

## 网络瞄准环境下异步航迹融合策略及融合算法研究

王琳<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 冯国强<sup>2</sup>, 于雷<sup>2</sup>, 杨海燕<sup>2</sup>

(1. 总参陆航研究所, 北京 101121; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 多个网络节点的异步航迹融合是实现网络瞄准作战方式的关键技术之一. 本文有效利用各网络节点的异步航迹信息, 提高瞄准的精度. 首先分析了网络瞄准环境下异步航迹融合的主要方式, 在此基础上结合工程实际, 提出了 3 种可适用于网络瞄准的异步航迹融合策略; 然后根据最优估计理论, 分别给出了不同策略下的异步融合算法与实现步骤; 最后通过仿真验证了所提出方法在解决异步航迹融合问题上的有效性, 并分析了不同航迹融合周期对系统融合性能的影响.

**关键词:** 网络瞄准; 异步航迹融合; 网络节点; 融合策略  
**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A

### Asynchronous track-fusion policy and fusion algorithm in networked targeting environment

WANG Lin<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, FENG Guo-qiang<sup>2</sup>, YU Lei<sup>2</sup>, YANG Hai-yan<sup>2</sup>

(1. Army Aviation of Institute, Beijing 101121, China;

2. The Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** Asynchronous track-fusion of multiple network-nodes is one of the key techniques in handling the networked targeting combat manners. Making the best use of asynchronous track-information from multiple nodes, we improve the precision of networked targeting. First, the major techniques for asynchronous fusion in the networked targeting environment are analyzed, from which we propose three different asynchronous fusion policies for networked targeting. Next, the asynchronous track-fusion algorithm and computation steps are developed according to the optimal estimation theory. Finally, the simulation experiments are performed, which validate the efficacy of the proposed methods in asynchronous track-fusion. The effect on fusion-performances from the fusion period is also analyzed.

**Key words:** networked targeting; asynchronous track-fusion; network node; fusion policy

### 1 引言(Introduction)

利用物理域内广泛分布的多传感器来跟踪和瞄准目标是网络化作战方式的主要特点. 作为适应网络中心战发展要求而开展的一项新技术, 网络瞄准(network targeting, NT)是一种在探测、指挥控制、信息处理传输与打击之间实现深层次互联的作战方式<sup>[1]</sup>. 在网络瞄准体系中, 地域分散的多个传感器协同工作, 生成精确的目标瞄准信息, 然后将信息直接发送给网络化武器, 武器在飞向目标的过程中, 瞄准信息不断更新, 确保对目标的精确打击. 网络瞄准正是利用广阔空间内的多种传感器和武器, 通过战术数据链形成“传感器-传感器、传感器-武器”之间的网络通信, 对短暂停留的机动或移动目标给予快速跟踪与精确打击.

多传感器航迹融合是实现网络瞄准的关键技术之一. 目前, 网络瞄准系统主要采用分布式结构进行

信息处理, 并假定各网络节点的航迹信息同步到达且没有通讯延时, 但实际上经常遇到的却是异步融合(asynchronous fusion)问题<sup>[2-3]</sup>. 这是因为网络瞄准系统所使用传感器的类型和工作方式各有不同, 且各网络节点分别具有不同的采样速率与处理周期<sup>[4]</sup>. 这些因素使得在一个系统融合周期内, 有的节点有多次航迹信息, 而有的节点可能只有一次航迹信息. 另外, 由于武器数据链存在不同程度的传输延时, 也使得多条航迹同步到达的假设难以保证. 因此, 网络瞄准需要考虑异步融合的问题.

关于异步航迹融合的研究已有不少成果. 常用的方法有内插外推、最小二乘法等<sup>[5]</sup>, 其中内插外推法是将高精度的测量数据向低精度的时间点内插以形成一系列等间隔的观测数据; 最小二乘法是将多次量测值融合成一个虚拟量测后再进行融合. 但是随着异步数据量的增加, 这些方法工程实现复杂, 而且

降低了系统的数据率, 同时状态的时间推算还会产生额外的误差, 因此算法的精度可能不是最优的, 并限制了其在实际中的应用。

为了有效提高异步融合算法的性能, 文献[6]采用最小二乘技术实现了光学传感器多个异步量测的融合, 使得融合后的有效量测与雷达量测同步, 最后进行同步量测的融合; 文献[7]提出了一种融合误差均方差矩阵的迹最小意义下的异步目标航迹融合算法; 文献[8]建立了一种带有全局反馈机制的最优异步递推航迹融合算法; 文献[9]提出了一种分布式异步预测融合方法, 用来处理一个融合周期内多个采用点的情形。上述方法在有效利用航迹信息和改善航迹融合质量方面做出了较大贡献, 但他们大多认为每个网络节点在系统一个融合周期内只有一个航迹文件, 因而缺乏对部分网络节点可能存在多个航迹文件的考虑, 这直接限制了上述方法在实际中的推广。此外, 工程应用不仅需要有良好的融合算法, 更要求根据作战实际选择合理的融合策略, 以权衡计算实时性和系统融合精度。针对这一问题, 本文提出了3种可适用于网络瞄准的异步航迹融合策略, 并给出了不同策略下异步航迹融合算法与实现步骤, 仿真结果显示了不同策略在处理异步融合问题上的性能。

