雷达数据融合后的目标检测与跟踪。其方位角标定误差的存在将导致雷达量测数据不准确、量测结果可信度降低。因此寻找有效的雷达方位角标定方法具有重要的现实意义。

组网雷达系统方位角标定误差的估计与校正,是指组网雷达系统误差配准中的空间配准。首先对各雷达的方位角标定误差进行估计,然后再利用该估计值对雷达系统量测数据进行校正^[1]。

在传统组网雷达信号处理中,估计雷达系统标定误差的方法主要分为两类^[2]:第一类是将雷达量测数据与理想的目标位置数据进行比较,估计系统的标定误差;第二类是利用多部雷达对同一目标的量测数据进行处理并对比,估计系统的标定误差。第二类方法主要考虑的是固定平台雷达的空间配准^[3],包括实时质量控制误差配准算法^[4]、最小二乘/广义最小二乘误差配准算法^[5-6]、精确极大似然配准算法^[7]、基于大地坐标系的误差配准算法^[8]等。上述方法均需要对各雷达的量测数据进行处理,并对目标状态和系统标定误差进行估计。这些方法在低信噪比环境下估计得到的系统标定误差较大,会影响目标的检测与跟踪。

动态规划-检测前跟踪(dynamic programming track-before-detect, DP-TBD)是一种多帧回波数据联合处理的非相参积累方法,能够在提高雷达对微弱目标的检测性能的同时,对目标的状态信息(距离、方位角等)进行估计。相比于传统的跟踪前检测(detect before track, DBT)方法,DP-TBD方法能够最大程度地保留目标的状态信息^[9-10]。在检测前跟踪的众多实现方

法中,DP-TBD方法由于其广泛的适用性及易于实现等特点,成为学者们研究的热点^[11-14]。

针对传统方位角标定误差校正方法在低信噪比环境下估计得到的系统标定误差较大的问题,本文采用多部固定平台雷达对同一目标的量测数据进行处理的方法,对各雷达的方位角标定误差进行估计。该算法利用多部雷达协同量测数据,将各雷达的坐标统一到基准雷达(假设该雷达不存在方位角标定误差)坐标系上,利用多部雷达进行 DP-TBD 处理,得到各雷达的多帧累积值函数,估计各雷达的方位角标定误差,再进行多部雷达的协同积累处理,对目标进行检测。

1 算法原理

1.1 方位角误差建模及多雷达坐标统一

假设组网雷达系统包含 M 部地基雷达, M 部雷达对同一个目标进行观测,各雷达坐标已知,但由伺服标定引起的方位角标定误差未知。建立各雷达和目标坐标系,雷达与目标位置及方位角标定误差如图 1 所示。各雷达采用数字波束形成(digital beam forming, DBF)的方式测量目标方位角。在各雷达坐标系中,雷达 m 的目标观测方位角和距离分别表示为 θ'_m 和 R_m ,目标的真实方位角为 θ_m ,目标的方位角标定误差为 $\Delta\theta'_m$,其中 $m = 1, 2, \dots, M$; 雷达间的基线长度为 d_h ,其中 $h = 1, 2, \dots, M-1$ 。以雷达 1 作为标定基准雷达,假设其方位角标定误差为 0,即 $\Delta\theta'_1 = 0$ 。误差标定后雷达 m 的目标观测方位角 $\theta'_m = \theta_m + \Delta\theta'_m$ 。

各雷达接收数据处理均在距离-方位角坐标系下完成,现采用 M 部雷达协同的方式对 $\Delta\theta'_m$ 进行估计。为了进行雷达间数据配准与融合处理,需要将各雷达的距离-方位角坐标系统一变换到雷达 1 的距离-方位角坐标系中^[15]。变换过程中,雷达 1 为融合中心雷达,其余为参与融合的雷

