

网络化防空火控系统航迹融合

陈 杰, 陈 晨, 夏元清, 张 娟

(1. 北京理工大学 信息科学与技术学院 自动控制系, 北京 100081

2. 北京理工大学 复杂系统的智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 网络化防空火控系统是网络化作战形式不断发展的产物. 本文以网络化防空作战为背景, 针对网络化防空火控系统的体系结构及航迹融合问题进行了研究. 将网络化控制系统的方法引入防空火控系统的研究中, 提出了一种网络化防空火控系统的体系结构. 为了保证系统在该体系结构下更好地工作, 对航迹融合方法进行了研究. 提出并构建了基于联邦Kalman滤波技术的航迹融合方法, 其滤波结构适应于灵活开放的体系结构, 同时子滤波器可以根据网络传输状态, 处理数据丢包和时延的情况. 试验结果表明, 融合后的数据精度得到了提高. 该方法为网络化防空火控系统的设计与实现奠定了良好的基础.

关键词: 网络化火控系统; 航迹融合; 体系结构; 联邦滤波器

中图分类号: TJ768.4 TP274 **文献标识码:** A

Track fusion in networked antiaircraft fire-control system

CHEN Jie, CHEN Chen, XIA Yuan-qing, ZHANG Juan,

(1. Department of Automatic, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Education Ministry Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Renovation of networked campaign modality results in the development of networked antiaircraft fire control system. Based on the networked antiaircraft campaign, the architecture of networked antiaircraft fire control system and the method of track fusion are investigated. Theories of networked control system are introduced to the research of the architecture of networked antiaircraft fire control system and the practical construction of such systems. In order to reach better efficiency under the architecture, research on track fusion problems is also studied. Track fusion based on Federated Kalman filter technique is put forward, and the structure of the filter is designed for the flexible and open architecture. Local filter can deal with packet losses and time-delay according to network transmission status. Experiments are performed and the results show that data precision is greatly improved by the fusion. The method could be a strong foundation for the design and implementation of networked antiaircraft fire control system.

Key words: networked fire control system; track fusion; architecture; federated filter

1 引言(Introduction)

随着网络技术的飞速发展和高科技作战形式的不断产生, 网络化防空作战的优势和重要性越来越明显. 不同于传统的火控系统, 网络化防空火控系统中各节点可以互通互连并根据环境需求灵活重组, 系统反应速度快, 适应性和抗毁性强^[1,2].

网络化防空火控系统的体系结构能够满足多种指挥方式, 同时目标数据和指挥命令也可以通过网

络及时传输. 高质量的目标信息是系统在复杂的战场环境下提高作战效能的有力保障, 因此有效的航迹融合方法在网络化防空火控系统研究中发挥了重要的作用, 这也是网络信息共享优势的体现.

本文对网络化防空火控系统的体系结构进行了研究与设计, 包括系统组成、节点间的连接关系、数据流向等. 航迹融合技术是网络化防空火控系统的核心问题之一, 本文提出了与体系结构相适应的航迹融合方法, 可对多节点的信息进行综合处理.

2 网络化防空火控系统体系结构设计(Architecture design of networked anti-aircraft fire control system)

2.1 系统基本概念与组成(Composition and conceptions of the system)

网络化防空火控系统是把分布在一定地域内的火控系统连接起来, 构成一个实时高速传递信息的网络, 并利用分布式信息处理技术和指挥控制技术, 使参与网络化作战的各单元获得更准确的战场态势和任务调度。

基于网络的抗毁性和生存能力的考虑, 本系统选择了分布式的体系结构, 鉴于节点的异质性和指挥层次, 将网络划分为多层结构. 系统的组成与体系结构如图1所示。

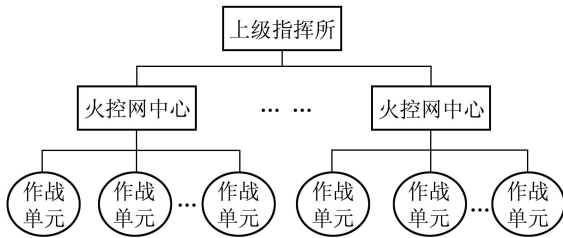


图1 网络化防空火控系统体系结构图

Fig. 1 Architecture of networked control system

网络化防空火控系统由火控网中心和入网的火控系统及火力系统组成, 基于作战过程完整性的考虑, 这里将一个火控系统和对应的火力系统规划为一个作战节点。

在开放式的体系结构下, 分层分布式的结构不但指挥层次明确, 同时增强了同级节点间的互通互连, 通信链路可灵活选择, 网络的指挥控制中心具有一定的可变性和分散性, 适合现代战争的要求。

