

doi: 10.7690/bgzdh.2015.08.017

# “红外卫星-地基雷达”航迹融合算法的实现及精度分析

苑 征

(中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

**摘要:** 为提高对助推段弹道导弹轨迹跟踪的精度, 设计一种“红外卫星-地基雷达”航迹融合算法。通过建立传感器量测和航迹融合的仿真模型, 结合凸组合融合法和协方差交集法, 分别实现了天波超视距雷达和红外预警卫星配准后航迹数据的融合, 以及天波超视距雷达和红外预警卫星配准后航迹数据的融合。通过仿真证明了在进行航迹融合后的跟踪结果较 SBIRS 单独的跟踪结果精度更优。设计的凸组合融合法和协方差交集法的跟踪结果精度可以满足针对弹道导弹的早期预警需求。

**关键词:** 红外预警卫星; 天波超视距雷达; UKF 滤波; 航迹融合

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Implementation and Accuracy Analysis of Track Fusion Algorithm for “Infrared Satellite and Ground-based Radar”

Yuan Zheng

(China Academy of Electronics & Information Technology, CETC, Beijing 100041, China)

**Abstract:** In order to improve the trajectory tracking accuracy of the ballistic missile trajectory, a new method of track fusion for “infrared-satellite & ground-based radar” is designed. Through sensor measurement and track fusion based simulation model, combined with the convex combination fusion algorithm and covariance intersection method, respectively, to achieve the realization of sky wave over the horizon radar and infrared early warning satellite registration after the track data fusion, as well as sky wave over the horizon radar and infrared early warning satellite with quasi track data fusion. The results of the simulation show that the tracking results are better than the SBIRS tracking results. The results of the convex combination method and the covariance intersection method can meet the early warning of ballistic missile.

**Keywords:** infrared early-warning satellite; OTHR; UKF filter; track fusion

### 0 引言

红外预警卫星和天波超视距雷达是美俄等国预警体系中较早发现和识别弹道导弹威胁目标的预警手段, 是预警体系建设必不可少的重要环节, 是夺取未来战争制天权、制信息权的必备装备。

笔者通过开展红外预警卫星与天波超视距雷达等地基手段协同探测的情报生成关系和信息应用机制研究, 开发红外预警卫星与天波超视距雷达等地基手段对共视区内助推段弹道导弹探测结果的多源信息融合方法, 提升弹道估计的质量。最终为预警

体系及时预报、跟踪和识别对国家安全构成威胁的弹道导弹目标提供信息支撑。

### 1 传感器量测建模仿真

Matlab 是目前国际上领先的主流仿真软件。笔者利用 Matlab 建立了弹道导弹目标运动模型、天波超视距雷达量测模型、红外预警卫星量测模型、天波超视距雷达和红外预警卫星集中式融合跟踪方法, 并基于模型和算法针对典型场景对天波超视距雷达和红外预警卫星的融合性能进行仿真验证。红外卫星-地基雷达”航迹融合算法原理如图 1 所示。

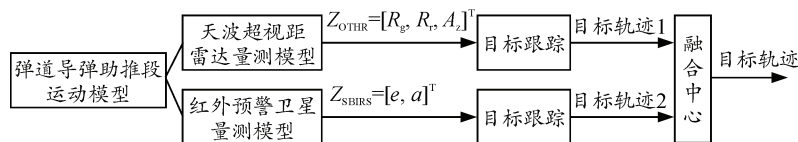


图 1 “红外卫星-地基雷达”航迹融合算法原理

在上述分布式融合结构中, 首先需要天波超视距雷达和红外预警卫星分别对各自的量测信息

收稿日期: 2015-03-22; 修回日期: 2015-05-15  
作者简介: 苑 征(1983—), 男, 河北人, 硕士, 从事系统仿真建模研究。

采用 UKF 进行非线性滤波处理，然后将跟踪出的航迹送至融合中心进行融合。下面给出 UKF 的计算步骤<sup>[1]</sup>。

1) 导弹初始状态为  $x_0$ ，统计特性  $E[x_0] = \hat{x}_0$ ，初始方差

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]$$

2) 根据状态估计值  $\hat{x}$  和协方差阵  $P$  计算 sigma 点  $\{\chi_i\}_{i=0,1,\dots,2n}$ ：

$$\chi_0 = \hat{x}, W_0 = \frac{\lambda}{n + \lambda}, (i = 0)$$

$$\chi_i = \hat{x} + (\sqrt{(n + \lambda)P})_i, i = (1, 2, \dots, n)$$

$$\chi_i = \hat{x} - (\sqrt{(n + \lambda)P})_i, i = (n + 1, n + 2, \dots, 2n)$$

并确定均值的权重系数  $W_m^i$  和协方差的权重系数  $W_c^i$ ：

$$W_m^i = \begin{cases} \frac{\lambda}{n + \lambda}, & i = 0 \\ \frac{1}{2(n_x + k)}, & i \neq 0 \end{cases} \quad W_c^i = \begin{cases} \frac{\lambda}{n + \lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta), & (i = 0) \\ \frac{1}{2(n_x + k)}, & (i \neq 0) \end{cases}$$

