

## 基于效能函数的自适应传感器跟踪资源分配

杨涛, 许蕴山, 肖冰松, 罗文涛  
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 针对基于效能函数的传感器管理算法存在的问题, 结合集中式序贯 Kalman 滤波算法, 将协方差自适应传感器管理算法应用到目标-传感器(组合)配对函数的计算中, 实现了传感器与目标配对系数的赋值与自动更新; 结合目标优先级函数, 提出了一种基于效能函数的自适应传感器分配算法。该算法的仿真结果表明, 有限的传感器资源既能够根据期望跟踪精度自适应分配, 又能够根据目标优先级动态地调整, 使传感器的分配策略更加合理有效。

**关键词:** 传感器管理; 效能函数; 序贯 Kalman 滤波; 协方差自适应; 目标优先级

**中图分类号:** V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0063-05

## Self-Adaptive Sensor Allocation Based on Efficacy Function

YANG Tao, XU Yun-shan, XIAO Bing-song, LUO Wen-tao

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The problem existed in the sensor management algorithm based on efficacy function was analyzed. By introducing the idea of centralized sequential Kalman Filter algorithm, the covariance self-adaptive sensor management algorithm was applied to the calculation of efficacy function and the automatic updating of sensor-target pairing coefficient was realized. Combined with target priority, a self-adaptive sensor allocation algorithm based on efficacy function was presented. The simulation showed that limited sensor resources can not only be distributed dynamically according to the expected precision, but also be adjusted based on the target priority, which makes the sensor allocation more reasonable and effective.

**Key words:** sensor management; efficacy function; sequential Kalman filter; covariance self-adaptation; target priority

### 0 引言

机载预警系统的主要任务是通过多种机载传感器及早发现、识别及跟踪空中和海(地)面目标。通过信息融合技术可将多个、异质传感器获得的信息进行协调、组合、互补以提高整体作战效能, 传感器管理正是整个信息融合闭环系统中的一个重要反馈模块。通过优化调度传感器资源, 有限的传感器资源会得到合理的分配, 从而有效改善信息融合的性能。

传感器管理的核心问题是根据一定的最优准则, 建立目标函数, 通过最优化目标函数来选定传感器的工作模式和参数。近年来围绕目标函数的定义, 国内

外学者提出了多种传感器管理准则。文献[1-2]对主要的传感器管理算法进行了分析, 并从信息熵的角度提出将目标权重和信息增量相结合作为分配效能; 文献[3]采用交互多模型运动建模, 推导出交互多模型下的传感器信息增量算法; 文献[4-5]提出利用协方差控制传感器资源, 实现对跟踪性能的直接控制; 在此基础上文献[6]将协方差控制与信息增量相结合, 从节省传感器资源的角度定义分配效能; 文献[7]利用随机有限统计工具, 建立了基于势分布概率假设密度滤波器的传感器管理统一构架, 为传感器管理提出一种新的方法。

针对效能函数方法中“目标-传感器(组合)”配对系数难以量化的问题, 本文从协方差控制的角度使用归一化距离函数和归一化滤波协方差为配对系数赋值, 并结合目标优先级函数确定“目标-传感器(组合)”的分配效能, 克服了效能函数方法在传感器管理中的使用瓶颈。

收稿日期: 2013-09-08

修回日期: 2013-10-12

基金项目: 空军工程大学航空航天工程学院科研创新基金预警机多传感器管理技术研究(XS1101011)

作者简介: 杨涛(1990-), 男, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为信息融合中的传感器管理。

## 1 传感器管理模型

### 1.1 传感器资源分配方案

多传感器多目标分配问题可以描述为线性规划问题。设有  $m$  个传感器,则需要考虑的传感器(组合)共有  $m' = 2^m - 1$  个,其中伪传感器有  $m' - m$  个,需要跟踪的目标数为  $n$ ,  $e_{ij}^a(p_{ij}^a, p_j^r)$  代表传感器  $i$  分配给目标  $j$  获得的效能。其中,  $p_{ij}^a$  是传感器  $i$  对目标  $j$  的配对函数,  $p_j^r$  是目标  $j$  的优先级函数,  $x_{ij} = 1$  表示传感器  $i$  分配给目标  $j$ ,反之  $x_{ij} = 0$  表示不分配,  $S_i$  表示传感器  $i$  的最大跟踪能力。基于效能函数的传感器资源分配方案如下所述。