2.2 基于网络化控制理论的体系结构分析(Analysis of architecture based on networked control system theory)

网络共享资源的特点使得控制系统向着扁平化、分布化的方向发展. 网络化控制系统^[3]是一种新型的控制结构, 指过通讯网络实现控制系统中各个组成部分之间的信息交换、资源共享的一类实时高速反馈控制系统. 这里将网络化控制系统的概念引入火控系统的研究中, 建立起一种基于网络的防空火力指挥控制系统。

网络化防空火控系统的信息传递过程如图2所示. 从目标探测到火力实施的过程, 火控网中心与作战单元在逻辑上形成了多个闭环. 火控计算机将目标量测信息通过网络发送至火控网中心, 火控网中心将网内各类信息整合形成火控网覆盖区域的总体

战场态势. 同时火控计算机根据火控探测器对目标的量测信息, 计算射击诸元并发送至炮控计算机; 炮控计算机根据射击诸元和火控网中心的射击任务分配命令控制射击程序实施。

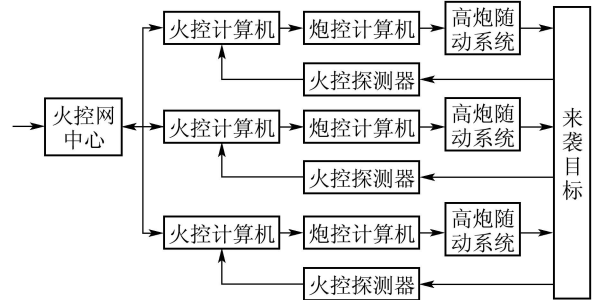


图2 网络化防空火控系统信息传递流程

Fig. 2 Flow chart of information transfer of anti-aircraft networked control system

火控网中心融合后的目标信息一方面可以对未发现目标的火控系统提供目标搜索引导, 提高系统对隐身、超低空目标的探测能力; 另一方面, 当火力系统无法运用本地探测器对目标实施拦截时, 可以利用火控网中心提供的精确航路数据和射击诸元, 控制本地火力系统实施射击。

本文涉及的网络化防空火控系统可以看作是指挥控制系统末端的延伸. 火控网中心既是网络的指挥控制节点, 也是战场的数据处理中心. 为了实现信息优势向决策优势的转变, 有效地提高数据精度, 合理可行的航迹融合算法便成为网络化防空火控系统研究中一个亟待解决的问题。

3 航迹融合技术研究(Research on track fusion)

3.1 数据处理原则(Principles of data processing)

网络化防空火控系统中的数据融合问题是指, 运用多传感器数据融合理论, 将通过网络传输的多部火控探测器对目标的量测信息进行高速有效的处理, 形成统一的目标状态信息, 过程如图3所示。

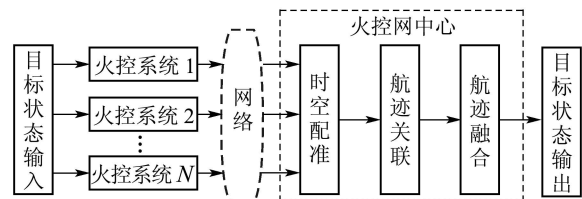


图3 数据处理流程图

Fig. 3 Data processing of networked control system

为了提高数据处理的效率, 规定在网内传输的目标信息均为基于公共坐标系下的数据且按统一周期传送. 数据包在发送前加时间标志位. 火控网中心可以通过目标数据所带的时标进行时间对准。

火控计算机将目标量测信息上报火控网中心首先对目标进行编批处理. 火控网中心在收到多组量测数据后需进行航迹关联判决, 然后对目标信息进行融合处理.

3.2 航迹融合算法思路(Design of track fusion method)

航迹融合采用了联邦Kalman滤波结构^[4], 其基本思想是先分散处理、再全局融合. 研究中根据网络化火控系统的体系结构, 对应于每个火控探测器, 建立一个子滤波器, 运用扩展Kalman滤波技术结合不同的网络传输状态, 分别得到各个火控探测器对目标的局部估计. 这些局部估计在主滤波器内按融合算法综合, 从而获得建立在所有相关目标量测基础上的全局估计.