## 2 网络瞄准下异步航迹融合策略(Asynchronous track fusion policy in networked targeting environment)

网络瞄准的目标信息由地域分散的传感器网络共同提供。这些传感器分布于陆、海、空、天等多个平台上, 通过数据融合技术迅速形成目标的瞄准信息。通常, 提供此类信息的传感器有卫星、预警机、侦察机、攻击飞机、舰艇、地面雷达等, 本文研究中

将它们都视为网络节点。

### 2.1 异步航迹融合问题描述(Asynchronous track fusion question description in NT)

网络瞄准环境下, 有 $n$ 个用于跟踪目标的网络节点, 每个节点对目标进行独立量测和信息处理, 然后将处理后的目标航迹发送给网络瞄准中心。

设融合中心最近一次更新系统航迹的时间为

$$t_{k-1} = (k-1)T,$$

简记 $k-1$ , 下一次更新系统航迹的时间为 $t_k = kT$ , 简记 $k$ , 则系统融合周期

$$T = [k-1, k].$$

研究中假设各网络节点的航迹处理周期不同; 各节点在系统一个融合周期内的航迹文件数也不相同。其中, 网络节点 $i$  ( $i = 1, \dots, n$ )的航迹信息发布周期为 $T_i$ , 它在系统融合周期 $T$ 内的航迹文件有 $\ell_i$ 个, 分别用 $x_i^1, \dots, x_i^{\ell_i}$ 表示。

异步融合问题就是研究如何利用所有网络节点的航迹信息估计出目标的最优状态。为简化描述, 来自相同网络节点的航迹文件在融合周期 $[k-1, k]$ 内仅表示一次。各局部航迹到达融合中心的时间分别为

$$t_{k-1} < k_1 < \dots < k_n < t_k.$$

基于网络瞄准的异步融合过程是: 首先由各网络节点利用自身处理单元产生局部航迹信息, 然后将其送到融合中心进行关联融合处理, 最后瞄准系统根据各节点的航迹信息进行融合估计。在实际工程应用中, 由于各网络节点之间地域分散, 网络瞄准系统主要采用分布式融合结构, 如图1所示。这种融合结构对资源需求相对较低且具有较好的可靠性和可扩展性。

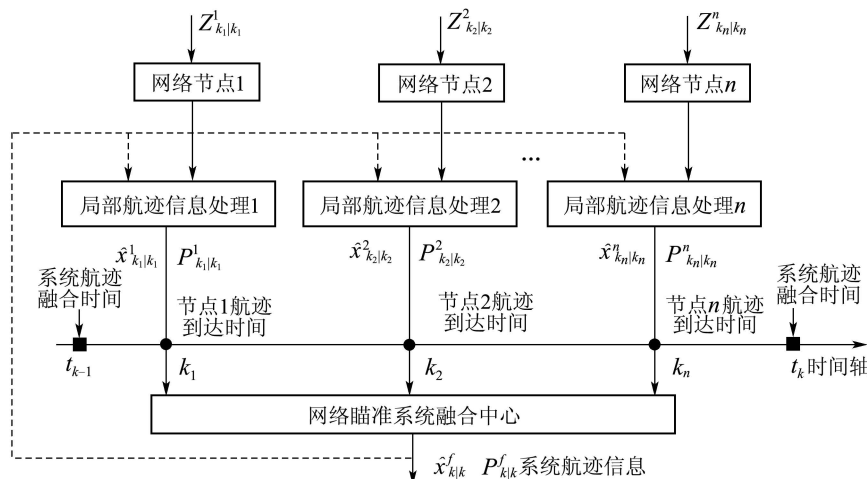


图 1 网络瞄准环境下异步航迹融合过程

Fig. 1 Asynchronous track fusion course in NT

## 2.2 异步航迹融合策略(Asynchronous track fusion policy in NT)

结合网络瞄准的工程实际,下面给出3种异步航迹融合策略:

### 1) 集中式异步航迹融合策略.

策略1的基本思想是:对融合周期内所有网络节点的航迹信息 $x_1^i, \dots, x_{\ell_i}^i (i = 1, \dots, n)$ 进行集中式融合.在该策略下,网络瞄准系统首先按照时间序列依次记录下各网络节点的航迹信息,然后利用航迹外推的方法将所有航迹信息递推到融合时刻 $k$ ,最后融合中心利用递推后航迹进行集中式融合.集中式异步航迹融合策略如图2所示,“□”表示系统航迹的融合时间.