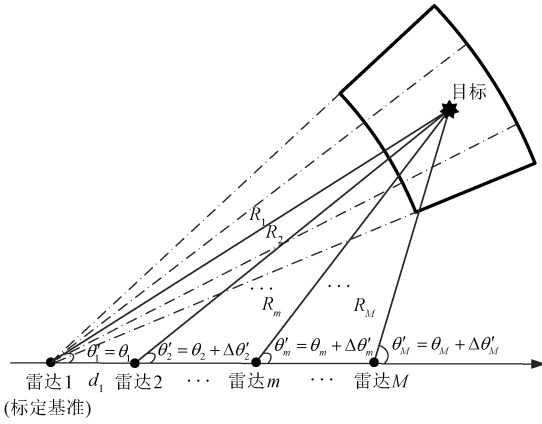


图 1 雷达与目标位置及方位角标定误差示意图

达。根据余弦定理和正弦定理,参与融合的雷达的目标观测距离 R_m 和观测方位角 θ'_m 的量测值可表示为

$$\begin{cases} R_m = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{m-1} d_h\right)^2 + R_1^2 - 2 \sum_{h=1}^{m-1} d_h R_1 \cos \theta'_1} \\ \theta'_m = \pi - \arcsin\left(\frac{R_1 \sin \theta'_1}{R_m}\right) \end{cases}, \quad m = 2, 3, \dots, M \quad (1)$$

统一各雷达数据处理的坐标系可使用二维插值^[16]方法实现。在低信噪比情况下,采用 DP-TBD 方法估计目标在各雷达坐标系下的方位角。统一坐标系后,对多部雷达进行协同非相参积累,对目标进行检测,同时可求得方位角标定误差。

另外需要注意的是,在本文中,各雷达是针对单目标进行检测和跟踪并估计各雷达的方位角标定误差的,如图 1 所示。各雷达方位角量测误差是随机的,而各雷达方位角标定误差固定但未知,此时无法区分方位角量测误差和方位角标定误差。从式(1)可以看出,组网雷达间基线长度的量测误差也将影响到统一坐标系后各雷达的方位角量测值和距离量测值。同时,由于各雷达方位角标定误差是固定的,可在方位角标定误差的估计过程中考虑距离量测误差和方位角量测误差,而不影响方位角标定误差的估计。为了突出重点,本文假设每部雷达均已知其他雷达在各自坐标系中的准确位置。

1.2 DP-TBD 处理

DP-TBD 是一种多帧间非相参积累方法,能够最大程度地保留目标的状态信息。DP-TBD

能够对目标的方位角进行估计,因此 DP-TBD 方法能够直接应用到方位角标定误差的估计中,同时能对目标进行检测^[9-10]。在建立的方位角误差模型和观测模型的基础上,DP-TBD 处理通过初始化、迭代递推累积和航迹回溯等步骤,得到目标的距离-方位角航迹估计序列,最后选择最接近目标真实轨迹的序列^[17]。

设雷达共录取到 K 帧量测数据,则第 k 帧量测数据中,各量测单元的量测值

$$z_k = \begin{cases} \omega(k), & \text{无目标} \\ A(k) + \omega(k), & \text{有目标} \end{cases}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

式中: $\omega(k)$ 为量测噪声幅度; $A(k)$ 为目标信号幅度。本文根据雷达方程计算各雷达接收的目标信号幅度。

DP-TBD 处理具体包括 4 个步骤。

步骤 1:初始化。首先建立距离-方位角状态空间,状态空间离散化后的第 k 帧目标状态 $\mathbf{S}_k = [r_k \quad \theta_k]^T$,其中 r_k, θ_k 分别表示第 k 帧目标的距离和方位角, T 为矩阵转置运算符。雷达第 1 次扫描($k=1$)的目标状态 $\mathbf{S}_1 = [r_1 \quad \theta_1]^T$,有

$$\begin{cases} I(\mathbf{S}_1) = z_1(\mathbf{S}_1) \\ \varphi(\mathbf{S}_1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I(\mathbf{S}_1)$ 表示目标状态 \mathbf{S}_1 对应的阶段值; $z_1(\mathbf{S}_1)$ 表示目标状态 \mathbf{S}_1 对应的量测值; $\varphi(\mathbf{S}_1)$ 表示转移到当前帧状态 \mathbf{S}_1 的上一帧的状态值,因当前帧为初始帧,因此将其设为 0。本文采用幅度作为 DP-TBD 处理的值函数。