式中  $\lambda = \alpha^2(n + k) - n$ ， $\alpha > 0$  是一个比例因子，它可以调节粒子的分布距离，降低高阶矩的影响，减小预测误差，一般取小的正值，如 0.01； $\beta \geq 0$  的作用是改变  $W_c^0$ ，调节  $\beta$  的数值可以提高方差的精度<sup>[2]</sup>；控制估计状态的峰值误差，对于正态分布，Julier 推荐取值为 2。 $k \geq 0$  可以确保方差阵为半正定，其具体数值没有严格规定。 $(\sqrt{(n + k)P})_i$  是矩阵  $(n + k)P$  均方根的第  $i$  行(列)。

3) 计算 sigma 点  $\{\chi_i\}_{i=0,1,\dots,2n}$  在导弹运动方程中的传播，并对更新后的 sigma 点加权求和得到状态的一步预测值  $\hat{x}_{k+1}^-$  和一步预测误差协方

差  $P_{x,k+1}^-$ 。

$$\chi_{k+1}^i = f(\chi_k^i) \quad i = 0, 1, \dots, 2n, \quad \hat{x}_{k+1}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_m^i \chi_{k+1}^i,$$

$$P_{x,k+1}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_c^i [\chi_{k+1}^i - \hat{x}_{k+1}^-][\chi_{k+1}^i - \hat{x}_{k+1}^-]^T + Q_k$$

4) 将一步预测的 sigma 点经量测方程后得到量测更新后的目标视线俯仰角和方位角构成的矢量观测值，加权求和得到量测更新值：

$$Z_{k+1}^i = h(\chi_{k+1}^i) \quad i = 0, 1, \dots, 2n, \quad \hat{z}_{k+1}^- = \sum_{i=0}^{2n} W_m^i Z_{k+1}^i$$

进一步得到量测协方差阵和状态与量测耦合协方差阵为：

$$P_{z,k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_c^i [Z_{k+1}^i - \hat{z}_{k+1}^-][Z_{k+1}^i - \hat{z}_{k+1}^-]^T + R_{k+1},$$

$$P_{xz,k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_c^i [\chi_{k+1}^i - \hat{x}_{k+1}^-][Z_{k+1}^i - \hat{z}_{k+1}^-]^T$$

4) 得到量测更新后的状态估计值和状态协方差阵。

滤波增益矩阵：

$$K_{k+1} = P_{xz,k+1} P_{z,k+1}^{-1}$$

量测更新后的状态估计值：

$$\hat{x}_{k+1}^+ = \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1} (z_{k+1} - \hat{z}_{k+1}^-)$$

状态协方差阵：

$$P_{x,k+1}^+ = P_{x,k+1}^- - K_{k+1} P_{z,k+1} K_{k+1}^T$$

根据上述方程，使用红外预警卫星和天波超视距雷达得到的量测数据：方位角、俯仰角、径向距、方位角、径向速率等，基于 UKF 滤波算法，可实现弹道导弹目标助推段跟踪。红外预警卫星和天波超视距雷达对导弹目标跟踪位置均方差如图 2 所示。

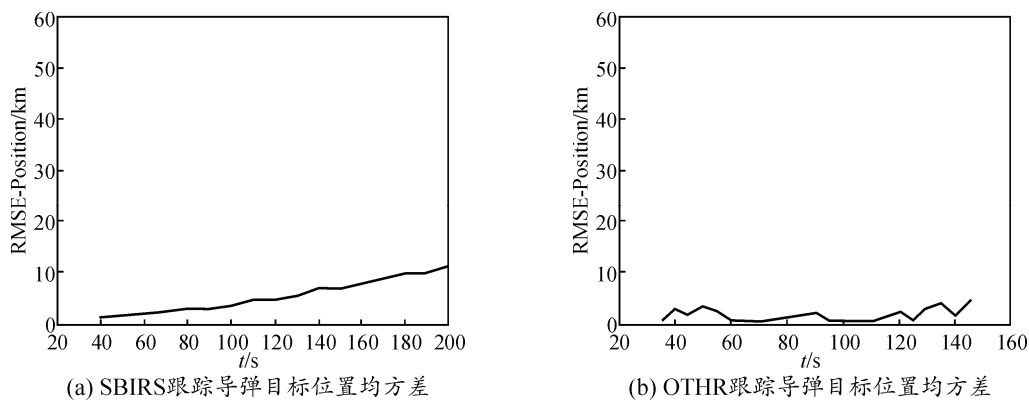


图 2 红外预警卫星和天波超视距雷达对导弹目标跟踪位置均方差

### 2 航迹融合建模仿真

由于天波超视距雷达和红外预警卫星的采样率存在差异，而融合的点迹必须是两型装备在同一时刻对于同一目标的估计值。因此，融合前利用节点内插法超视距雷达和红外卫星各自的航迹数据点对准到统一的时刻上，实现时间配准。