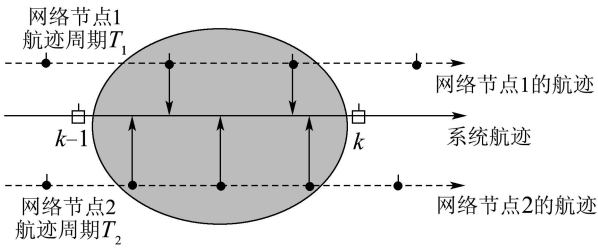


图2 集中式异步航迹融合策略

Fig. 2 Centralized asynchronous track fusion policy

### 2) 分布式异步航迹融合策略.

策略2的基本思想是:每个网络节点 $i (i = 1, \dots, n)$ 首先利用最小二乘算法将其在系统一个融合周期内的航迹信息 $x_1^i, \dots, x_{\ell_i}^i$ 进行时域融合,以此产生该节点在系统融合时刻 $k$ 的虚拟航迹,然后融合中心根据各节点的时域融合结果计算系统在时刻 $k$ 的全局航迹<sup>[9]</sup>,分布式异步航迹融合策略如图3所示.

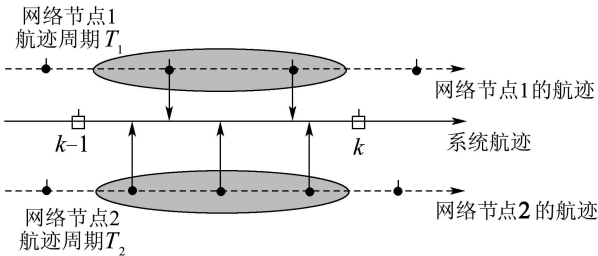


图3 分布式异步航迹融合策略

Fig. 3 Distributed asynchronous track fusion policy

策略2与策略1的区别在于,融合中心不仅需要按照时间序列记录下各时刻的局部航迹,而且还要记录这些航迹分别是来源于哪个网络节点.

### 3) 实时更新的异步航迹融合策略.

策略3的基本思想是:采用“先来先处理”的方式,依次将按照时间序列收到的局部航迹进行系统航迹融合.在该策略下,系统没有固定的融合周

期,融合时间由提供局部航迹的网络节点决定,实时更新异步航迹融合策略如图4所示

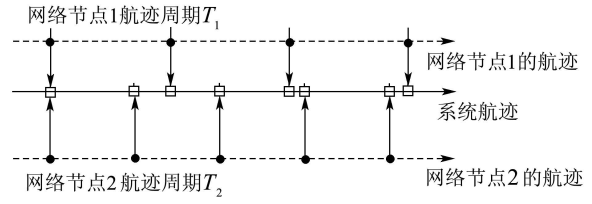


图4 实时更新的异步航迹融合策略

Fig. 4 Real time asynchronous track fusion policy

## 3 网络瞄准下异步航迹融合算法(Asynchronous track fusion algorithm in NT)

考虑如下线性离散时间动态系统<sup>[10]</sup>:

$$x_k = \Phi_{k|k-1}x_{k-1} + w_{k-1}, \quad (1)$$

其中:  $x_k, w_k \in \mathbb{R}^r$ ; 过程噪声 $w_k$ 为零均值的白噪声序列,其协方差为 $Q_k$ ;  $\Phi_{k|k-1} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 是系统从离散时刻 $k$ 到离散时刻 $k-1$ 的状态转移矩阵,有

$$\Phi_{k|k-1} = e^{A(t_k - t_{k-1})} = \begin{bmatrix} 1 & t_k - t_{k-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$Q_{k|k-1} = \begin{bmatrix} \frac{(t_k - t_{k-1})^3}{3} & \frac{(t_k - t_{k-1})^2}{2} \\ \frac{(t_k - t_{k-1})^2}{2} & t_k - t_{k-1} \end{bmatrix} \cdot q. \quad (3)$$

其中:  $q$ 为系统状态噪声水平系数,仿真中取 $q = 0.01$ ;  $A$ 为连续时间线性随机动态系统的系统矩阵.

异步航迹融合方法是基于各网络节点的局部航迹展开的,各局部航迹计算过程如下:

$$x_{k|k-1}^i = \Phi_{k|k-1}x_{k-1}^i + w_{k-1}^i, \quad (4)$$

$$P_{k|k-1}^i = \Phi_{k|k-1}P_{k-1|k-1}^i\Phi_{k|k-1}^T + Q_{k|k-1}^i, \quad (5)$$

$$K_k^i = P_{k-1|k-1}^i(H_k^i)^T[H_k^i P_{k-1|k-1}^i(H_k^i)^T + Q_{k|k-1}^i]^{-1}, \quad (6)$$

$$\hat{x}_{k|k}^i = x_{k|k-1}^i + K_k^i[z_k^i - H_k^i x_{k|k-1}^i], \quad (7)$$

$$(P_{k|k}^i)^{-1} = (P_{k|k-1}^i)^{-1} + (H_k^i)^T(R_k^i)^{-1}H_k^i. \quad (8)$$

在利用式(4)–(8)计算各节点航迹信息的基础上,下面分别给出3种异步航迹融合策略的实现步骤.