步骤 2:迭代递推累积。当 $2 \leq k \leq K$ 时,对目标状态 $\mathbf{S}_k = [r_k \quad \theta_k]^T$,有

$$\begin{cases} I(\mathbf{S}_k) = \max_{\mathbf{S}_{k-1} \in \tau(\mathbf{S}_k)} (I(\mathbf{S}_{k-1})) + z_k(\mathbf{S}_k) \\ \varphi(\mathbf{S}_k) = \operatorname{argmax}_{\mathbf{S}_{k-1}} (I(\mathbf{S}_{k-1})) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I(\mathbf{S}_k)$ 表示目标状态 \mathbf{S}_k 对应的阶段值; $\tau(\mathbf{S}_k)$ 表示第 $k-1$ 帧所有的可能转移到状态 \mathbf{S}_k 的离散状态的集合; $z_k(\mathbf{S}_k)$ 表示目标状态 \mathbf{S}_k 对应的量测值; $\varphi(\mathbf{S}_k)$ 表示转移到当前帧目标状态 \mathbf{S}_k 的上一帧状态值; $\max(\cdot)$ 为求最大值函数; $\operatorname{argmax}(\cdot)$ 为求最大值对应的自变量的

函数。

步骤3:迭代结束。假设当迭代累积到第 K 帧时,能量累积的最大值超过检测门限,有

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{S}}_k &= \underset{\mathbf{S}_K}{\operatorname{argmax}}(I(\mathbf{S}_k)), \\ \text{s. t. } \max(I(\mathbf{S}_k)) &> V_{\text{DT}}, \\ k &= K-1, K-2, \dots, 1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\hat{\mathbf{S}}_k$ 表示第 k 帧中能量累积的最大值超过检测门限的状态; V_{DT} 表示DP-TBD的检测门限。

步骤4:航迹回溯。对每个状态 $\hat{\mathbf{S}}_k$,有

$$\hat{\mathbf{S}}_k = \varphi(\mathbf{S}_k) \quad (6)$$

则估计目标的航迹矩阵 $\hat{\mathbf{S}}_{1:K} = [\hat{\mathbf{S}}_1 \quad \hat{\mathbf{S}}_2 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{S}}_K]$ 。

1.3 协同雷达方位角标定误差估计与目标检测算法

设雷达 m 得到的全部 K 帧量测数据为 $\mathbf{Z}_{m,1:K}$,DP-TBD处理后的全部 K 帧值函数为 $\mathbf{I}_{m,1:K}$ 。各雷达对同一个目标进行观测,各雷达除方位角标定误差和排布位置外,所有参数均相同。

为了将各雷达量测的初始距离门对准,在探测空域已知的情况下,各雷达可在单目标所处的大致距离范围内搜索,并对单目标进行检测,确定单目标在各雷达坐标系下所处的初始距离门,最后将初始距离门对准。

由于雷达 $n(n=2,3,\dots,M)$ 与雷达1的差异仅体现在方位角标定误差 $\Delta\theta'_n$ 上,而且各雷达的位置已知。可预先设置雷达 n 与雷达1之间的方位角偏移网格数,组成向量 $\mathbf{G}_n(l)$, $l=1,2,\dots,L$, L 为向量长度。因此,估计 $\Delta\theta'_n$ 等价于从 $\mathbf{G}_n(l)$ 中找到最优的方位角偏移网格数,并且此时已进行了准确的坐标转换。

$\mathbf{G}_n(l)$ 的设置可采用如下方法进行。首先提取雷达1全部 K 帧量测数据 $\mathbf{Z}_{1,1:K}$ 的最大值所在的方位角网格位置,组成向量 $\boldsymbol{\theta}_1 = [\theta_{1,1} \quad \theta_{1,2} \quad \dots \quad \theta_{1,k} \quad \dots \quad \theta_{1,K}]$;然后将雷达 n 的全部 K 帧量测数据 $\mathbf{Z}_{n,1:K}$ 按照1.1节方法统一到雷达1的坐标系中得到 $\bar{\mathbf{Z}}_{n,1:K}$ 。再提取 $\bar{\mathbf{Z}}_{n,1:K}$ 的最大值所在的方位角网格位置,组成向量