3.3 数学模型(Mathematical model)

3.3.1 系统模型(System model)

在网络化防空火控系统中, 有随机干扰的目标状态方程可表示为

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) + G(k)V(k). \quad (1)$$

其中: $X(k) \in \mathbb{R}^n$ 是 k 时刻目标的状态向量, $V(k) \in \mathbb{R}^n$ 是过程噪声, 是具有零均值和正定协方差矩阵 $Q(k)$ 的高斯噪声向量. $\Phi(k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是状态转移矩阵, $G(k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是过程噪声分布矩阵.

3.3.2 量测模型(Measurement model)

现以雷达为探测器, 在极坐标系下给出的量测输出为目标距离 $r(k)$, 方位角 $\theta(k)$ 和俯仰角 $\varphi(k)$. 则其量测模型为

$$\begin{bmatrix} r(k) \\ \theta(k) \\ \varphi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{r}(k) \\ \tilde{\theta}(k) \\ \tilde{\varphi}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_r(k) \\ w_\theta(k) \\ w_\varphi(k) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中: $r(k), \theta(k), \varphi(k)$ 为探测器在 k 时刻的量测输出值, $\tilde{r}(k), \tilde{\theta}(k), \tilde{\varphi}(k)$ 为量测真值, $w_r(k), w_\theta(k), w_\varphi(k)$ 为量测噪声, 它们是均值为零, 方差为 $\sigma_r^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\varphi^2$ 的高斯白噪声.

设目标状态向量为 $X(k) = [x(k), y(k), z(k), \dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)]^T$, 则有

$$\begin{bmatrix} r(k) \\ \theta(k) \\ \varphi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} \\ \arctan \frac{y(k)}{x(k)} \\ \arctan \frac{z(k)}{\sqrt{x^2(k) + y^2(k)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_r(k) \\ w_\theta(k) \\ w_\varphi(k) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3.4 基于联邦Kalman滤波器的航迹融合算法(Method of track fusion based on federated Kalman filter)

3.4.1 联邦Kalman滤波器(Federated Kalman filter)

Carlson.N.A提出的联邦滤波器是一种有反馈层次结构的滤波方法, 在计算量、精度和容错性等方面较常规Kalman滤波器有显著的优势, 是处理多传感器数据融合问题行之有效的方法.

联邦滤波器是一种两级数据融合结构^[5], 如图4所示. 子滤波器并行工作, 分别根据各自的滤波方程得到局部估计 $\hat{X}_j(k)$ 和方差 $P_j(k)$, 再由主滤波器融合得到全局估计 $\hat{X}_g(k)$ 和方差 $P_g(k)$. 然后根据信息分配原则, 利用全局估计和方差重置各个子滤波器和主滤波器.

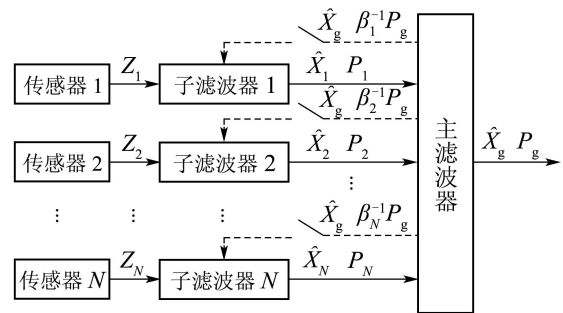


图 4 联邦滤波结构图

Fig. 4 Structure of federated Kalman filter

3.4.2 滤波方程(Filtering equation)

1) 子滤波器.

子滤波器的状态方程和量测方程分别为

$$X_j(k+1) = \Phi(k)X_j(k) + G(k)V(k), j = 1, \dots, N. \quad (4)$$

$$Z_j(k+1) = H_j(k+1)X_j(k+1) + W_j(k+1). \quad (5)$$

由于量测模型是非线性的, 故将其围绕状态向量展开成Taylor级数并忽略高次项, 得到

$$H(k) = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}(k+1|k)} = \begin{bmatrix} H^r(x) \\ H^\theta(x) \\ H^j(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha}{\hat{r}} & \frac{\beta}{\hat{r}} & \frac{\gamma}{\hat{r}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\beta}{\hat{r}_h^2} & \frac{\alpha}{\hat{r}_h^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\alpha\gamma}{\hat{r}_h \hat{r}^2} & -\frac{\beta\gamma}{\hat{r}_h \hat{r}^2} & \frac{\hat{r}_h}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中:

