

战场侦察雷达与光学传感器指示交接 技术算法研究

靳玉超, 高跃清, 甘经纬

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对二坐标警戒雷达对三坐标光学传感器传感器目标指示交接问题进行研究, 由于二坐标雷达缺少对目标俯仰角的测量信息, 难以向三坐标光学传感器提供准确的指示信息, 在交接中无法进行准确的坐标变换的处理, 导致雷达对光学传感器指示交接效率低下; 首先, 利用目标信息的先验知识建立了二坐标指示信息的概率描述模型; 随后对不同坐标系之间的转换进行描述, 并用蒙特卡罗采样法解决不同传感器之间坐标转换问题; 最后, 针对机械伺服的光学传感器设计了搜索算法, 优化了光学传感器搜索空域大小和视域编排顺序, 解决机械伺服传感器在对目标的指示交接中存在的搜索视域编排不合理、耗时较长等问题; 仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 指示交接; 蒙特卡罗; 坐标转换; 视域编排; 搜索

Research of Cueing and Handoff Technology for Battlefield Surveillance Radar and IRST

Jin Yuchao, Gao Yueqing, Gan Jingwei

(54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: According to the research of the two coordinate warning radar, the three coordinate optical sensor target indication connection problem is studied. Because the two coordinate radar is lack of the measurement information of the target pitch angle, it is difficult to provide accurate indication information to the three coordinate optical sensor, and the accurate coordinate transformation cannot be processed in the connection. The sensor is inefficient in indicating the handover of sensors. First, the probability description model of two coordinate radar indication information is established by using the prior knowledge of the target information. Then the Monte Carlo sampling method is used to solve the transformation of the indication information from the two-dimensional coordinate system to the three-dimensional coordinate system. Finally, the search algorithm is designed for the mechanical servo optical sensor, and the optical sensor search is optimized. The problem of unreasonable wavefront arrangement and long time-consuming in the process of indicating and handing over targets by mechanical servo sensors is solved by arranging the space size and wavefront sequence. The effectiveness of the method is verified by the simulation experiment.

Keywords: cueing and handoff; Monte Carlo; coordinate transformation; position arrangement; search

0 引言

雷达一直是用户跟踪和识别的战场目标重要传感器, 但由于雷达在工作时不可避免地向空中辐射大量的电磁波, 因此容易遭受电子对抗、反辐射导弹、超低空突防和隐身飞机这四大威胁的攻击^[1]。和雷达不同, 光电、红外等光学传感器 (IRST) 具有不易被对方定位的特点, 同时具有很好的抗干扰能力。但是目前主流的 IRST 并不具备可以满足需求的搜索能力。并且随着电路集成技术的快速发展和雷达、IRST 等传感器的更新换代, 单一传感器的发展已经逐渐成熟、发展趋势趋于平缓, 已经无法满足现在突袭装备的侦查指标, 在这种瓶颈下, 多传感器融合作为一种以传感器通过组网的方式使得效率倍增的技术得到了越来越

多的青睐。在一个由多部传感器所组成的探测系统中, 各个传感器可能拥有不同的特征、性能、部署位置和使用规则^[2]。当利用这些传感器对同一个目标进行探测时, 不同的传感器将获取到不同的信息, 而且, 能有效探测到目标的时刻也将存在差异。此时, 利用已获取的信息引导未探测到目标的传感器来搜索捕获目标, 相比于单纯依靠传感器的自身能力进行搜索, 将更加高效和快捷。其中, 目标的指示交接问题是此过程中的主要环节。文献 [3-7] 提出了多个传感器之间的综合管理技术, 文献 [8] 给出了传统空域指示交接的视域编排方法。文献 [9-10] 对传感器之间的引导进行了研究, 但这些都没有考虑到传感器搜索会受到机械伺服的限制。相对于传统的二坐标警戒雷达和三坐标跟踪雷达之间的指示交接问题^[11], IRST 受机械伺服的限制, 必定会导致搜索效率低下、耗时长。占用资源多等一系列问题。在传统搜索过程中, IRST 通过雷达的指示信息引导下会在一个较小的空域内进行搜索, 然而主流的 IRST 不具备或具有较弱的自动搜索能力, 很容易在一定时

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-08-27。

作者简介: 靳玉超 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事多传感器融合相关技术方向的研究。

间内无法搜索到目标, 使目标离开引导区域导致搜索失败。如何在警戒雷达的指引下合理规划 IRST 的搜索路径是目前科学研究的空白区, 故本文针对机械伺服的传感器提出一种八邻域的算法, 使 IRST 搜索路径进行了优化, 可以有效解决机械伺服带来的这些问题, 并利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 采样法等数学手段解决了传统坐标转换没有考虑到的非线性转换问题。

1 传感器指示信息模型描述

传感器指示信息建模主要针对可见光、红外、震动传感器、雷达给出的目标信息进行不确定性描述, 并对其进行时间上的外推和空间上的转换。

模型描述: 以二坐标预警雷达引导 IRST 为例, 假设二坐标预警雷可以对目标进行距离和俯仰角的观测得到 (r, θ) , 并假设 r 和 θ 均满足高斯分布, 并彼此互相独立, 标准差分别为 σ_r 和 σ_θ 。二坐标预警雷虽然缺少俯仰上的信息, 但是根据二坐标雷达所处的地理环境限制和目标的一些运动规律, 同样可以得到一些指示交接中的先验知识。这些先验知识包括:

- 1) 目标的高度范围 (最大飞行高度和最低飞行高度);
- 2) 目标最可能出现的高度 (地面目标、低空目标等);
- 3) 地球曲率导致的视野盲区;
- 4) 周边障碍物的遮挡效应或地理环境限制;
- 5) 特定目标的初始发现距离;
- 6) 目标信号的功率和信噪比;
- 7) 目标成像像素点多少、成像参数与目标距离的关系 (对光学传感器而言)。