$\bar{\boldsymbol{\theta}}_n = [\bar{\theta}_{n,1} \quad \bar{\theta}_{n,2} \quad \dots \quad \bar{\theta}_{n,k} \quad \dots \quad \bar{\theta}_{n,K}]$;最后计算雷达 n 与雷达1量测数据最大值所在方位角的偏移网格数向量 $\Delta\bar{\boldsymbol{\theta}} = |\bar{\boldsymbol{\theta}}_n - \boldsymbol{\theta}_1|$,提取 $\Delta\bar{\boldsymbol{\theta}}$ 中元素的最大值 $\Delta\bar{\theta}_{\max}$ 。则 $\mathbf{G}_n(l) = \lceil [1, \Delta\bar{\theta}_{\max} + \theta_c]_L \rceil$,其中: $[1, \Delta\bar{\theta}_{\max} + \theta_c]_L$ 表示生成 $1 \sim (\Delta\bar{\theta}_{\max} + \theta_c)$ 之间的 L 个点,这些点的间距为 $(\Delta\bar{\theta}_{\max} + \theta_c - 1)/(L - 1)$; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整; θ_c 表示可调整的网格参数,设为整数。

为了找到最优的方位角偏移网格数,可采用搜索的方法进行。将 $\mathbf{Z}_{n,1:K}$ 偏移 $\mathbf{G}_n(l)$ 中的一个元素值,得到 $\mathbf{Z}_{n,1:K}^{G_n(l)}$,并将其统一到雷达1的坐标系中得到 $\tilde{\mathbf{Z}}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 。对 $\tilde{\mathbf{Z}}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 按1.2节的DP-TBD方法进行处理,得到值函数向量 $\tilde{\mathbf{I}}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 。最后将 $\tilde{\mathbf{I}}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 累加到 $\mathbf{I}_{1,1:K}$ 上,得到第 l 次搜索的值函数

$$\mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(l)} = \tilde{\mathbf{I}}_{n,1:K}^{G_n(l)} + \mathbf{I}_{1,1:K} \quad (7)$$

在遍历搜索 L 个点之后,将得到的值函数组成向量

$$\mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(1:L)} = [\mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(1)} \quad \mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(2)} \quad \dots \quad \mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(l)} \quad \dots \quad \mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(L)}] \quad (8)$$

通过获取最优的方位角偏移网格数 \hat{l} ,判定此时已准确进行了坐标转换。采用准则为

$$\hat{l} = \underset{l}{\operatorname{argmax}}(\mathbf{I}_{n,\text{all}}^{G_n(1:L)}) \quad (9)$$

在搜索得到 \hat{l} 后,可得到各雷达方位角标定误差

$$\Delta\tilde{\theta}'_n = \mathbf{G}_n(\hat{l})\rho_\theta \quad (10)$$

式中: ρ_θ 为方位角分辨率。

协同雷达方位角标定误差估计与目标检测算法流程如下。

步骤1:初始化。采集雷达 n 的全部 K 帧量测数据 $\mathbf{Z}_{n,1:K}$,令 $l=1$ 。

步骤2:量测数据偏移方位角网格。将雷达 n 的全部 K 帧量测数据 $\mathbf{Z}_{n,1:K}$ 偏移 $\mathbf{G}_n(l)$,得到 $\mathbf{Z}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 。

步骤3:统一坐标系。将雷达 n 的全部 K 帧量测数据 $\mathbf{Z}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 统一到雷达1的坐标系中,得到 $\tilde{\mathbf{Z}}_{n,1:K}^{G_n(l)}$ 。

步骤 4: DP-TBD 处理。对 $\widetilde{\mathbf{G}}_{n,1;K}^{G_n(l)}$ 进行 DP-TBD 处理, 得到值函数 $\widetilde{\mathbf{I}}_{n,1;K}^{G_n(l)}$, 并按式(7)累加到雷达 1 的 DP-TBD 处理后的值函数上。

步骤 5: 循环。令 $l = l + 1$, 重复步骤 2 ~ 步骤 4, 直至 $l = L$ 。

步骤 6: 提取最优的偏移方位角网格数, 判定已准确进行坐标转换。在循环终止之后, 得到 $\mathbf{I}_{n,all}^{G_n(1:L)}$, 并按式(9)取 $\mathbf{G}_n(\hat{l})$, 认为此时雷达 n 的值函数与雷达 1 重合, 判定已准确进行坐标转换, 再按式(10)进行各雷达方位角标定误差的计算。