$$\alpha = \hat{x}(k+1|k), \beta = \hat{y}(k+1|k), \gamma = \hat{z}(k+1|k),$$

$$\hat{r}_h = \sqrt{[\hat{x}(k+1|k)]^2 + [\hat{y}(k+1|k)]^2},$$

$$\hat{r} = \sqrt{\hat{r}_h^2 + [\hat{z}(k+1|k)]^2}.$$

子滤波器方程为

$$\hat{X}_j(k+1|k) = \Phi(k)\hat{X}_j(k), \quad (6)$$

$$P_j(k+1|k) = \Phi(k)P_j(k)\Phi^T(k) + G(k)Q(k)G^T(k), \quad (7)$$

$$K_j(k+1) = \frac{P_j(k+1|k)H_j^T(k+1)}{H_j(k+1)P_j(k+1|k)H_j^T(k+1) + R_j(k)}, \quad (8)$$

$$\hat{X}_j(k+1|k+1) = \hat{X}_j(k+1|k) + K_j(k+1) \times [Z_j(k+1) - h_j(\hat{X}_j(k+1|k))],$$

$$P_j(k+1) = [I - K_j(k+1)H_j(k+1)] \cdot P_j(k+1|k). \quad (9)$$

2) 主滤波器.

$$P_g(k) = [\sum_{j=1}^N P_j^{-1}(k)]^{-1}, \quad (10)$$

$$\hat{X}_g(k) = P_g(k) \sum_{j=1}^N P_j^{-1}(k) \hat{X}_j(k), \quad (11)$$

$$P_j(k) = \beta_j^{-1} P_g(k). \quad (12)$$

其中: \hat{X}_j 和 P_j 表示第 j 个子滤波器的状态估计和协方差, \hat{X}_g 和 P_g 表示主滤波器的状态估计和协方差, β_j 为第 j 个传感器的信息分配因子.

3) 信息分配和状态重置.

信息分配因子满足信息守恒原理, 这里主滤波器只用做数据融合处理, 故有

$$\sum_{j=1}^N \beta_j^{-1} = 1. \quad (13)$$

只要遵守信息守恒原则, β_j 的选取不同并不影响联邦滤波器的全局最优性^[6]. 由于Kalman滤波中估值协方差阵 P_j 包含了估计误差信息, 因此度量其大小可以反映各子系统估计性能, 取

$$\beta_j = \frac{\text{tr}|P_j^{-1}|}{\sum_{j=1}^N \text{tr}|P_j^{-1}|} = \frac{\text{tr}|P_j^{-1}|}{\text{tr}|P_g^{-1}|}. \quad (14)$$

3.5 基于网络传输的数据处理(Data processing based on network transmission)

由于火控网中心收到的目标量测数据是通过网络传输而来的, 故在数据融合时需要考虑网络不确定性对数据融合的影响.

引入 $\gamma_k \in \{0, 1\}$ 描述数据包的到达和丢失, 相应的网络传输状态分为正常状态 ($\gamma_k = 1$) 和异常状

态 ($\gamma_k = 0$). $\gamma_k = 0$ 的原因有: 传输通道出错、网络拥塞或长时延引起的接收端对数据包的放弃等.

γ_k 由二值Markov链描述, 其转移概率矩阵为

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1-q & q \\ p & 1-p \end{bmatrix}. \quad (15)$$

式中: p 表示传输失败率, q 表示传输恢复率, p, q 在 $(0, 1)$ 之间; $1-p$ 表示传输通道状态由正常状态一步转移到异常状态的概率. 不失一般性, 取 $\gamma_1 = 1$. 显然, p 值越小和 q 值越大表示网络越可靠.

为保证滤波器的稳定性, 需运用相关标准^[7] 对网络进行判断. 现考量系统矩阵为线性, 并将非线性量测矩阵线性化的火控探测器系统, 若在网络丢包率一定范围内可以满足判断标准, 则滤波器稳定, 继而可以应用本文中的方法进行网络化数据融合处理, 若不满足标准, 则需采取一定措施提高网络传输质量.

现将目标量测数据传输状态分为3种情况, 目标量测数据正常到达、数据丢失和数据延时.

1) 当目标量测数据正常到达火控网中心时, 可采用上节的扩展Kalman滤波方法进行状态估计.