在俯仰角已知的情况下, 1)、2) 和目标距离存在严格的约束关系; 3)、4) 在通视和地理环境方面对距离存在约束; 5)、6) 和目标距离存在一定的约束关系; 7) 在成像关系上对目标距离存在约束。根据这些先验知识, 可以建立二坐标雷达的目标距离信息描述, 部分知识也可用于方位角和俯仰角测量的概率分布修正。

两坐标雷达信息建模: 下面以两坐标预警雷达为例, 阐述传感器信息建模的基本过程。图 1 所示为两坐预警标雷达与目标之间的几何关系。图中 H 为雷达高度, R 为所在区域地球半径。

1.1 考虑目标最大飞行高度

由于目标受到环境、自身机型、空气动力学等影响, 可以判断出一般突袭机最大飞行高度 H_{\max} 。由图 1 几何关系可知, 最大俯仰角:

$$\alpha = \arccos \frac{H^2 + r^2 + 2RH - 2RH_{\max} - H_{\max}^2}{2r(H+R)} - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

1.2 考虑目标高度下限

假设目标的真实高度为 0, 斜距为 r , 由图 1 几何关系所示, 可根据斜距和地面得出目标的最小俯仰角 β :

$$\beta = \arccos \frac{H^2 + r^2 + 2RH}{2r(H+R)} - \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

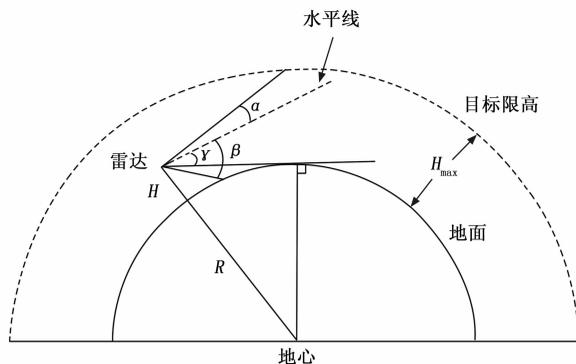


图 1 二坐预警标雷达与目标的几何示意图

1.3 考虑二坐标雷达俯仰角上的探测区间

当目标在雷达波束之内, 二坐标雷达才能探测到目标。如图 2 所示当目标位于波束之外处于盲区不可见, 故目标俯仰范围应位于雷达俯仰波束范围 $(\varphi_{\text{high}}, \varphi_{\text{low}})$ 内。

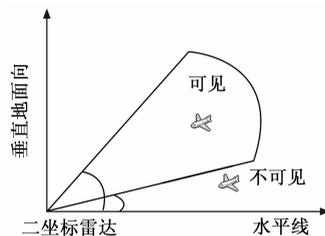


图 2 二坐标雷达探测区间示意图

1.4 考虑地球曲率导致的视野盲区

受到地球曲率影响, 在擦地角以下的目标处于视野盲区不可见, 故雷达地平线距离小于雷达距目标的距离时, 即 $r > \sqrt{H^2 + 2RH}$, 其擦地角 γ 为此时最小俯仰角。

$$\gamma = \arcsin \frac{R}{H+R} - \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

类似的, 其它地物的遮挡效应也可通过建模加以解决。综合以上四点, 目标在俯仰范围上的最大俯仰角和最小俯仰角 $(\varphi_{\max}, \varphi_{\min})$ 可通过这些先验条件来判定。其中 φ_{\max} 为 φ_{high} 和 α 中的较小值。当斜距小于等于 $\sqrt{H^2 + 2RH}$ 时, φ_{\min} 为 φ_{low} 和 γ 中的较大值; 当斜距大于 $\sqrt{H^2 + 2RH}$ 时, φ_{\min} 为 φ_{low} 和 β 中的较大值, 即:

$$\begin{aligned} \text{当 } r \leq \sqrt{H^2 + 2RH} \text{ 时,} \\ \varphi_{\min} = \max(\varphi_{\text{low}, \beta}) \\ \varphi_{\max} = \min(\varphi_{\text{high}, \alpha}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } r > \sqrt{H^2 + 2RH} \text{ 时,} \\ \varphi_{\min} = \max(\varphi_{\text{low}}, \gamma) \\ \varphi_{\max} = \min(\varphi_{\text{high}}, \alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

1.5 考虑目标可能出现的高度层

不同目标有自己特定的飞行高度, 可以根据实战场上一些战略行动分析出敌方目标可能出现的高度, 如侦查类民用无人机飞行高度约为 150 m, 侦查类军用无人机最可能出现的高度为 600 m。这些先验知识同样可以为指示交接中

IRST 在俯仰上的搜索提供信息。目标可能出现的先验信息可由近似正太分布的概率密度函数来表示。假设目标最有可能出现的高度层有两个，分别用 φ_1 和 φ_2 来表示，标准差 σ_1 和 σ_2 通过目标最有可能出现的高度层和先验知识中的置信度来判断。其概率密度函数曲线如图 3 所示。

$$f_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{C} \left[\frac{1}{\sigma_1} \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1}{\sigma_2} \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \right] \quad (6)$$

其中：C 为归一化常数。

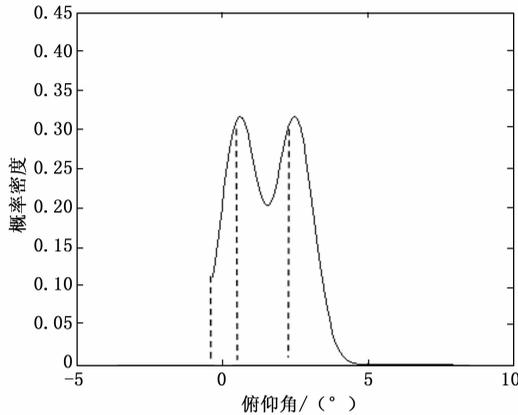


图 3 俯仰角概率密度函数

由于受最小俯仰值 φ_{\min} 的影响，图 3 表现的概率密度函数曲线表现为两个常态函数组成的截断，其中 φ_1 和 φ_2 为两个均值尖峰。

当对目标可能在高度层没有任何先验知识时，可吧目标在俯仰角取值区间内看做均匀分布。即：

$$f_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}, \varphi \in (\varphi_{\max}, \varphi_{\min}) \quad (7)$$