经由上述处理之后, 可将各雷达的值函数 $\widetilde{\mathbf{I}}_{n,1;K}^{G_n(\hat{l}_n)}$, 其中 \hat{l}_n 表示雷达 n 的最优方位角偏移网格数, 全部累加到雷达 1 的 DP-TBD 处理后的值函数上, 并结合式(5), 利用该值函数对目标进行检测。协同雷达方位角标定误差估计的处理流程如图 2 所示。

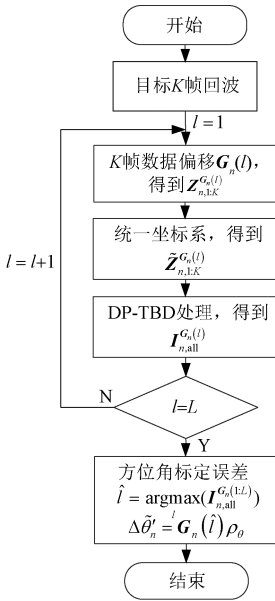


图 2 协同雷达方位角标定误差估计处理流程图

2 实验验证

采用仿真数据验证算法的有效性。实验设置 4 部地基雷达, 其中雷达 1 为基准雷达。考虑到工程应用中, L 过大将导致搜索量的急剧增加, 设置 $\mathbf{G}_n(l)$ 的向量长度 L 的网格数为 10 个, 可调整参数 θ_c 的网格数为 20 个。

各雷达除方位角标定误差和排布位置外, 其

余参数均相同, 各雷达波门开启时刻对应的距离均为 30 km, 录取数据格式为距离-方位角, 采用 DBF 方法测角。主要仿真参数: 信噪比为 7 dB (高斯噪声背景下), 各雷达均积累 4 帧数据 (帧间间隔时间为 1 s), 过程噪声功率谱密度为 $0.001 \text{ m}^2/\text{s}^4$; 雷达中心频率为 30 GHz, 带宽为 100 MHz, 脉宽为 $4 \mu\text{s}$, 距离采样率为 120 MHz, 方位角分辨率为 0.001 rad。雷达在 x - y 平面上排布, 设定各雷达的位置坐标和方位角标定误差。雷达 1 的位置坐标为 (0 m, 0 m), 方位角标定误差为 0 rad; 雷达 2 的位置坐标为 (40 m, 0 m), 方位角标定误差为 0.017 5 rad; 雷达 3 的位置坐标为 (80 m, 0 m), 方位角标定误差为 0.034 9 rad; 雷达 4 的位置坐标为 (120 m, 0 m), 方位角标定误差为 0.052 4 rad。设定目标的初始状态, 即目标在 x - y 平面上的初始位置坐标 x_0, y_0 和速度分量 v_x, v_y 分别为 300, 300 m 和 14.3, 16.5 m/s。目标在 x - y 平面上匀速运动。雷达 2~雷达 4 的距离-方位角坐标系将均统一到基准雷达 1 的距离-方位角坐标系中。

2.1 方位角标定误差估计

根据 1.3 节所提算法, 估计雷达 2~雷达 4 的方位角标定误差。

以雷达 4 为例, 将雷达 4 的 DP-TBD 处理后的值函数累加到雷达 1 的 DP-TBD 处理后的值函数上, 对比直接进行坐标转换和方位角误差校准后进行坐标转换 (已取得最优的偏移方位角网格数, 第 8 个网格) 两种情况下的方位角标定误差, 如图 3 所示。当直接进行坐标转换时, 雷达 1 和雷达 4 的目标方位角量测值之间存在偏差, 如图 3(a) 所示。为了能够利用 DP-TBD 同时对目标进行检测, 采用搜索的方法继续进行坐标转换, 直到找到最优的方位角偏移网格数, 使雷达 1 和雷达 4 的目标观测方位角重合。在搜索到第 8 个网格时, 雷达 4 找到最优的方位角偏移网格数, 认为此时已准确进行坐标转换, 如图 3(b) 所示。