目标函数为

$$E = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^n e_{ij}^a \cdot x_{ij} = \max \quad (1)$$

最大跟踪能力约束为

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i, \quad i = 1, 2, \dots, m' \quad (2)$$

目标覆盖约束为

$$\sum_{i=1}^{m'} x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

使用线性规划的方法,根据上述目标函数和约束条件即可求出最优解。

### 1.2 确定目标优先级函数

影响目标优先级的因素很多,通常主要考虑以下几个重要因素:目标身份  $I_D$ 、信息需求  $I_M$ 、目标威胁  $T_R$ 、攻击时机  $C_H$ 、火控需求  $F_R$ 、外部指令  $E_C$  等,由此定义优先级函数  $p^r(I_D, I_M, T_R, C_H, F_R)$ ,它的值由以上 5 个因素经过适当运算得到。 $p^r(\cdot)$  函数具体表达式的确定需要依据实际经验,无论函数形式如何,目标优先级的确定必须满足以下基本要求:1) 已被锁定的目标排在最前;2) 我方已能攻击的目标排在其次;3) 确认为敌方目标和状态不明的目标应靠后;4) 我方及友方目标排在最后;5) 外部指令优先级最高,取  $p^r(\cdot) = 1$ 。因此,最简单实用的表达式就是选择合理的系数将以上 5 个因素线性加权求和

$$p^r(I_D, I_M, T_R, C_H, F_R) = \alpha \times I_D + \beta \times I_M + \gamma \times T_R + \varepsilon \times C_H + \eta \times F_R \quad (4)$$

### 1.3 目标-传感器(组合)配对函数

目标-传感器(组合)配对函数  $p^a(x_1, x_2, \dots; y_1, y_2, \dots)$  的参数由两部分组成,一部分来自传感器的品质因素,另一部分来自目标数据的概率值。配对函数  $p^a(\cdot)$  的形式很难用一个具体的表达式来表示,在进行量化计算时,通常的方法是对照参数表直接赋值,这种方法的缺点在于无法实现目标-传感器(组合)配对函数值的自动更新。如何科学合理地量化配对函数

$p^a(\cdot)$  一直是制约效能函数方法在传感器资源分配中应用的瓶颈。

## 2 结合协方差自适应控制的效能函数分配算法

### 2.1 配对系数的确定

目标-传感器(组合)配对函数  $p^a(x_1, x_2, \dots; y_1, y_2, \dots)$  应该满足  $\max p^a(\cdot) = 1$  和  $\min p^a(\cdot) = 0$ , 传感器  $i$  对目标  $j$  的配对系数可以表示为  $p_{ij}^a(\cdot)$ 。采用协方差自适应控制的方法定义距离函数  $f(\mathbf{P}, \mathbf{P}_d)$ , 考虑使用归一化距离函数  $1 - \Delta f(\mathbf{P}, \mathbf{P}_d)$  和归一化滤波误差协方差范数  $\Delta \rho$  的加权和对  $p_{ij}^a(\cdot)$  赋值,配对系数可以定义为

$$p_{ij}^a = \alpha \times [1 - \Delta f(\mathbf{P}, \mathbf{P}_d)] + \beta \times \Delta \rho \quad (5)$$

其中,  $\Delta \rho = \|\Delta \mathbf{P}\|$ , 权值  $\alpha, \beta$  反映度量函数和滤波协方差对配对系数的影响,且有  $\alpha + \beta = 1$  ( $\alpha > 0, \beta > 0$ )<sup>[8]</sup>。通过确定距离函数  $f(\mathbf{P}, \mathbf{P}_d)$ , 就可以准确地量化配对函数  $p_{ij}^a(\cdot)$ , 从而实现配对系数的自动更新。