### 3.1 异步融合策略1的算法步骤(Algorithm steps for the first asynchronous fusion policy)

设网络瞄准系统中有 $n$ 个网络节点,它们在一个融合周期 $T = [t_{k-1}, t_k]$ 内的局部航迹信息分别用 $\hat{x}_{k_1|k_1}^1, \dots, \hat{x}_{k_n|k_n}^n$ 表示,其中 $k_1, \dots, k_n$ 分别表示各节点航迹到达融合中心的时刻.

记目标在时刻 $k$ 的真实状态为 $x_k$ ,则策略1的异步航迹融合步骤如下:

1) 各局部节点*i*的预测估计.

$$x_{k|k_i}^i = \Phi_{k|k_i} x_{k_i|k_i}^i + w_{k|k_i}, \quad (9)$$

$$P_{k|k_i}^i = \Phi_{k|k_i} P_{k_i|k_i}^i (\Phi_{k|k_i})^T + Q_{k|k_i}, \quad (10)$$

其中 $\Phi_{k|k_i}$ 为网络节点*i*的状态转移矩阵. 为简化描述, 这里仅给出了网络节点*i*的统一航迹外推形式, 即节点*i*在融合周期 $[k-1, k]$ 内每个航迹文件 $x_{k_1}^i, \dots, x_{k_{\ell_i}}^i$ 均可以按照式(9)–(10)递推得到时刻*k*的状态 $\hat{x}_{k|k_i,1}^i, \dots, \hat{x}_{k|k_i,\ell_i}^i$ .

2) 系统全局状态融合估计.

记*k*时刻, 网络瞄准系统的融合状态为 $\hat{x}_{k|k}^f$ , 根据引理<sup>[11]</sup>, 在忽略各局部预测航迹误差相关性的情况下, 将融合误差方差矩阵迹的最小化作为性能指标 $\min[\text{tr}(P_{k|k}^f)]$ , 得到异步融合估计为

$$\hat{x}_{k|k}^f = \sum_{i=1}^n P_{k|k}^f (P_{k|k_i}^i)^{-1} \hat{x}_{k|k_i}^i. \quad (11)$$

系统融合误差方差矩阵为

$$P_{k|k}^f = \left( \sum_{i=1}^n (P_{k|k_i}^i)^{-1} \right)^{-1}. \quad (12)$$

**证** 系统的全局状态融合估计.

首先作如下线性组合:

$$\hat{x}_{k|k}^f = D_1 \hat{x}_{k_1|k_1}^1 + D_2 \hat{x}_{k_2|k_2}^2 + \dots + D_n \hat{x}_{k_n|k_n}^n. \quad (13)$$

对式(13)两边求数学期望,

$$\begin{aligned} E\{\hat{x}_{k|k}^f\} &= \\ D_1 E\{\hat{x}_{k_1|k_1}^1\} + \dots + D_n E\{\hat{x}_{k_n|k_n}^n\} &= \\ D_1 E\{\hat{x}_{k_1}^1\} + \dots + D_n E\{\hat{x}_{k_n}^n\} &= \\ D_1 \Phi_{k|k_1}^{-1} E\{x_k\} + \dots + D_n \Phi_{k|k_n}^{-1} E\{\hat{x}_k\}. \end{aligned} \quad (14)$$

由文献<sup>[11]</sup>可知, 当 $D_1 \Phi_{k|k_1}^{-1} + \dots + D_n \Phi_{k|k_n}^{-1} = I$ 时,  $\hat{x}_{k|k}^f$ 是无偏的.

令 $S_i = D_i \Phi_{k|k_i}^{-1}$ , 则有

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = I. \quad (15)$$

于是式(13)转化为

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k}^f &= S_1 \Phi_{k|k_1} x_{k_1|k_1}^1 + \dots + S_n \Phi_{k|k_n} x_{k_n|k_n}^n = \\ &S_1 x_{k_1|k_1}^1 + \dots + S_n x_{k_n|k_n}^n. \end{aligned} \quad (16)$$

设预计误差和预测误差的方差矩阵分别为

$$\tilde{x}_{k|k_i}^i = x_k - x_{k|k_i}^i, \quad (17)$$

$$P_{k|k_i}^i = E\{\tilde{x}_{k|k_i}^i \cdot (\tilde{x}_{k|k_i}^i)^T\}. \quad (18)$$

记系统融合误差为 $\tilde{x}_{k|k}^f = x_k - \hat{x}_{k|k}^f$ , 根据方差定义有

$$\begin{aligned} P_{k|k}^f &= E\{[x_k - \hat{x}_{k|k}^f] \cdot [x_k - \hat{x}_{k|k}^f]^T\} = \\ &E\{[x_k - S_1 \tilde{x}_{k|k_1}^1 - \dots - S_n \tilde{x}_{k|k_n}^n] \cdot \\ &[x_k - S_1 \tilde{x}_{k|k_1}^1 - \dots - S_n \tilde{x}_{k|k_n}^n]^T\}. \end{aligned} \quad (19)$$