在准确进行坐标转换之后, 本文算法估计所得的方位角标定误差如表 1 所示。可以看到, 本文算法估计所得的方位角标定误差的精度与所取的方位角偏移网格数向量 $\mathbf{G}_n(l)$ 有关。由于网格数只能取整数, 最后雷达 2 估计所得的方位角

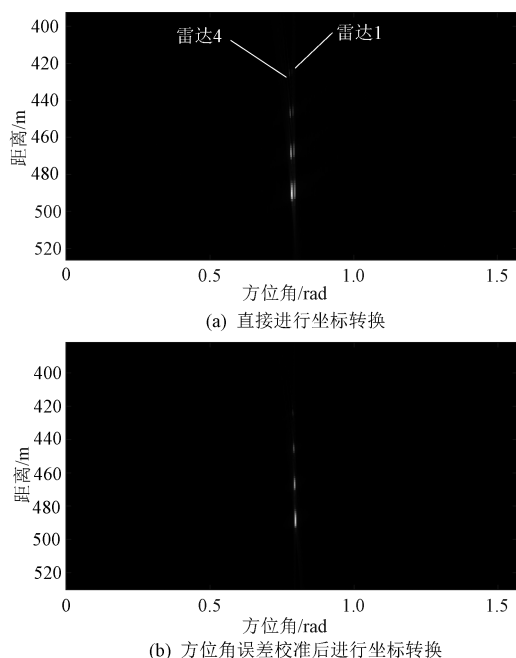


图3 方位角误差校准前后坐标转换的对比图

表1 雷达方位角标定误差的估计

雷达	真实方位角 标定误差/rad	本文算法估计方位角 标定误差/rad	方位角偏移网格数向量	绝对误差/rad	相对误差/%
雷达2	0.017 5	0.017	[1,5,9,13,17,21,25,29,33,37]	0.000 5	2.60
雷达3	0.034 9	0.035	[1,7,13,18,24,29,35,40,46,51]	0.000 1	0.27
雷达4	0.052 4	0.050	[1,8,15,22,29,36,43,50,57,64]	0.002 4	4.51

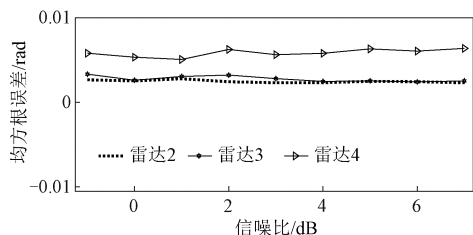


图4 雷达方位角标定误差估计的均方根误差 1

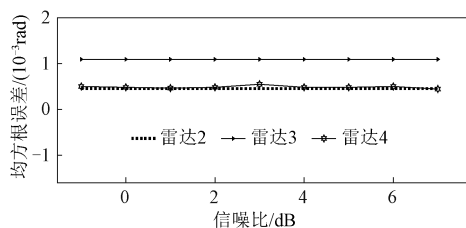


图5 雷达方位角标定误差估计的均方根误差 2

定目标在 $x-y$ 平面上的初始位置坐标 x_0, y_0 和速度分量 v_x, v_y 分别为 300, 30 m, 和 1, 1 m/s, 各雷达参数及处理流程与前文相同。对雷达 2~雷达 4 在不同信噪比下各进行 100 次蒙特卡罗实验。雷达 2~雷达 4 方位角标定误差估计的 RMSE 与信噪比的关系如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在该目标运动参数下,通过本文算法估计得到的各雷达方位角标定误差的 RMSE 随着信噪比的提升,变化并不明显。

对比图 4 和图 5 可以看出,在两种不同的目

标定误差为 0.017 rad(对应网格数 17,第 5 个网格),雷达 3 估计所得的方位角标定误差为 0.035 rad(对应网格数 35,第 7 个网格),雷达 4 估计所得的方位角标定误差为 0.050 rad(对应网格数 50,第 8 个网格)。