#### 2.1.1 协方差自适应控制

在考虑目标跟踪中的传感器资源最优化分配问题时,为了满足跟踪精度的要求,通常可以采用基于协方差矩阵(滤波误差协方差)自适应控制的传感器管理策略,这种算法的根本思想是通过定义实际滤波协方差矩阵  $\mathbf{P}$  与预先设置的期望协方差矩阵  $\mathbf{P}_d$  之间的距离函数  $f(\mathbf{P}, \mathbf{P}_d)$  来控制传感器资源分配,使实际滤波协方差逐渐逼近期望协方差,从而直接控制跟踪性能。

距离函数的实质是度量两个矩阵的差异,它的确有很多方法,如矩阵的谱范数、矩阵的绝对值求迹、矩阵的奇异值分解等,文献[9]将以上 3 种度量方法用于自适应协方差控制时的性能做了分析。综合比较而言,当期望协方差矩阵设为对角矩阵形式时,绝对值求迹法的效果要优于其他两种度量方法,本文正是采用这种方法确定距离函数。

由于协方差矩阵具有非负定性,假设  $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{A} = \mathbf{A}^T \geq 0$  和  $\mathbf{B} = \mathbf{B}^T \geq 0$ 。定义两个矩阵的差为  $\mathbf{M} = \mathbf{A} - \mathbf{B}$ , 则  $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T$ , 距离函数  $f(\mathbf{A}, \mathbf{B})$  可表示为

$$f(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \text{tr}(|m|) = \sum_{i=1}^n |m_{ii}| \quad (6)$$

距离函数中  $\mathbf{P}$  是通过 Kamlan 滤波的迭代公式计算得到的,当多个传感器被分配给一个目标时,每个传感器对目标量测的误差协方差不同,因此需要引入集中式多传感器 Kalman 序贯算法来解决传感器组合对目标量测的问题。

#### 2.1.2 集中式多传感器 Kalman 序贯算法

假设目标离散化状态方程表示为

$$\mathbf{x}(t_{k+1}) = \mathbf{F}(T_k)\mathbf{x}(t_k) + \mathbf{G}(T_k)\mathbf{w}(t_k) \quad (7)$$

式中： $\mathbf{x}(t_k)$  表示  $t_k$  时刻目标状态向量； $\mathbf{w}(t_k)$  是系统噪声向量，其协方差矩阵为  $\mathbf{Q}(t_k)$ ； $\mathbf{F}(T_k)$  是  $t_k$  时刻状态转移矩阵； $\mathbf{G}(T_k)$  是  $t_k$  时刻输入分布矩阵； $T_k = t_{k+1} - t_k$ ，为  $t_k$  时刻的采样间隔。

各传感器的量测方程为

$$z_j(t_k) = \mathbf{H}_j\mathbf{x}(t_k) + v_j(t_k), \quad j=1,2,\dots,m' \quad (8)$$

式中： $z_j(t_k)$  表示  $t_k$  时刻第  $j$  个传感器的量测向量； $v_j(t_k)$  是量测噪声，其协方差矩阵为  $\mathbf{R}_j(t_k)$ ； $\mathbf{H}_j$  是观测矩阵；噪声  $\mathbf{w}(t_k)$  和  $v_j(t_k)$  与初始状态  $\mathbf{x}(t_0)$  无关且统计独立。

对于伪传感器集合  $D$  中的任意一个伪传感器  $D_i$ ，集中式多传感器 Kalman 序贯算法为

$$(\mathbf{x}(t_k))^\dagger = \mathbf{x}(t_k^-) + (\mathbf{K}(t_k))^\dagger (z_i(t_k) - \mathbf{H}_i\mathbf{x}(t_k^-)) \quad (9)$$

$$(\mathbf{x}(t_k))^K = (\mathbf{x}(t_k))^{K-1} + (\mathbf{K}(t_k))^K \cdot (z_K(t_k) - \mathbf{H}_K\mathbf{x}(t_k))^{K-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{x}(t_k) = (\mathbf{x}(t_k))^N \quad (11)$$