由式(15)可知

$$x_k = S_1 x_k + S_2 x_k + \dots + S_n x_k. \quad (20)$$

将式(17)–(18)(20)代入式(19), 当 $\tilde{x}_{k|k_1}^1, \dots, \tilde{x}_{k|k_n}^n$ 互不相关时, 有

$$\begin{aligned} P_{k|k}^f &= E\{[S_1 \tilde{x}_{k|k_1}^1 + \dots + S_n \tilde{x}_{k|k_n}^n] \cdot \\ &[S_1 \tilde{x}_{k|k_1}^1 + \dots + S_n \tilde{x}_{k|k_n}^n]^T\} = \\ &S_1 P_{k|k_1}^1 S_1^T + \dots + S_n P_{k|k_n}^n S_n^T. \end{aligned} \quad (21)$$

以 $\min[\text{tr}(P_{k|k}^f)]$ 为性能指标, 根据最优滤波理论的相关知识<sup>[11]</sup>, 得到

$$S_1 = P_0 \cdot (P_{k|k_1}^1)^{-1}, \quad S_n = P_0 \cdot (P_{k|k_n}^n)^{-1}. \quad (22)$$

因此,  $P_{k|k}^f = P_0 = ((P_{k|k_1}^1)^{-1} + \dots + (P_{k|k_n}^n)^{-1})^{-1}$ .

### 3.2 异步融合策略2的算法步骤(Algorithm steps for the second asynchronous fusion policy)

在利用融合策略2时, 首先需要计算各网络节点在时刻*k*的虚拟航迹, 然后根据这些虚拟航迹进行融合. 如果网络节点在融合周期内只有一个航迹文件, 则按照状态递推的形式产生虚拟航迹; 如果在融合周期内存在多个航迹文件, 则利用最小二乘算法在时刻*k*进行时域融合.

策略2的异步航迹融合步骤如下:

1) 利用最小二乘算法进行时域融合.

设网络节点*i*在系统一个融合周期 $T = [k-1, k]$ 内的航迹文件有 $\ell_i$ 个, 其中第*j*个航迹文件到达融合中心的时间为 $k_{i,j}$ , 航迹信息可以用 $\hat{x}_{k_{i,j}|k_{i,j}}^i$ 和 $P_{k_{i,j}|k_{i,j}}^i$ 表示,  $i=1, \dots, n, j=1, \dots, \ell_i$ . 见图5所示.

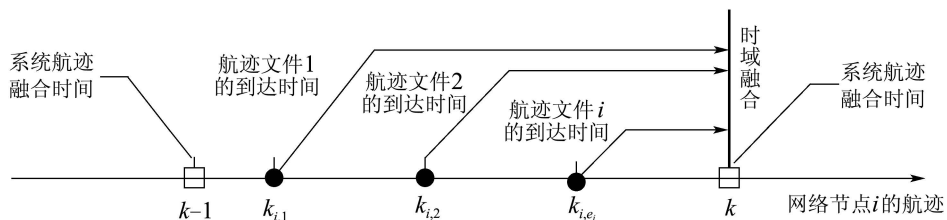


图5 多个航迹文件的时域融合过程

Fig. 5 Multiple track fusion course in time domain

根据式(9), 网络节点*i*在*k*时刻的状态 $x_k^i$ 与 $[k-1, k]$ 区间内其他时刻的状态具有如下关系:

$$x_{k_{i,j}|k_{i,j}}^i = \Phi_{k_{i,j}|k}^{-1} x_k^i + \Phi_{k_{i,j}|k}^{-1} w_{k_{i,j}|k_{i,j}}. \quad (23)$$

将融合周期 $[k-1, k]$ 内, 网络节点*i*的所有航迹文件统一描述为

$$X_k^i = [\hat{x}_{k_{i,1}|k_{i,1}}^i \cdots \hat{x}_{k_{i,\ell_i}|k_{i,\ell_i}}^i]^\top, \quad (24)$$

其对应的真实状态向量 $x_k^i$ 为

$$x_k^i = [x_{k_{i,1}|k_{i,1}}^i \cdots x_{k_{i,\ell_i}|k_{i,\ell_i}}^i]^\top. \quad (25)$$

令

$$A_k^i = [(\Phi_{k_{i,1}|k}^i)^{-1} \cdots (\Phi_{k_{i,\ell_i}|k}^i)^{-1}]^\top, \quad (26)$$

$$V_k^i =$$

$$[(\Phi_{k_{i,1}|k}^i)^{-1} w_{k_{i,1}|k_{i,1}} \cdots (\Phi_{k_{i,\ell_i}|k}^i)^{-1} w_{k_{i,\ell_i}|k_{i,\ell_i}}]^\top. \quad (27)$$

综合式(23)–(27), 得到

$$X_k^i = A_k^i x_k^i + V_k^i. \quad (28)$$

利用最小二乘算法, 得到网络节点*i*在时刻*k*状态 $x_k^i$ 的最优估计 $\hat{x}_k^i$ 为

$$\hat{x}_k^i = ((A_k^i)^\top A_k^i)^{-1} (A_k^i)^\top \hat{X}_k^i. \quad (29)$$

网络节点*i*在时刻*k*的估计误差:

$$\tilde{x}_k^i = x_k^i - \hat{x}_k^i = ((A_k^i)^\top A_k^i)^{-1} (A_k^i)^\top V_k^i. \quad (30)$$