当航迹时间配准完成后，就可以进行目标的状态估计融合，估计每个航迹目标的真实位置、速度等。这其中有一个重要的问题就是如何使来自同一个目标的量目标信息融合为一体，并减少所提供目标信息的噪声值，这就是航迹融合。航迹融合是解决航迹求精，提高目标的跟踪精度的问题。

目前的航迹融合算法包括凸组合法，信息解耦法，最小线性方差估计，协方差交集法等，本文将采用 2 种航迹融合算法：凸组合航迹融合算法和协方差交集航迹融合算法。

### 3 凸组合融合法

凸组合融合法忽略局部航迹的互协方差，认为局部航迹之间是独立的，并且该算法不考虑航迹的先验信息<sup>[3]</sup>。算法流程如下：

在传感器航迹估计误差互不相关的假设下，R.Singer 提出了凸组合航迹融合算法。在局部航迹之间独立的情况下，该方法是不考虑系统航迹的先验信息的“最佳”线性组合。假设融合系统有 2 个传感器，其状态估计值分别为  $x_i$  和  $x_j$ ，估计协方差分别为  $P_i$  和  $P_j$ ，那么，融合之后的状态估计值

$$\hat{x} = P_j(P_i + P_j)x_i + P_i(P_i + P_j)x_j = P(P_i^{-1}\hat{x}_i + P_j^{-1}\hat{x}_j)$$

误差协方差  $P = P_i(P_i + P_j)^{-1}P_j = (P_i^{-1} + P_j^{-1})^{-1}$ ，如果融合系统是由  $n$  个传感器组成，很容易推广到一般形式：

$$\hat{x} = P(P_1^{-1}\hat{x}_1 + P_2^{-1}\hat{x}_2 + \dots + P_n^{-1}\hat{x}_n) = P \sum_{i=1}^n P_i^{-1}\hat{x}_i$$

每个传感器估计的权值  $W_k^i = PP_i^{-1}$ ，误差协方差为

$$P = (P_1^{-1} + P_2^{-1} + \dots + P_n^{-1})^{-1}$$

该方法实现简单。当误差估计相关时，该方法准最佳。当 2 个航迹都是传感器航迹且不存在过程噪声时，该方法最佳，与利用传感器观测直接融合有同样的效果。采用此方法时，传感器网络不应该有反馈。由于该算法实现简单，仅需要局部航迹

的估计和协方差信息，在实际系统中被广泛应用。

基于上述凸组合航迹融合算法，可实现天波超视距雷达和红外预警卫星配准后航迹数据的融合<sup>[4]</sup>。

### 4 协方差交集法

协方差交集法是另一种常用的航迹融合方法，避免了计算互协方差，不需要任何局部估计之间的相关性假设，给出航迹融合的保守下限，是一种鲁棒的方法<sup>[5]</sup>。协方差交集融合算法流程如下：

假设有 2 条信息，分别记为 A 和 B，将它们融合得到一个信息 C，用随机变量  $a$  和  $b$  分别表示 A 和 B，其协方差估计值为  $P_{aa}$  和  $P_{bb}$ ，因为实际情况是有测量误差和模型误差，所以

$$\tilde{a} \triangleq a - \bar{a}, \quad \tilde{b} \triangleq b - \bar{b}, \quad \tilde{P}_{aa} = E[\tilde{a}\tilde{a}^T],$$

$$\tilde{P}_{ab} = E[\tilde{a}\tilde{b}^T], \quad \tilde{P}_{bb} = E[\tilde{b}\tilde{b}^T]$$

交集表示的就是协方差的凸组合，其算法过程为：

$$P_{cc}^{-1} = wP_{aa}^{-1} + (1-w)P_{bb}^{-1},$$

$$P_{cc}^{-1}c = wP_{aa}^{-1}a + (1-w)P_{bb}^{-1}b$$

其中  $0 \leq w \leq 1$ ，自由参数  $w$  决定了分配给  $a$  和  $b$  的权值，根据不同的标准可以选择使用不同的  $w$  来优化改进方法，相对于  $w$  为凸的代价函数在  $0 \leq w \leq 1$  间内只有一个明确的最优值。

从协方差交集算法过程中可以看出：通过  $\{a, P_{aa}\}$ 、 $\{b, P_{bb}\}$ ，可以在不清楚状态值之间的相关度  $P_{ab}$  时，也能给出一个改进的预测值，所附加的唯一约束就是条件的一致性，即  $P_{aa} - \tilde{P}_{aa} \geq 0$ ， $P_{bb} - \tilde{P}_{bb} \geq 0$ 。