其中，序贯增益可表示为

$$(\mathbf{K}(t_k))^\dagger = \mathbf{P}(t_k^-)\mathbf{H}_i^\top (\mathbf{R}_i(t_k) + \mathbf{H}_i\mathbf{P}(t_k^-)\mathbf{H}_i^\top)^{-1} \quad (12)$$

$$(\mathbf{K}(t_k))^K = (\mathbf{P}(t_k))^{K-1} (\mathbf{H}_K^\top (\mathbf{R}_K(t_k) + \mathbf{H}_K(\mathbf{P}(t_k))^{K-1}\mathbf{H}_K^\top)^{-1}) \quad (13)$$

状态估计协方差矩阵  $\mathbf{P}(t_k)$  为

$$(\mathbf{P}(t_k))^\dagger = (\mathbf{I}_n - (\mathbf{K}(t_k))^\dagger\mathbf{H}_i)\mathbf{P}(t_k^-) \quad (14)$$

$$(\mathbf{P}(t_k))^K = (\mathbf{I}_n - (\mathbf{K}(t_k))^K\mathbf{H}_K)\mathbf{P}(t_k)^{K-1} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}(t_k) = (\mathbf{P}(t_k))^N \quad (16)$$

预测值  $\mathbf{x}(t_k^-)$  和预测协方差矩阵  $\mathbf{P}(t_k^-)$  分别为

$$\mathbf{x}(t_k^-) = \mathbf{F}(T_{k-1})\mathbf{x}(t_{k-1}) \quad (17)$$

$$\mathbf{P}(t_k^-) = \mathbf{F}(T_{k-1})\mathbf{P}(t_{k-1})\mathbf{F}^\top(T_{k-1}) + \mathbf{G}(T_{k-1})\mathbf{Q}(t_{k-1})\mathbf{G}^\top(T_{k-1}) \quad (18)$$

其中， $(\cdot)^K$  表示经过了  $K$  个传感器处理， $K \in D_i$ 。

确定了配对系数  $p_{ij}^a(\cdot)$  和目标优先级函数  $p_j^r(\cdot)$ ，以此建立效能函数就可以计算出传感器  $i$  被分给目标  $j$  的效能。

### 2.2 建立目标-传感器(组合)效能函数

传感器  $i$  对目标  $j$  的效能定义为

$$e_{ij}(p_{ij}^a, p_j^r) = \omega \times p_{ij}^a + \xi \times p_j^r \quad (19)$$

配对系数越大，优先级越高的目标的效能函数值就越大。式中  $p_j^r = 1/p_j^t$ ，参数  $\omega$ 、 $\xi$  反映配对和优先级对效能的影响，基本的原则是优先级对效能函数值的影响必须大于配对系数的影响。文献[10]通过仿真对比给出了相对合理的取值： $\omega = 1/3$ ， $\xi = 2/3$ 。

结合基于效能函数的传感器管理模型，根据目标函数(式(1))和约束条件(式(2)~式(3))就可以确定传感器最优分配策略。

### 3 仿真分析

考虑 3 个传感器同时跟踪 4 个目标，每个传感器量测目标的位置坐标为  $(x, y)$ 。仿真周期设为 1 s，仿真时间为 100 s，其中传感器  $S_1$  在  $x$  方向上的跟踪精度较高；传感器  $S_2$  在  $y$  方向上的精度较高；传感器  $S_3$  在两个方向上跟踪精度都较低，跟踪能力是指传感器某一时刻能够跟踪的目标个数，相关系数反映了两个坐标之间噪声的相关程度。传感器之间任意组合，需要考虑的传感器(组合)共有  $2^3 - 1 = 7$  个。这 3 个传感器量测噪声参数的详细设置参见表 1。

表 1 各传感器量测噪声分析

Table 1 Measuring noise analysis of each sensor

传感器编号	$x$ 方向标准差/m	$y$ 方向标准差/m	相关系数	跟踪能力
$S_1$	9.23	20.9	-0.61	2
$S_2$	22.1	8.2	0.82	3
$S_3$	41.4	43.7	-0.94	4