2) 当量测数据丢失时, 即火控网中心在 k 时刻未收到来自探测器 j 的量测数据, 则认为该数据丢失, 这样在子滤波器 j 中需引入Kalman预测技术^[8] 对丢失的量测值进行预测.

递推Kalman预报器为

$$\hat{X}_j(k+2|k+1) = \Phi \hat{X}_j(k+1|k) + K_{pj}(k+1) \cdot [Z_j(k+1) - h_j(\hat{X}_j(k+1|k))], \quad (16)$$

$$K_{pj}(k+1) = \Phi K_j(k+1). \quad (17)$$

其中 $K_{pj}(k)$ 叫做Kalman预报器增益.

3) 当量测数据延时达到时, 即在 $k+1$ 时刻收到了 $k-N$ 时刻的数据, 为了保证估计的最优性^[9], 则需要利用延时的量测数据 $Z_j(k-N)$ 来修正已经得到的状态估计 $\hat{X}_j(k|k)$ 和误差协方差 $P_j(k|k)$.

假设 $\Phi(k)$ 可逆, $\Phi(k-N, k) = \Phi(k, k-N)^T$, $\Phi(k, k-N) = \Phi(k, k-1) \cdots \Phi(k-N+1, k-N)$, 则可以得到一个新的估计器:

$$\hat{X}_j(k-N|k) = \Phi(k-N, k) \hat{X}_j(k|k), \quad (18)$$

$$\hat{Z}_j(k-N|k) = H_j(k-N) \Phi(k-N, k) \hat{X}_j(k|k). \quad (19)$$

这样, 最小方差意义下的最优子滤波器为

$$\hat{X}_j^*(k|k) = \hat{X}_j(k|k) + M_j [y_j(k-N) - \hat{y}_j(k-N|k)], \quad (20)$$

$$M_j = [P_j(k|k) \Phi(k-N, k)^T + P_j^{\tilde{x}\tilde{y}}] H_j(k-N)^T U_j^{-1}. \quad (21)$$

协方差为

$$P_j^*(k|k) = P_j(k|k) - [P_j^{\tilde{x}\tilde{\omega}} + P_j(k|k)]\Phi(k-N, k)^T \times H_j(k-N)^T U_j^{-1} H_j(k-N) \times [P_j^{\tilde{x}\tilde{\omega}} + P_j(k|k)\Phi(k-N, k)^T]^T. \quad (22)$$

其中:

$$U_j = H_j(k-N)\{\Phi(k-N, k)P_j(k|k)\Phi(k-N, k)^T \Phi(k-N, k)P_j^{\tilde{x}\tilde{\omega}} + [\Phi(k-N, k)P_j^{\tilde{x}\tilde{\omega}}]^T + Q(k-N, k)\}H_j(k-N)^T + R_j(k-N),$$

$$Q(k-N, k) = \Phi(k-N, k) \left[\sum_{i=1}^N \Phi(k, k-i+1) \times Q(k-i+1, k-i)\Phi(k, k-i+1)^T \right] \times \Phi(k-N, k)^T,$$

$$P_j^{\tilde{x}\tilde{\omega}} = - \sum_{i=1}^N B_i Q(k-i+1, k-i) \times [\Phi(k-N, k)\Phi(k, k-i+1)]^T,$$

$$B_i = [I - K_j(k)H_j(k)] \prod_{m=2}^i \Phi(k-m+2, k-m+1) \cdot [I - K_j(k-m+1)H_j(k-m+1)].$$

在利用延时的量测数据 $Z_j(k-N)$ 修正已有的状态估计 $\hat{X}_j(k|k)$ 时, 式(22)中已含有 $P_j(k|k)$, 故计算时将用式(22)提供的协方差取代式(12).

4 试验与分析(Experiments and analysis)

在网络化指挥控制系统试验平台^[10]下, 根据本文提出的系统体系结构, 构建了由1个火控网中心和3个作战单元组成的区域网络化防空火控系统.

针对低空高速小目标, 采用的滤波器模型为

$$X(k+1) = \Phi X(k) + GV(k), \\ Z(k) = h(X(k)) + W(k).$$

其中:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix}. \quad (24)$$

为了简化分析, 假设火控探测器的型号、性能相同, 测量周期为 $T = 0.2$ s. 目标在直角坐标系下匀速飞行, 飞行时间为20 s. 初始状态为

$$X(0) = [0, 0, 0, 200, 1000, 50]^T.$$

假设网络传输不可靠性引起的数据丢包对每个子滤波器都是相同的, 网络状态参数 $q = 0.7, p = 0.03$, 经判断子滤波器稳定. 表1中, $1\text{mil} = 0.06^\circ$.