协方差交集算法是一个通用的估计改进算法，即使在不清楚预测值与观测值的相关度时，它也能给出一个改进的估计值<sup>[6]</sup>。由于协方差交集算法不需要计算局部稳态滤波误差互协方差阵，节约了计算时间和计算量，而且也能保证比较正确的滤波结果。该方法通过矩阵迹最小化获取权重，来处理未知相关性，计算简单，仅需要局部航迹的估计和协方差，因而得到广泛应用。

基于上述协方差交集航迹融合算法，可实现天波超视距雷达和红外预警卫星配准后航迹数据的融合。

## 5 仿真结果与分析

根据公开资料,笔者建立了包括一枚中程弹道导弹、一颗红外预警卫星、一座超视距雷达的仿真环境<sup>[7]</sup>。各仿真单元的具体参数如下:

中程弹道导弹:导弹射程 4 000 km,发射点位置 E140.5、N100 km,发射点高度 0 km,发射方向东北方 30°,助推段时间 200 s。

椭圆轨道红外预警卫星:测量位置 E82、N0,轨道高度 21 860 km,方位角测量误差 100  $\mu$ rad,

俯仰角误差 100  $\mu$ rad,采样周期 10 s,首点探测时间 30 s。

收发同置天波超视距雷达:地理位置 E76、N30,径向距测量误差 5 km,多普勒测量误差 0.001 km/s,方位角测量误差 0.003 rad,探测距离 4 000 km,采样周期 5 s,扫描范围正西 $\pm$ 60°,首点时间 30 s。

基于前文融合算法,在时间配准后将 2 条航迹融合为一条航迹。2 种融合算法的均方差见图 3 所示。

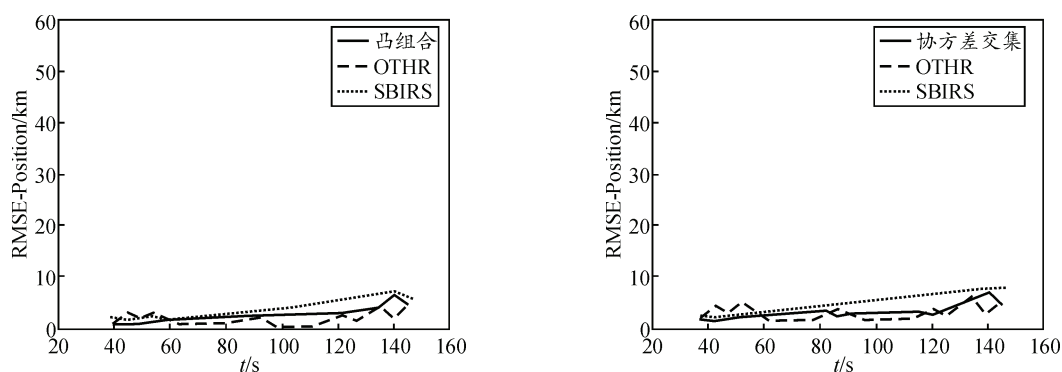


图3 凸组合和协方差算法的融合前后位置均方差

## 6 结论

由仿真结果对比图可见:在航迹融合后,2 种融合算法的结果较 SBIRS 单独的跟踪结果精度更优。但与 OTHR 跟踪结果相比,2 种融合算法的结果相对较差。这是由于 2 个传感器单独跟踪给出的航迹信息已经不包含原始量测信息,融合结果受限于 2 个传感器跟踪效果,容易受到误差较大的航迹影响。后续,笔者将开发基于 SBIRS 和 OTHR 原始量测信息的融合算法,进一步提高融合精度。

### 参考文献:

[1] 潘泉,杨峰,叶亮,等.一类非线性滤波器:UKF 综述[J].控制与决策,2005(5):12-16.

- [2] 严恭敏,严卫生,徐德民.简化 UKF 滤波在 SINS 大失准角初始对准中的应用[J].中国惯性技术学报,2008(3):22-27.
- [3] 刘卫东,刘洋,高立娥.基于凸组合和 Bar-Shalom-Campo 的航迹融合算法研究[J].计算机工程与应用,2014(2):54-61.
- [4] 王磊,房景仕,潘永强,等.某场面监视雷达结构总体设计[J].四川兵工学报,2014(7):6-8.
- [5] 邓自立,孙小君.多传感器分布式协方差信息融合 Kalman 滤波理论[J].科学技术与工程,2005(12):38-43.
- [6] 王君.多传感器目标跟踪中数据融合算法的研究[J].武汉理工大学,2009(11):17-24.
- [7] 赵锋.弹道导弹防御跟踪制导雷达探测技术研究[J].国防科学技术大学,2007(9):28-33.