目标优先级的量化考虑滤波协方差、身份信息、目标锁定、武器状态、型号信息等 5 个因素，当前时刻目标优先级量化值见表 2。

表 2 当前时刻目标优先级各因素量化值

Table 2 Current quantification of target priority

	滤波协方差	身份信息	目标锁定	武器状态	型号信息
$T_1$	0.45	1	0	0	0.853
$T_2$	0.50	0	0	0	0.106
$T_3$	0.60	1	0	0	0.734
$T_4$	0.80	1	0	0	0.808

目标在 0~50 s 内期望协方差为  $\mathbf{P}_{a1} = \mathbf{P}_{a2} = \mathbf{P}_{a3} = \mathbf{P}_{a4} = \text{diag}(30, 1, 30, 1)$ ，在 51~100 s 内，目标  $T_1$  的期望协方差设为  $\mathbf{P}_{a1} = \text{diag}(10, 0.3, 30, 1)$ ，目标  $T_2$  的期望协方差设为  $\mathbf{P}_{a2} = \text{diag}(30, 1, 10, 0.3)$ ，目标  $T_3$  的期望协方差设为  $\mathbf{P}_{a3} = \text{diag}(30, 1, 30, 1)$ ，目标  $T_4$  的期望协方差设为  $\mathbf{P}_{a4} = \text{diag}(10, 0.3, 10, 0.3)$ 。这 4 个目标的机动噪声协方差矩阵如下： $\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} 0.35 & 0 \\ 0 & 0.45 \end{bmatrix}$ ， $\mathbf{Q}_2 =$

$$\begin{bmatrix} 0.12 & 0 \\ 0 & 0.20 \end{bmatrix}$$

每个目标获得的传感器个数如图 1 所示。在 0~50 s 内 4 个目标的期望误差协方差较大，跟踪精度低，因此目标获得的资源以单个传感器为主；在 51~100 s 内目标 Ta1、目标 Ta2、目标 Ta4 的期望误差协方差减小，跟踪精度提高，目标获得的资源以传感器组合为主；同时由于目标 Ta2 的优先级最高，目标 Ta4 的期望误差协方差最小，因此在 51~100 s 内这两个目标获得的传感器资源趋于稳定。

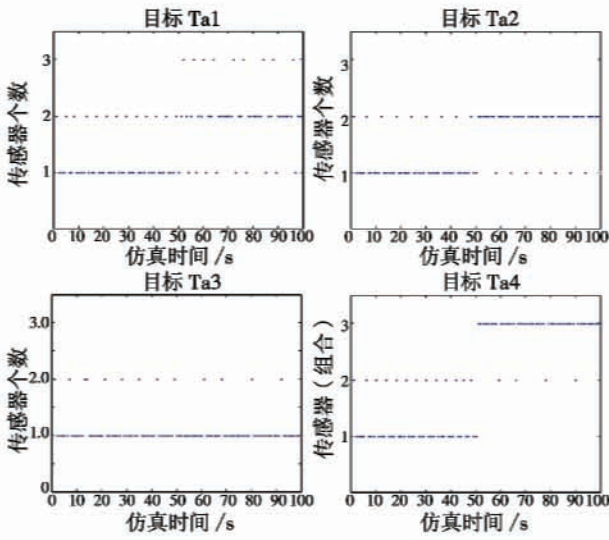


图 1 每个目标获得的传感器个数

Fig. 1 The number of sensors gained by each target

“目标 - 传感器(组合)”配对结果如图 2 所示。51 ~ 100 s 内,目标 1 在  $x$  方向的跟踪精度提高,通过仿真图 2 可以看出,包含传感器  $S_1$  的传感器组合  $S_5$ 、 $S_7$  被分配给目标 Ta1 的次数增多,但由于目标 Ta1 的优先级较低,且传感器  $S_1$  的跟踪能力最弱,因此无法持续占用传感器  $S_1$  的资源,传感器资源分配的结果也一直处于变化的状态;目标 Ta2 在  $y$  方向上的跟踪精度提高,包含传感器  $S_2$  的传感器组合  $S_6$  被分配给目标 Ta2,由于目标 Ta2 的优先级最高,因此目标 Ta2 在大部分时间内都可以占用传感器  $S_6$  的资源以满足  $y$  方向上的跟踪精度,传感器资源分配结果趋于稳定;目标 Ta3 在前后 50 s 内的跟踪精度没有变化,获得的传感器资源也最少;目标 Ta4 在  $x$  和  $y$  方向的期望误差协方差进一步减小,跟踪精度的提高使得算法在 50 s 之后分配给目标 Ta4 的是跟踪能力最强的传感器组合  $S_7$ 。