由实际情况可知，目标在俯仰上的分布与目标的水平和距离上的分布不存在必然的联系，可以认为目标的俯仰与水平、距离上的分布相互独立。同时对目标的水平和距离分布进行贝叶斯方程推到，得出目标在水平以及距离上的分布符合正太分布，并以雷达为中心点为均值、观测噪声为方差。通过讨论目标在距离、水平和俯仰角分布，即可得到目标的联合概率密度函数 $f_{r\theta\varphi}$ ：

$$f_{r\theta\varphi} = f_r f_{\theta} f_{\varphi} \quad (8)$$

其中： $f_r = N(r, \sigma_r^2)$ ， $f_{\theta} = n(\theta, \sigma_{\theta}^2)$ 。

2 基于蒙特卡罗的坐标变换方法

坐标变换方程：坐标变换过程中主要涉及的坐标系统有：地理坐标系 BLH、地心坐标系 ECF、IRST 直角坐标 ENU 系和 IRST 球坐标系 RAE，这 4 种坐标系的定义分别如下：

1) 地理坐标系 (BLH, Latitude Longitude Height Coordinate System): BLH 基本平面为大地参考椭球面。大地纬度 B 为通过赤道面与参考椭球面的法线的夹角，由赤道面为参考，法线垂直向北为正，向南为负；本初子午面向东为大地经度 L ；大地高 H 为位置点沿法线到参考椭球面

的距离，从参考椭球面起计量，向外为正，向内为负。

2) 地心坐标系 (ECF, Earth-Centered Fixed Coordinate System): ECF 是以地球质心为原点建立的空间直角坐标系，假设地球为一个标准椭球体，以地球质心（总椭球的几何中心）为原点，X 轴与首子午面与赤道面的交线重合，Z 轴指向北极的地球旋转轴，基本平面与 Z 轴垂直，Y 轴与 X 轴、Z 轴构成右手系。

3) IRST 直角坐标系 (ENU, Earth-North-Up Coordinate System): 以 IRST 所在位置为 ENU 的坐标原点，基本平面为与当地地平面平行的平面，X 轴在基本平面内指向正东，Y 轴指向正北，Z 轴与基本平面垂直向上。

4) IRST 球坐标系 (RAE, Range-Azimuth-Elevation Coordinate System): 对应于 IRST 观测直角坐标系 ENU， r 为目标到 IRST 原点 O 的距离，方位角 θ 为由 Y 轴顺时针量至目标位置矢量在基本平面内的投影，即顺时针方向为正，目标位置矢量与基本平面的夹角设为仰角 φ ，取向上为正。

当对二坐标预警雷达的指示信息进行坐标变换时，涉及到多次坐标系的互相转换，其转换流程如图 4 所示。

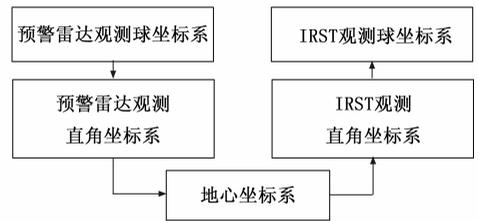


图 4 坐标变换示意图

其主要涉及到 3 种坐标系的互相转换：

1) 雷达观测直角坐标系和 IRST 测量球坐标系的互相转换。目标在 IRST 测量球坐标系中的坐标为 $[r, \theta, \varphi]$ ，在雷达观测直角坐标系中的坐标为 $[X_{\text{ENU}}, Y_{\text{ENU}}, Z_{\text{ENU}}]$ ，则其互相转换公式如下：

$$\text{RAE} \rightarrow \text{ENU}: \begin{cases} X_{\text{ENU}} = r \cos \theta \sin \varphi \\ Y_{\text{ENU}} = r \cos \theta \cos \varphi \\ Z_{\text{ENU}} = r \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ENU} \rightarrow \text{RAE}: \begin{cases} r = \sqrt{X_{\text{ENU}}^2 + Y_{\text{ENU}}^2 + Z_{\text{ENU}}^2} \\ \theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_{\text{ENU}}}{Y_{\text{ENU}}} \right) \\ \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{\text{ENU}}}{\sqrt{X_{\text{ENU}}^2 + Y_{\text{ENU}}^2}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

2) 地心坐标系和雷达观测直角坐标系的互相转换。已知雷达天线的地理坐标为 $[L, B, H]$ ，其中 L 为经度， B 为纬度， H 为高度，地心坐标为 $[X_o, Y_o, Z_o]$ 。目标在 ENU 中的坐标为 $[X_{\text{ENU}}, Y_{\text{ENU}}, Z_{\text{ENU}}]$ ，在 ECF 中的坐标为 $[X_{\text{ECF}}, Y_{\text{ECF}}, Z_{\text{ECF}}]$ ，则其互相转换公式如下：

$$\text{ENU} \rightarrow \text{ECF}: \begin{bmatrix} X_{\text{ECF}} \\ Y_{\text{ECF}} \\ Z_{\text{ECF}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} X_{\text{ENU}} \\ Y_{\text{ENU}} \\ Z_{\text{ENU}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{ECF} \rightarrow \text{ENU}: \begin{bmatrix} X_{\text{ENU}} \\ Y_{\text{ENU}} \\ Z_{\text{ENU}} \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} X_{\text{ECF}} \\ Y_{\text{ECF}} \\ Z_{\text{ECF}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: M 为预警雷达观测直角坐标系到地心坐标系之间的旋转变换矩阵,

$$M = \begin{bmatrix} \sin B & -\cos B \sin L & \cos B \cos L \\ \cos B & -\sin B \sin L & -\sin B \cos L \\ 0 & \cos L & \sin L \end{bmatrix} \quad (13)$$