网络节点*i*在时刻*k*的估计误差协方差:

$$P_k^i = ((A_k^i)^\top A_k^i)^{-1} (A_k^i)^\top R^i A_k^i (((A_k^i)^\top A_k^i)^{-1})^\top,$$

其中:

$$R^i = E[V_k^i (V_k^i)^\top] = R_1^i + R_2^i, \quad (31)$$

$$R_1^i = \text{diag}\{\Phi_{k_{i,1}|k}^{-1} Q_i (\Phi_{k_{i,1}|k}^{-1})^\top, \dots, \Phi_{k_{i,\ell_i}|k}^{-1} Q_i (\Phi_{k_{i,\ell_i}|k}^{-1})^\top\}, \quad (32)$$

$$R_2^i = \text{diag}\{\Phi_{k_{i,1}|k_{i,1}}^i, \dots, \Phi_{k_{i,\ell_i}|k_{i,\ell_i}}^i\}. \quad (33)$$

2) 系统全局状态融合估计.

设*k*时刻的融合状态为 $\hat{x}_k^f$ , 同样将融合误差方差矩阵迹的最小化作为性能指标 $\min[\text{tr}(P_k^f)]$ , 得到异步航迹融合估计:

$$\hat{x}_k^f = \sum_{i=1}^n P_{k|k}^f (P_k^i)^{-1} \hat{x}_k^i, \quad (34)$$

$$P_{k|k}^f = \left( \sum_{i=1}^n (P_k^i)^{-1} \right)^{-1}, \quad (35)$$

其中: *n*为网络节点(局部航迹)的数目,  $\hat{x}_k^i$ 和 $P_k^i$ 分别表示网络节点*i*在时刻*k*的虚拟航迹信息.

### 3.3 异步融合策略3的算法步骤(Algorithm steps for the third asynchronous fusion policy)

策略3按照先来先处理的方式, 依次利用各网络节点送来局部航迹更新系统航迹. 设融合中心在*k-1*时刻的系统航迹为 $\hat{x}_{k-1|k-1}^f$ , 它在*k<sub>1</sub>*时刻接收到来自网络节点*i*的航迹信息 $\hat{x}_{k_1}^i$ ,  $P_{k_1|k_1}^i$ , 下面给出利用局部航迹 $\hat{x}_{k_1}^i$ 更新系统航迹 $\hat{x}_{k_1|k_1}^f$ 的过程.

策略3的异步航迹融合步骤如下:

1) 系统航迹递推估计.

$$\hat{x}_{k_1|k-1}^f = \Phi_{k_1|k-1} \hat{x}_{k-1|k-1}^f + w_{k-1|k-1}, \quad (36)$$

$$P_{k_1|k-1}^f = \Phi_{k_1|k-1} P_{k-1|k-1}^f \Phi_{k_1|k-1}^\top + Q_{k_1|k-1}, \quad (37)$$

其中:  $\hat{x}_{k_1|k-1}^f$ 为融合中心在*k<sub>1</sub>*时刻的递推航迹,  $P_{k_1|k-1}^f$ 为融合中心在*k<sub>1</sub>*时刻的递推协方差矩阵,  $\Phi_{k_1|k-1}$ 为系统航迹的状态转移矩阵.

2) 系统全局状态融合估计.

设*k<sub>1</sub>*时刻系统的融合状态为 $\hat{x}_{k_1|k_1}^f$ , 将融合误差方差矩阵迹的最小化 $\min[\text{tr}(P_{k_1|k_1}^f)]$ 作为性能指标, 得到异步航迹融合估计为:

$$\hat{x}_{k_1|k_1}^f = P_{k_1|k_1}^f [(P_{k_1|k-1}^f)^{-1} \hat{x}_{k_1|k-1}^f + \sum_{i=1}^m (P_{k_1|k_1}^i)^{-1} \hat{x}_{k_1|k_1}^i], \quad (38)$$

$$P_{k_1|k_1}^f = ((P_{k_1|k-1}^f)^{-1} + \sum_{i=1}^m (P_{k_1|k_1}^i)^{-1})^{-1}, \quad (39)$$

其中*m*表示*k<sub>1</sub>*时刻融合中心收到局部航迹文件的个数. 得到*k<sub>1</sub>*时刻的系统航迹后, 按照相同的方法递推就可以计算出*k<sub>2</sub>*,  $\dots$ , *k<sub>n</sub>*时刻的系统航迹.

## 4 实验分析(Experiment analysis)

为了反映本文提出异步融合策略及融合算法的有效性, 下面对利用4个网络节点跟踪目标的异步航迹融合问题进行仿真实验, 目的是通过对不同异步融合策略进行比较, 分析其在不同使用条件下的融合性能.