为了进一步对本文算法的估计精度进行分析,对雷达 2~雷达 4 在不同信噪比下各进行 100 次蒙特卡罗实验。设定目标在 $x-y$ 平面上的初始位置坐标 x_0, y_0 和速度分量 v_x, v_y 分别为 300, 300 m 和 14.3, 16.5 m/s。雷达 2~雷达 4 的方位角标定误差估计的均方根误差(RMSE)与信噪比的关系如图 4 所示。可以看出,采用本文算法估计得到的各雷达方位角标定误差的 RMSE 随着信噪比的提升变化并不明显。

在目标运动过程中,各雷达量测方位角随着雷达-目标距离的变化而变化。为了分析不同的目标运动参数对方位角标定误差估计的影响,设

标运动参数下,各雷达方位角标定误差的 RMSE 并不相同,说明目标运动参数的改变将导致各雷达方位角标定误差 RMSE 的改变。

此外,在图 4 中,雷达 4 的 RMSE 明显大于雷达 2 和雷达 3 的;在图 5 中,雷达 3 的 RMSE 明显大于雷达 2 和雷达 4 的。这是由于受到噪声影响,各雷达依据本文方法所获取的方位角偏移网格数在每次蒙特卡罗实验中不尽相同,使得各雷达估计的方位角标定误差在每次蒙特卡罗实验中不尽相同,最终导致各雷达的方位角标定误差的 RMSE 不尽相同。

2.2 检测与跟踪性能分析

DP-TBD 是一种帧间非相参积累方法。其性能分析采用蒙特卡罗实验进行:在高斯白噪声背景下,当虚警概率为 0.000 1 时,进行 20 000 次蒙特卡罗实验,对 1 个目标进行观测。

检测性能分析共分 3 种情况进行。情况 1:单雷达节点多帧非相参积累;情况 2:不存在方位角标定误差时多雷达节点非相参积累;情况 3:存在方位角标定误差时多雷达节点非相参积累。不同情况下的检测概率如图 6 所示。

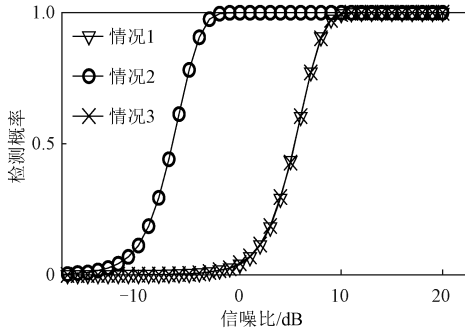


图 6 不同情况下的检测概率

从图 6 可以看出,相比于单雷达多帧积累的情况,对校正标定误差之后的多节点组网雷达进行多帧积累,可显著提高低信噪比条件下的目标检测性能,而当存在标定误差时,组网雷达多帧积累的检测性能几乎没有改善。

跟踪性能分析在信噪比为 7 dB 的条件下进行。首先对比方位角标定误差校正前各雷达恢复的目标航迹和误差校正后多雷达融合的目标航迹,如图 7 所示。情况 1:理想目标航迹;情况 2:基准雷达 1 恢复航迹;情况 3:校正前雷达 2 恢复航迹;情况 4:校正前雷达 3 恢复航迹;情况 5:校正前雷达 4 恢复航迹;情况 6:多雷达融合目标航迹。可以看到,在方位角标定误差校正前,雷达 2~雷达 4 各自恢复的 3 条航迹均与理想目标航迹存在差距,主要是在方位角上存在差距;在方位角标定误差校正后,将各雷达航迹融合,与理想目标航迹进行对比,可以看到融合后的航迹与理想目标航迹具有良好的一致性,尤其是在方位角上并没有明显的差距。

图 7 中的目标跟踪误差(绝对误差)均值,如表 2 所示。可以看到,多雷达融合后的目标跟踪误差均值比雷达 2~雷达 4 校正前的目标跟踪误

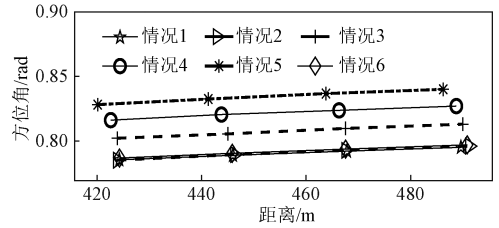


图 7 误差校正前后恢复的航迹

差均值小。

表 2 目标跟踪误差均值

雷达	距离/m	方位角/rad
雷达 1(基准)	0.635 3	0.000 6
雷达 2(校正前)	0.491 1	0.017 2
雷达 3(校正前)	1.554 9	0.031 4
雷达 4(校正前)	4.054 9	0.043 9
多雷达(融合)	0.404 2	0.001 6