3) 地理坐标系和地心坐标系的互相转换。地理坐标系中雷达天线的坐标为 $[L, B, H]$, 地心坐标系中雷达天线的坐标为 $[X_o, Y_o, Z_o]$, 则其互相转换公式如下:

$$\text{BLH} \rightarrow \text{ECF}: \begin{cases} X_o = (N_e + H) \cos L \cos B \\ Y_o = (N_e + H) \sin L \cos B \\ Z_o = [N_e(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (14)$$

其中: a, b 为地球的长半轴和短半轴, 地球偏心率 $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$, 雷达天线所在的卯西圈半径为 $N_e = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$ 。

ECF \rightarrow BLH: 地心坐标转换成地理坐标采用迭代算法实现, 步骤如下:

- 1) 迭代初始化, $i=0, Z_i = -e^2 Z_{\text{radar}}$;
- 2) 判断 Z_i 是否满足迭代收敛条件, 若不是, 进入步骤 3); 若是, 进入步骤 5);
- 3) 令 $\Delta Z = Z_{\text{radar}} - Z_i$, 计算:

$$Z_{i+1} = -N'_e e^2 \sin B \quad (15)$$

其中:

$$B' = \arcsin \frac{\Delta Z}{\sqrt{X_{\text{radar}}^2 + Y_{\text{radar}}^2 + Z_{\text{radar}}^2}}, \quad (16)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq B' \leq \frac{\pi}{2}$$

$$N'_e = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B'}} \quad (17)$$

- 4) $i=i+1$, 回到步骤 2);
- 5) 计算得到地理坐标为:

$$\begin{cases} B = B' \\ L = \arctan\left(\frac{Y_o}{X_o}\right) \\ H = \sqrt{X_o^2 + Y_o^2 + Z_o^2} - N'_e \end{cases} \quad (18)$$

其中: B', N'_e 可分别由式 (16) 和 (17) 计算得到。

传感器对目标的位置测量信息往往是不完整的, 尤其是被动传感器, 信息缺失比较严重, 通常不支持严格意义上的坐标变换。以下仍以两坐标雷达指示信息为例, 其观测信息要转换到其它传感器的观测坐标系, 传统指示交接问题中一般假设指示信息已经转换到了 IRST 的坐标系中, 然而目标在 IRST 的坐标系中的概率分布函数难以描述, 并且涉及到俯仰角上的缺失和坐标转换中的非线性运算, 故提出 Monte Carlo 采样法来解决该问题。

Monte Carlo 采样基本原理: 对一个概率密度函数 $p(x)$, 根据伯努利大数定理及正态随机变量的失效概率和可靠度指标等特征, 可近似地通过基于其采样的 $N \gg 1$ 个设有统计独立的随机采样点 $\{x^i \sim p(x); i=1, 2, \dots, N\}$ 表述。即:

$$p(x) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x - x^i) \quad (19)$$

其中: $\delta(g)$ 表示狄拉克 δ 函数。

若 $p(x)$ 难以直接采样, 如指示信息中定义的俯仰角概率密度函数 $f_\varphi(g)$, 需要定义与 $p(x)$ 相似且容易计算的函数 $q(x)$ 来作为表达先验信息的重要度密度函数, 然后通过对 $q(x)$ 进行采样得到采样点 x^i , 即 $\{x^i \sim q(x); i=1, 2, \dots, N\}$, 此时概率密度函数可表示为:

$$p(x) \approx \sum_{i=1}^N \omega^i \delta(x - x^i) \quad (20)$$

其中: ω^i 为第 i 个采样点的归一化权重, 其计算式为:

$$\omega^i \propto \frac{p(x^i)}{q(x^i)} \quad (21)$$

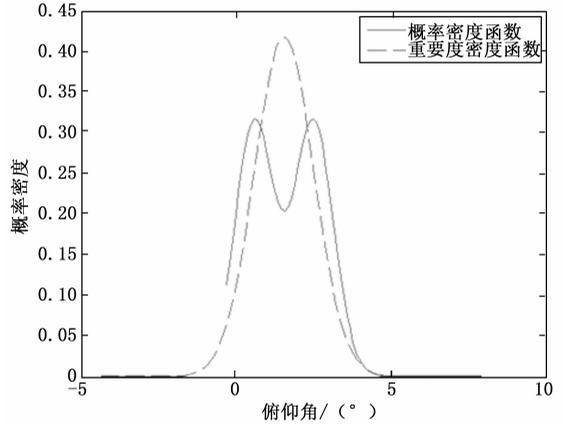


图 5 概率密度和重要度密度函数

可以通过上述 Monte Carlo 采法对雷达指示信息中的距离、方位和俯仰联合概率密度函数进行采样, 由于雷达指示信息中定义的俯仰角概率密度函数 $f_\varphi(g)$ 无法直接进行采样, 可将其看成要度密度函数等于 $(\varphi_1 + \varphi_1) / 2$ 的正太分布, 用 $q_\varphi(g)$ 来表示。在距离和水平上满足公式 (6), 可对其直接进行采样。

综上所述, 目标联合概率密度采样具体操作伪代码如下所示:

$$\{[r^i, \theta^i, \varphi_i], \omega^i\}_{i=1}^K \text{ 采样}(f_{r\theta\varphi}) \quad (24)$$

• FOR $i=1: N$

采样距离随机点: $r^i \sim f_r$

采样水平随机点: $\theta^i \sim f_\theta$

采样俯仰等效函数随机点: $\varphi^i \sim q_\varphi$

计算采样点权重:

$$\tilde{\omega}^i = \frac{f_\varphi(\varphi^i)}{q(\varphi^i)} \quad (25)$$

• END FOR

• 计算累积权重和:

$$t = \text{SUM}[\{\tilde{w}^i\}_{i=1}^N] \quad (26)$$

• FOR $i=1: N$

权重归一化处理:

$$w^i = t^{-1} \tilde{w}^i \quad (27)$$

• END FOR

经过采样处理后,可以有效避免原函数在坐标变换中涉及的非线性变换带来大量复杂的计算工作,便于计算机处理,注意到采样点含有距离、方位和俯仰信息,按照坐标变换方程即能转换到IRST坐标系对应位置。

$$[\{[r^i, \theta^i, \varphi^i], w^i\}_{i=1}^N] \rightarrow \text{坐标转换} [\{[\bar{r}^i, \bar{\theta}^i, \bar{\varphi}^i], w^i\}_{i=1}^N] \quad (27)$$