设各网络节点向融合中心发布航迹文件的周期分别为

$$T_1 = 4\text{ s}, T_2 = 2\text{ s}, T_3 = 3\text{ s}, T_4 = 1\text{ s}.$$

策略1和策略2中系统航迹的融合周期为 $T = 5\text{ s}$ . 仿真过程中假定各网络节点所形成的局部航迹与目标已实现关联. 记目标的状态向量为 $[x \ \dot{x} \ y \ \dot{y}]$ , 目标的初始位置为

$$x_0 = [0 \ 20 \ 1000 \ -10].$$

目标状态转移矩阵和过程噪声矩阵分别为

$$\Phi_{k|k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

对网络瞄准系统中3种异步融合策略进行实验分析, 经过100次Monte Carlo运算, 得到目标的跟踪轨迹如图6所示, 不同异步融合策略下的位置误差如图7所示.

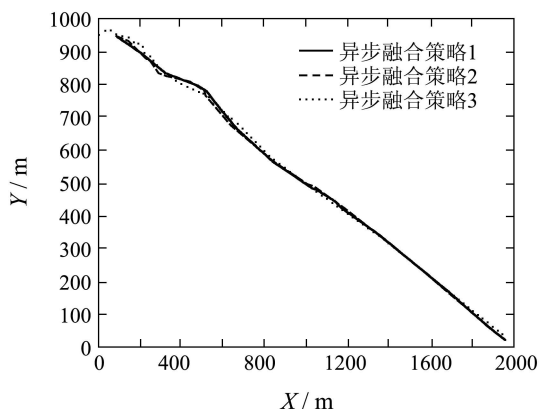


图 6 3种异步融合策略下的目标跟踪轨迹

Fig. 6 Target track in the three asynchronous fusion policies

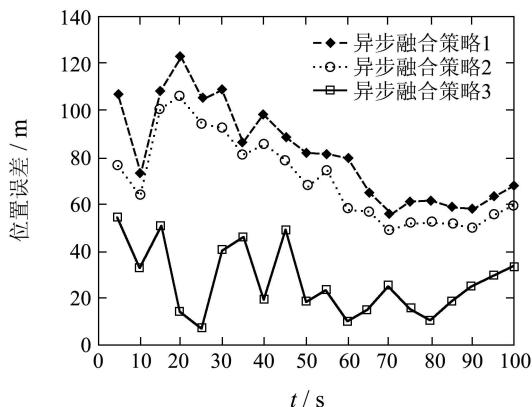


图 7 3种异步融合策略的位置估计误差

Fig. 7 Location error in the three asynchronous fusion policies

研究中发现, 利用策略1和策略2估计目标状态时, 系统航迹的融合性能会受到系统融合周期 $T$ 的影响; 由于策略3采用实时航迹更新策略, 因此其融合性能不会受到系统融合周期的影响. 图8给出了不同策略下融合性能随融合周期的变化情况.

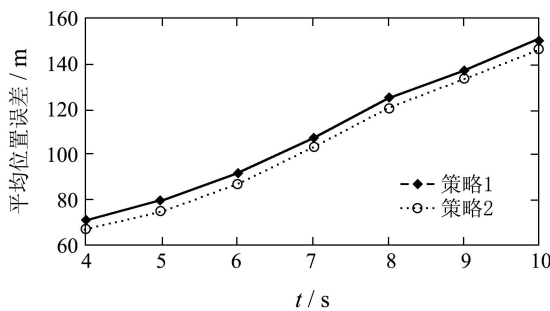
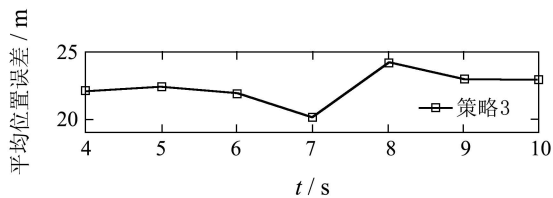


图 8 系统融合性能与融合周期的关系

Fig. 8 The relationship between system fusion performance and fusion period

通过上述实验结果可以得出以下结论:

1) 策略1利用线性递推的方式能够将不同时刻的网络瞄准信息统一到相同的时刻进行融合, 但是状态递推会产生额外的估计误差, 且递推的间隔越长所产生的误差越大, 选择合适的瞄准周期是该策略保证融合精度的关键.

2) 策略2主要基于最小二乘方法(将多次航迹融合为一个虚拟航迹)形成局部节点航迹估计, 这种方法采用分布式结构计算目标状态, 从算法的估计性能上看, 其融合精度略优于策略1. 与策略1类似, 该方法的融合精度容易受到系统融合周期影响. 在实际工程应用方面, 上述两种异步融合策略的估算精度一般, 但计算实时性较好, 它们主要适用于网络瞄准的早期阶段, 用以形成普通质量的目标瞄准和跟踪信息.