3 结论

本文提出了一种基于 DP-TBD 的协同组网雷达方位角标定误差估计方法。该算法将 DP-TBD 和多雷达协同处理结合起来,能直接利用量测数据估计组网雷达的方位角标定误差,并进行多雷达协同积累,实现目标检测,可显著提高低信噪比条件下的目标检测性能。仿真结果验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 欧阳志宏. 雷达组网误差配准算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [2] 杨宏文, 郁文贤, 胡卫东, 等. 基于数据补偿的雷达系统误差估计[J]. 火力与指挥控制, 2000, 25(2): 23-27.
- [3] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社, 2013: 335-346.
- [4] 王波, 王灿林, 董云龙. RTQC 误差配准算法性能分析[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3067-3081.
- [5] 李鸿艳, 冯新喜. 一种基于 ECEF 坐标转换的最小二乘配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 92-95.
- [6] 拜兵虎, 白树林, 张玉梅. 广义最小二乘法配准组

- 网雷达误差的技术研究[J]. 无线互联科技, 2014(7): 158-159.
- [7] ZHOU Y F, LEUNG H, YIP P C. An exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(6): 1560-1573.
- [8] ZHOU Y F, LEUNG H, BLANCHETTE M. Sensor alignment with earth-centered earth-fixed (ECEF) coordinate system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2): 410-417.
- [9] 易伟. 基于检测前跟踪技术的多目标跟踪算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [10] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, AES-21(1): 144-156.
- [11] LE D, HUANG Q, LIU Z L, et al. Adaptive-transition-set track before detect algorithm based on dynamic programming[C]// 2019 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Chengdu, China. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [12] YU H B, TAN S C, CAO Q, et al. A dynamic programming based TBD algorithm for near space targets under range ambiguity [C]// Communications, Signal Processing and System, Singapore. Berlin: Springer-Verlag, 2020: 1029-1037.
- [13] LI Y, LI C P, TIAN M, et al. Two-step thresholds TBD algorithm for time sensitive target based on dynamic programming[J]. IEEE Access, 2020, 8: 209267-209277.
- [14] 李昕哲, 王首勇, 郑岱堃. 一种杂波自适应动态规划检测前跟踪算法[J]. 空军预警学院学报, 2016, 30(3): 162-166, 172.
- [15] ULANDER L, HELLSTEN H, STENSTROM G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760-776.
- [16] FROLIND P O, ULANDER L. Evaluation of angular interpolation kernels in fast back-projection SAR processing[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(3): 243-249.
- [17] 文鸣. 中重频雷达的检测前跟踪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- ~~~~~
- (上接第7页)
- [3] XIAO B, LIU Y X, HUO K, et al. OFDM integration waveform design for radar and communication application [C]// International Conference on Radar Systems (Radar 2017), Belfast. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [4] 胡苏, 高原, 王军. 通信雷达一体化波形设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 5-13.
- [5] ZHANG W X, ZHANG H. The design of integrated waveform based on MSK-LFM signal [C]// 2020 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2020: 565-569.
- [6] JIANG M, QI L L, YAO Y, et al. Radar and communication integration based on OFDM signal [C]// 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Macau. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2020: 9259515.
- [7] QI L L, YAO Y, HUANG B T, et al. A phase-coded OFDM signal for radar-communication integration [C]// 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [8] 田丽佳. 基于混沌直接序列扩频的雷达通信一体化波形设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [9] LI T Y, YORKE J A. Period three implies chaos [J]. American Mathematical Monthly, 1975, 82(10): 985-992.
- [10] OZKAPTAN C D, EKICI E, ALTINTAS O, et al. OFDM pilot-based radar for joint vehicular communication and radar systems [C]// 2018 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Taipei. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [11] HUANG Y X, HU S, MA S Y, et al. Constant envelope OFDM RadCom fusion system [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018(1): 104.