当 $N \gg 1$ 时, $\{[\bar{r}^i, \bar{\theta}^i, \bar{\varphi}^i], w^i\}_{i=1}^N$ 中的采样点依据伯努利大数定理,可近似为IRST坐标系中目标的联合概率密度函数。

传感器搜索空域优化模型:采样点变换到IRST的坐标系后,落入各个搜索视域 $\{\Omega_j\}_{j=1}^M$ 之内。如图 6 所示,其中假设IRST视域的宽度为 $5^\circ \times 5^\circ$ 。

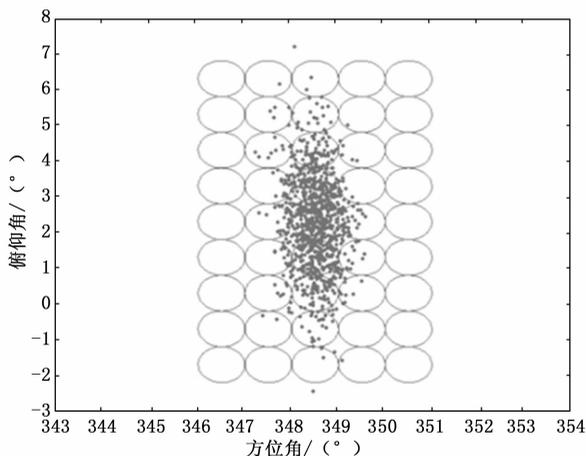


图 6 IRST 搜索视域

如图 6 所示,将雷达坐标中的采样点转换到IRST坐标系中后,可以根据每个视域上落入的采样点定义其视域权重:

$$W_j = \sum_{[r^i, \theta^i, \varphi^i] \in \Omega_j} w^i \quad (28)$$

传统的目标指示交接,一般将接收传感器的扫描方式假定为电扫描,如三坐标相控阵雷达。这种扫描方式可以在不相邻的波位之间实现跨越扫描,而不需要考虑扫描波束移动中的连续性。但是,现有的光电传感器均为机械扫描,其伺服系统只能支持顺序扫描方式。此时,采用相控阵雷达的波位编排方式,显然是不合适的。所以本文根据IRST实际应用环境,设计了一种基于八邻域择优的视域编排方法,解决顺序扫描传感器的视域编排问题。

为了避免IRST在失败的指示交接中浪费大量时间,规定指示交接具有时效性 T_0 ,IRST在每个视场上驻留时间为

t_0 ,可推算出最大搜索视域 $N = T_0/t_0$ 。

在指示信息引导下,IRST一般只需在一个较小空域内搜索目标,不必进行全空域搜索。确定搜索空域大小时需保证发现目标的概率大于一定的门限值 P_0 。IRST首先根据视域权重大小进行排序,选取权重最大的视域位置设为 α_1 进行优先搜索,在并其 8 个邻域视域 b_1-i_1 中根据搜索视域权重按照从大到小对各个视域进行排序,选择邻域中视域权重最大的视域位置 α_2 作为新的搜索中心点,直到搜索第 k 个视域 α_k ,此时若 $k=N$,无论此时视域权重是否达到门限值 P_0 ,均停止搜索并判定此次指示交接失败。此时若 $k \leq N$,且搜索视域权重大于等于门限值 P_0 ,则证明指示交接成功。

$$\sum_{j=1}^k W_j W_j > P_0, \sum_{j=1}^{k-1} W_j > P_0 \quad (29)$$

$$W_{1'} \geq W_{2'} \geq L \geq W_M$$

根据最优搜索理论,八邻域视域编排按照当前视域相邻的 8 个视域权重大小进行下一步连续视域的搜索选择。这种搜索方法避免了把搜索时间浪费在权重较小的视域上,提升了指示交接的时效性,并且在搜索中会根据指示信息的变化调整搜索空域,当指示信息模糊时,可以动态增大搜索空域的大小并切换搜索方向。

在采样点通过 Monte Carlo 采样法落入IRST坐标系中,并根据指示信息确定搜索空域,设定搜索门限后,IRST搜索视域的编排流程如图 7 所示。

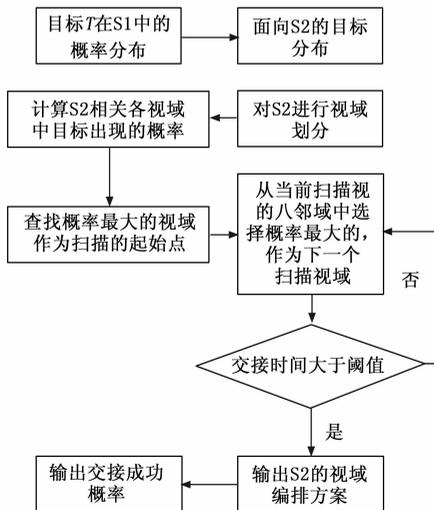


图 7 机械扫描视域编排流程图

3 实验结果与分析

本文设定了两个试验来验证文中提出方法的有效性。

试验一:三坐标预警雷达和IRST指示交接试验。

假设搜索空域发现概率门限为 0.9,三坐标预警雷达的经度、维度和高度分别为 $[112.928^\circ, 28.188^\circ, 692 \text{ m}]$,测距误差 100 m、方位误差和俯仰误差均为 1.2° 。IRST的经度、维度和高度分别为 $[112.652^\circ, 28.3^\circ, 449 \text{ m}]$,测距误差 100 m、方位误差和俯仰误差均为 0.2° 误差均满足互相独立且均值为零的高斯分布,机械伺服视域切换速度