3) 策略3采用实时处理的方式来计算系统的融合航迹, 与其他两种策略相比, 该方法具有较好的融合性能和稳定性, 但其计算的实时性较差, 且它对目前机载数据的存储、处理系统和融合系统网络通信能力要求较高. 因此该策略主要适用于网络瞄准后期, 用以准确计算目标的火控解.

### 5 结论(Conclusion)

异步航迹融合是网络瞄准系统目标信息处理的关键技术之一, 有效利用不同节点的局部航迹可以为网络瞄准系统提供实时可靠的目标信息. 本文以实际工程应用为背景, 分别提出了3种适用于网络瞄准的异步航迹融合策略, 给出了相应策略的计算方法, 并通过仿真实验证明了所提出方法的有效性. 实验结果表明, 在融合精度方面, 策略3的性能优于策略1和策略2, 它可以为网络瞄准提供高质量的目标火控解, 但该方法的计算代价较大, 并且对网络瞄准系统的通信带宽要求较高, 在实际应用中存在一定的局限性; 在计算实时性方面, 策略1和策略2的性能较好, 因此比较适合于

早期预警和探测、跟踪目标,而策略3的计算实时性相对较差。

由于航迹融合的计算量、实时性和最优性难以同时达到最好,且估算精度的增加会影响系统融合的实时性。因此,需要根据工程实际来选择合理的异步融合策略,以满足计算实时性与融合精度的双重要求。为了更好的贴近实际应用,可以同时采用3种算法进行计算,然后从中选择出计算精度和实时性较好的结果用于网络瞄准,而其余两种算法用于系统备份。本文从理论层面对多个网络节点的异步融合策略与融合算法进行了研究,下一步工作还需要将其推广到网络瞄准作战运用中。随着战术数据链和网络信息处理能力的发展,策略3对计算实时性要求可以逐步得到改善。

### 参考文献(References):

- [1] 孙隆和. 网络瞄准及相关技术——瞄准和打击活动目标[J]. 电光与控制, 2005, 12(3): 1–5.  
(SUN Longhe. Networked targeting and the relative technologies — targeting and striking of moving targets[J]. *Electronics Optics & Control*, 2005, 12(3): 1–5.)
- [2] HU Y Y, DUAN Z S, ZHOU D H. Estimation fusion with general asynchronous multi-rate sensors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 2090–2102.
- [3] CHENG C, WANG J F. Algorithm for multi-sensor asynchronous track to track fusion[J]. *Computer Science*, 2009, 5553(3): 847–854.
- [4] LIU Z, ZHAO Q. Interactive full asynchronous tracking of multi-rate multi-sensor system[C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Image and Graphics*. New York: IEEE, 2009: 506–509.
- [5] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.  
(HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng. *Multi-Sources Information Fusion*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [6] ALOUANI A T, GRAY J E. Simplified generalized asynchronous track fusion filter[C] // *Proceedings of SPIE, Acquisition, Tracking, Pointing*. Florida: Kissimmee, 2006, 6238: 623801-1–623801-12.
- [7] 徐毓, 金以慧. 多传感器异步关联航迹的融合[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1318–1321.  
(XU Yu, JIN Yihui. Asynchronous suboptimal fusion of correlated target tracks from multisensors[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(11): 1318–1321.)
- [8] 文成林, 葛全波, 刘双剑. 带有信息反馈的最优异步递推航迹融合算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2123–2131.  
(WEN Chenglin, GE Quanbo, LIU Shuangjian. Optimal asynchronous recursive track fusion with global[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2123–2131.)
- [9] 朱洪艳, 韩崇昭, 韩红, 等. 分布式多传感器信息融合系统的异步航迹关联方法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 453–456.  
(ZHU Hongyan, HAN Chongzhao, HAN Hong, et al. Asynchronous track-to-track association method in distributed multi-sensor information fusion system[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 453–456.)
- [10] 彭冬亮, 叶建军, 葛泉波. 多传感器异步采样系统的顺序融合[J]. 信息与控制, 2010, 39(1): 18–24.  
(PENG Dongliang, YE Junjun, GE Quanbo. Sequential fusion for multi-sensor asynchronous sampling system[J]. *Information & Control*, 2010, 39(1): 18–24.)
- [11] HENRY S, JOHN W W. *Probability and Random Processes with Applications to Signal Processing*[M]. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2008.

### 作者简介:

王琳 (1983—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究领域为航空武器系统总体、仿真与控制、网络瞄准等, E-mail: huokong12@163.com;

张涛 (1982—), 男, 博士研究生, 研究领域为航空武器系统总体、仿真与控制、网络瞄准等, E-mail: zt32410@163.com;

冯国强 (1978—), 男, 博士, 讲师, 研究领域为传感器组网与融合、无源定位与跟踪技术等, E-mail: fgq8787@163.com;

于雷 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为航空武器系统总体、仿真与控制、雷达探测与对抗、作战指挥引导, E-mail: aerospace0112@sina.com;

杨海燕 (1972—), 女, 讲师, 博士研究生, 研究领域为多传感器管理、信息融合等, E-mail: yanghy07@mail.tsinghua.edu.cn.