表1 航迹误差统计表

	斜距离/m	方位角/mil	高低角/mil
探测器精度	8.00	1.50	1.00
探测器1	4.89	0.98	0.64
火控网中心	3.26	0.56	0.45

图5中, 虚线为单火控探测器对目标探测的位置误差, 实线为运用本文数据融合方法, 经火控网中心计算得到的目标数据的位置误差.

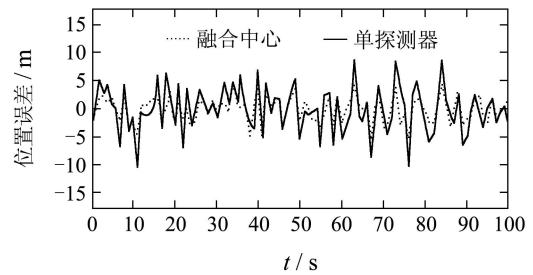


图5 位置误差对比图

Fig. 5 Comparison of position error

综合以上试验结果可以看出, 经多组测试, 在网络传输条件下系统仍能保持良好的融合效果, 融合后的数据精度明显优于单个火控探测器.

5 结语(Conclusion)

随着战争形式向网络中心战的转变, 防空作战网络化的优势和重要性越来越明显. 本文对网络化防空火控系统的体系结构和功能进行了研究与分析, 并在此基础上研究了基于联邦Kalman滤波技术的网络化航迹融合问题. 试验结果表明该方法可以有效地进行航迹融合, 同时能够对数据丢包和延时问题进行补偿, 融合后的数据精度能够满足系统的需求. 本文提出的概念和方法为网络化作战理论付诸实践奠定了良好的基础.

参考文献(References):

[1] 施荣. 国外网络化作战及其关键技术的进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(2): 206-210.
(SHI Rong. Development on the foreign networked centric warfare and key technologies[J]. Journal of CAEIT, 2007, 2(2): 206-210.)

- [2] 陈晨, 陈杰, 张娟. 网络化控制系统及其在火控系统中的应用研究[C] //第26届中国控制会议论文集. 张家界: 北京航空航天大学出版社, 2007, 6: 561 – 564.
(CHEN Chen, CHEN Jie, ZHANG Juan. Networked control system and its application in fire control system[C] // *Proceedings of the 26th Chinese Control Conference*. Zhangjiajie: Beihang University Press, 2007, 6: 561 – 564.)
- [3] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.
- [4] CARLSON N A. Federated square filter for decentralized parallel processes[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electric*, 1990, 26(3): 571 – 524.
- [5] 邱恺, 吴训忠, 张宗麟, 等. 全局最优联邦滤波器信息分配原则[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 39 – 44.
(QIU Kai, WU Xunzhong, ZHANG Zonglin, et al. Information-sharing scheme for federated filter with optimality[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 39 – 44.)
- [6] 柴霖. 联邦滤波器信息分配因子优选问题[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(8): 28 – 32.
(CHAI Lin. Study on optimized algorithm for information-sharing factors of federated filter[J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(8): 28 – 32.)
- [7] HUANG M Y, DEY S. Stability of Kalman filtering with Markovian packet losses[J]. *Automatica*, 2007, 43(4): 598 – 607.
- [8] 邓自立. 最优估计理论及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [9] XIA Y Q, SHANG J Z, CHEN J, et al. Data fusion over network[C] // *Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*. Kunming: Beihang University Press, 2008, 7: 452 – 456.
- [10] 北京理工大学. 计算机软件著作权登记证书. 名称: 网络化指挥控制系统仿真试验平台软件V1.0. 登记号: 2008SR11447, 中华人民共和国国家版权局.

作者简介:

陈杰 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统多目标优化与决策、智能控制、约束非线性控制等, E-mail: chenjie@bit.edu.cn;

陈晨 (1982—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为复杂网络系统多目标优化与决策, E-mail: cicixiaofan@sina.com;

夏元清 (1971—), 男, 教授, 目前研究方向为网络化信息处理与控制等, E-mail: xia_yuanqing@163.net;

张娟 (1976—), 女, 讲师, 目前研究方向为优化计算、约束非线性控制等, E-mail: zhjuan@bit.edu.cn.