为 1 ms、视域大小为 $5^\circ \times 5^\circ$ 。对联合概率密度函数采样 50 000 点, 此时由于三坐标雷达对 IRST 的指示交接不涉及先验信息, 故距离、方位和俯仰可认为服从均匀分布均可直接采样, 但是坐标变换中由于涉及非线性变换, 落入 IRST 中的图形并非规则的几何图形, 若采用传统方法如图 8 所示, 需要 16 个视域才能达到 0.9 的门限要求, 此时如果设定做大视域数 $N=15$ 的话很有可能导致交接失败, 然而采用八邻域搜索视域编排如图 9, 搜索视域按其邻域权重 (即视域内采样点个数) 来进行视域编排, 只需 7 次即可满足要求, 在八邻域搜索视域编排的影响下, IRST 很少将时间停靠在重较小的视域上, 有效提升了搜索效率。

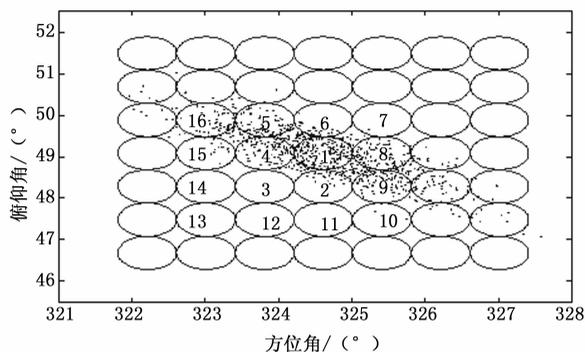


图 8 三坐标传统方法视域编排

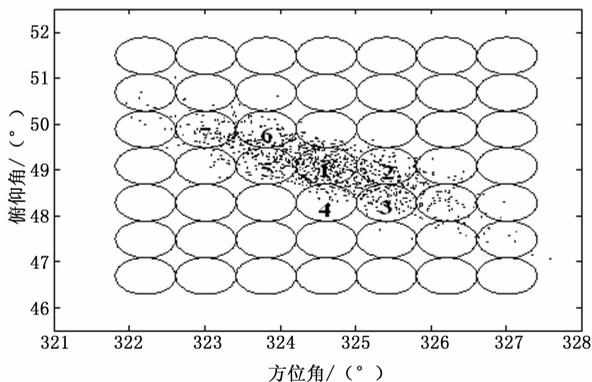


图 9 三坐标八邻域法搜索视域编排

为了对比八邻域方法和传统方法性能, 对目标位置进行 132 次模拟, 得出本文方法和传统方法耗时统计特性和性能曲线, 由图可以看出相对于传统方式, 针对光电伺服的八邻域搜索方法可以大幅提升搜索效率, 在达到 0.9 发现概率门限条件下, 平均性能提升 26.32%。

表 1 给出了两种方法各自的性能。使用传统方法, 想要达到 0.9 的概率门限所需要的平均时间为 16.95。而使用本文方法可以有效缩短探测时间为 12.31。

表 1 三坐标先验条件下性能比较

搜索方法	平均发现时间	性能提升占比
本文方法	12.31	26.32%
传统方法	16.95	

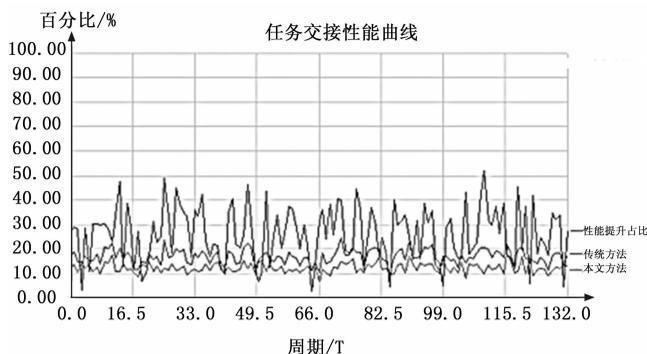


图 10 三坐标任务交界性能曲线

本文方法	12.31	26.32%
传统方法	16.95	

试验一表明在三坐标指示信息下, 本文所提出方法较传统方法在效率上有一定提升。

试验二: 两坐标预警雷达和 IRST 的指示交接问题。

假设搜索空域发现概率门限仍为 0.9, 二坐标预警雷达的经度、维度和高度分别为 $[112.928^\circ, 28.188^\circ, 692 \text{ m}]$, 测距误差 100 m、方位误差和俯仰误差均为 1.2° 。IRST 的经度、维度和高度分别为 $[112.652^\circ, 28.3^\circ, 449 \text{ m}]$, 测距误差 100 m、方位误差和俯仰误差均为 0.2° 、机械伺服视域切换速度为 1 ms、视域大小为 $5^\circ \times 5^\circ$, 误差均满足互相独立且均值为零的高斯分布。在二坐标引导 IRST 中需考虑先验信息。对联合概率密度函数采样 50 000 点, 采样点经过坐标变换后主要集中在先验信息的邻域内, 搜索视域按其邻域权重 (即视域内采样点个数) 作为排序准则, 为使八邻域的视域编排以及搜索路径清晰, 采用模拟软件模拟出本文方法的视域编排和搜索线路, 最后得到搜索空域和视域编排顺序如图 11 所示, 图中①号区域为权重最大的目标起始搜索点, ②号区域代表目标所在真实位置, 图中黑色路线代表八邻域视域编排顺序。由于三坐标预警雷达提供交接的指引信息, 在视域权重影响下, IRST 用八邻域搜索算法使目标周围搜索的视域数要高于其他非

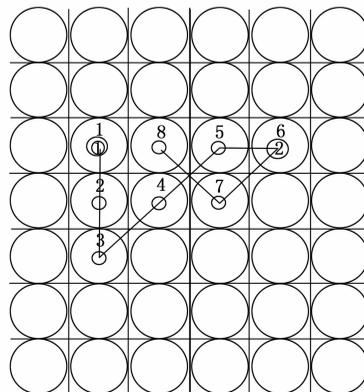


图 11 两坐标指示搜索空域和视域编排

目标区域。

对目标位置进行 132 次模拟，得出本文方法和传统方法耗时统计特性和性能曲线，在缺少俯仰信息的条件下，由图 12 可以看出相对于传统方式，八邻域搜索方法可以大幅提升搜索效率，在达到 0.9 发现概率门限条件下，平均性能提升 54.04%。

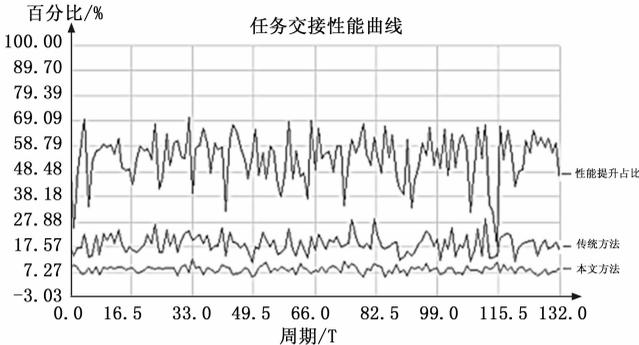


图 12 二坐标任务交界性能曲线

对实验二进行 132 次模拟仿真，得出传统方法和八邻域搜索法平均耗时数据，如表 2 所示，使用传统方法想要达到 0.9 的概率门限所需要的平均时间为 18.83。而使用本文方法可以有效缩短探测时间为 8.43。

表 2 二坐标不同方法性能比较

搜索方法	平均发现时间	性能提升占比/%
本文方法	8.43	54.04
传统方法	18.83	

在没有先验信息支撑的条件下，传统方法默认为俯仰信息在空域范围内服从均匀分布，保持其他参数不变，在相同条件下模拟 132 次，得到视域编排及路径选择图、交接耗时性能曲线、任务交界性能曲线如图 13 所示。

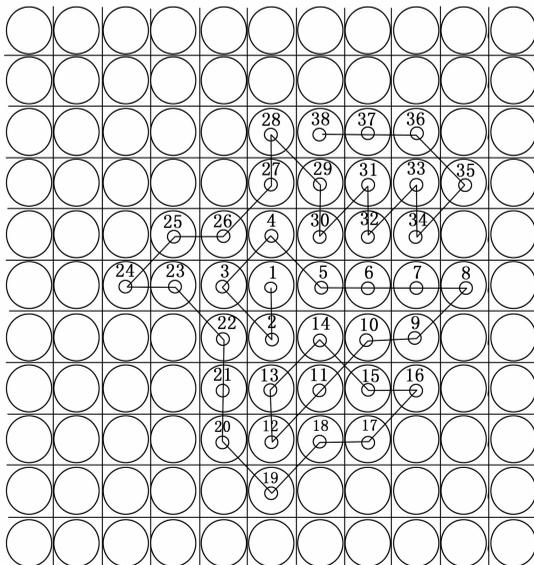


图 13 三坐标指示搜索空域与视域编排

由于缺少先验信息的指示，搜索指示信息会减少，不

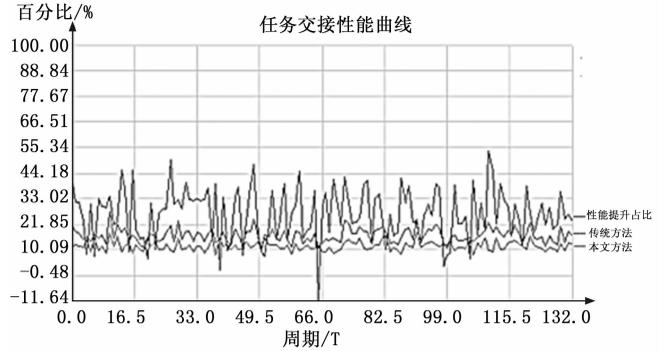


图 14 无先验二坐标任务交界性能曲线

可避免的会增大搜索空域，如图 13 所示，在搜索效率下降的情况下，搜索了大量空域，在一定视域数内仍未搜索到目标，为了避免浪费大量时间，判定此次搜索失败。

将任务交界性能曲线结果转化为柱状图，其平均耗时及性能提升比例如图 15 所示。

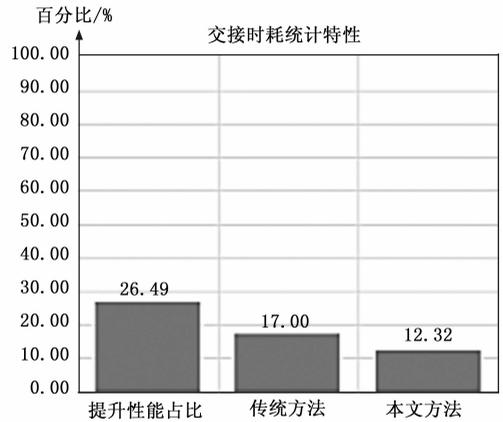


图 15 无先验二坐标交接耗时统计特性

表 3 二坐标有无先验条件性能比较

有无先验	平均发现时间	性能提升占比/%
包含先验	8.43	46.14
不含先验	12.32	

由上面结果对比分析，在没有先验信息的条件下，搜索路径开始变多，要达到 0.9 的检测概率门限条件下，我们需要搜索更多的视域，平均耗时同时大量增加。

试验二表明，在两坐标指示信息下，在先验信息的支撑下，可以有效缩短搜索搜索范围，同时利用八邻域方法，缩短了搜索时间，对比传统的搜索方法，效率大大提升。

4 结束语

在多传感器协作模式中，指示交接是很重要的一个环节，合适的指示交接算法能有效提升传感系统发现感兴趣目标的性能。本文以陆战场无人机防御作战为背景，针对两种不同坐标系下指示交接过程展开了研究，主要的研究成果包括：

针对多传感器融合技术中雷达和IRST的指示交接问题

进行了研究, 弥补了IRST缺少自主搜索能力的短板, 有重大战略以及实际应用价值。针对异地部署的雷达和IRST, 首先根据雷达所处的环境以及目标的运动规律建立了目标模型, 给出了一定的先验知识, 之后利用Monte Carlo采样原理, 将计算机难以处理的函数非线性运算转换成计算机可编程的点到点的坐标转换, 解决了指示信息误差难以描述的问题。随后通过计算目标在IRST各视域上出现的概率, 确定了IRST搜索空域大小和视域编排顺序。设计了一种专门针对机械伺服的传感器的搜索模式, 可以有效提升搜索效率, 并开发了相关模拟软件得以支撑结果。

随后通过仿真三坐标雷达和IRST的指示交接, 二坐标雷达在有无先验信息的条件下与IRST进行指示交接。实验结果表明在先验信息和八邻域搜索路径的支撑下, 可以有效提升搜索效率, 降低指示交接容错比。

最后需要强调的是本文只对雷达和IRST的指示交接算法进行了一定研究, 但在多传感器融合领域, 不同的传感器之间的指示交接问题问题仍然可用本文方法进行建模和使用。

参考文献:

- [1] 郝欣. 基于异类传感器的目标联合定位技术 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [2] 朱森良, 杨建刚, 吴春明. 自主式智能系统. [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [3] 赵建印, 刘芳. 海上编队双舰防空队形部署优化研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (6): 865-869.

(上接第 113 页)

口径火炮内径的高精度测量, 其主要技术要点是: 1) 利用精密机械定心装置将测量装置支撑于火炮身管轴线上; 2) 利用特殊设计的机械结构保证内径测量触针始终紧密接触于一对膛线或阴膛线之间, 保证测量结果的正确性和测量精度; 3) 利用特殊设计的机构装置将火炮身管阳线内径或阴线内径的变化转换为位移传感器输出电压的变化; 4) 利用模-数转换和数据采集电路实现火炮身管内径的数字化测量和显示。

由于采用特殊设计的机械结构将火炮身管膛线的内径变化转变为高精度位移传感器输出电压的变化, 使用时不受身管长度的限制, 一次标定校准后, 可重复测量, 通过计算机控制可实时显示测量结果。与现有的火炮身管内径测量技术相比, 具有测量速度快、精度高、重复性好、数字化、效率高、便于实现自动化和数字化管理等优点。其不但特别适用于 25~37 mm 小口径火炮的内径测量, 而且也适用于大口径火炮身管的内径测量, 具有极大推广应用价值。目前, 采用该技术研制成功的“某型小口径自动火炮内径测量系统”以及相应产品已广泛应用于火炮生产、定型试验和部队维修保障检测中。

参考文献:

- [1] 毛明, 李振平, 等. 坦克装甲车辆对试验测试技术的需求

- [4] Kastella K. Discrimination gain to optimize detection and classification [M]. IEEE Press, 1997.
- [5] 刘先省, 申石磊. 基于信息熵的一种传感器管理算法 [J]. 电子学报, 2000, 28 (9): 39-41.
- [6] Benaskeur A, Irandoust H. Sensor management for tactical surveillance operations [R]. North Quebec City: Defence R&D Canada, 2007: 37-38.
- [7] 周颖, 王雪松, 冯德军, 等. 基于弹道预报的相控阵雷达监视空域研究 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28 (7): 1209-1214.
- [8] 王国宏, 何友, 毛士艺. IRST对3D雷达引导性能分析 [J]. 电子学报, 2002, 30 (12): 1-4.
- [9] 彭锐晖, 王树宗, 吕永胜, 等. 异地配置下ESM对2D雷达的引导分析 [J]. 现代雷达, 2009, 31 (1): 13-17.
- [10] 张华睿, 杨宏文, 胡卫东, 等. 警戒雷达与跟踪雷达的目标指示交接方法 [J]. 现代雷达, 2011, 33 (9): 19-24.
- [11] 杜俊吟. 机动目标跟踪技术的研究与可视化仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [12] 张华睿, 杨宏文, 郁文贤. 两坐标雷达融合定位算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (1): 75-79.
- [13] Xiong N, Svensson P. Sensor Management for Information Fusion: A Review [J]. NasaSti/recon Technical Report N, 2001, 3.
- [14] 卢建斌. 相控阵雷达资源优化管理的理论与方法 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [15] 吴建民, 牟之英. 智能化多传感器管理系统的设计和仿真 [J]. 航空电子技术, 2006, 37 (4): 27-32.
- [1] 郝欣. 基于异类传感器的目标联合定位技术 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [2] 朱森良, 杨建刚, 吴春明. 自主式智能系统. [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [3] 赵建印, 刘芳. 海上编队双舰防空队形部署优化研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (6): 865-869.
- [1] 计算机测量与控制, 2016, 24 (3).
- [2] 马宏, 潘毓学, 等. 火炮膛膛质量检测技术研究 [J]. 兵工学报, 1996, 5 (2).
- [3] 郑慕桥, 冯崇植, 蓝祖佑. 坦克装甲车辆 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- [4] 刘学工, 徐保荣, 等. 坦克装甲车辆试验 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015.
- [5] 林勇, 宋征, 等. Visual C++应用指南 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999. 03.
- [6] 王桂荣, 李显芝, 等. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [7] 任青剑. 精密机械制造工艺设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- [8] 刘钧, 高明. 光学设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [9] 薛迎成, 何坚强. 工控机及组态控制技术原理与应用 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [10] 贾民平, 张洪亭. 测试技术 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. 05.
- [11] 严钟豪, 谭祖根. 非电量电测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [12] 严普强, 黄长艺. 机械工程测试技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.