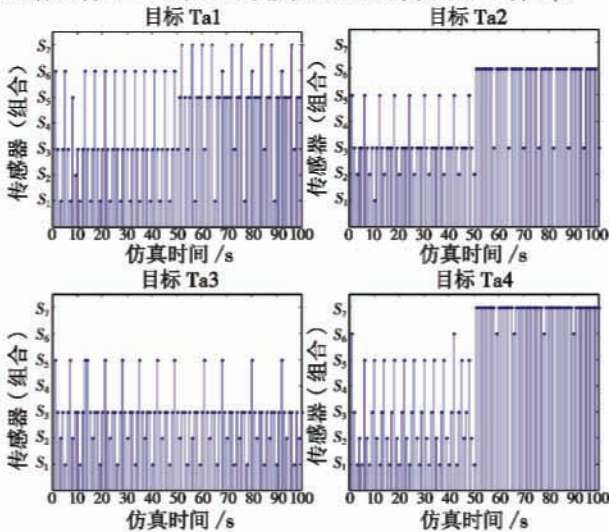


图 2 “目标 - 传感器(组合)”配对结果

Fig. 2 Matching result of “Target-Sensor”

各目标滤波协方差如图 3 所示。通过仿真图 3 可以看出,在 50 s 之后,由于跟踪精度提高,每个目标的滤波协方差都能够收敛到期望水平,基本达到自适应协方差控制的要求。由于在分配效能中引入了目标优先级函数,优先级最高的目标 Ta2 在 50 s 后获得的传感器资源最能够满足跟踪要求,由图 3 可以看出,对目标 Ta2 的跟踪效果明显好于目标 Ta1。以上仿真充分说明,本文提出的传感器分配算法可以依据协方差和目标优先级函数的变化动态合理地分配传感器资源。

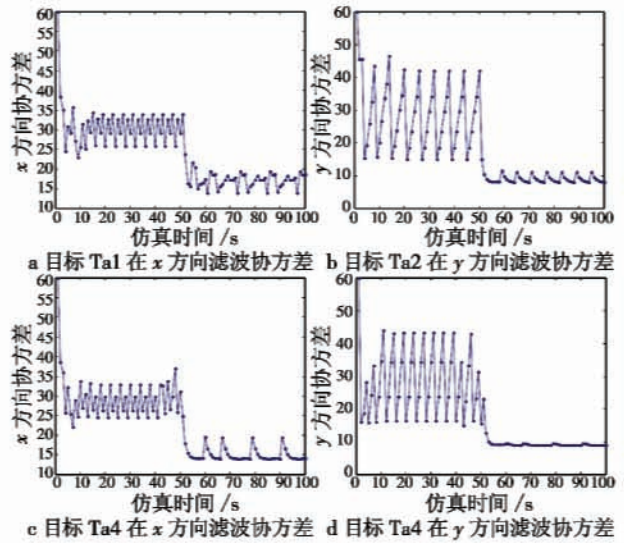


图 3 滤波协方差控制效果

Fig. 3 Covariance control effect

### 4 结论

本文针对机载预警系统中多传感器多目标跟踪的传感器资源分配问题,结合协方差自适应传感器管理算法的思想,实现了对传感器与目标配对系数的赋值与自动更新,解决了效能函数方法应用中的瓶颈,同时引入目标优先级函数,提出了一种基于线性规划的自适应传感器分配算法,并进行了算法仿真。仿真结果表明,该算法结合了协方差自适应控制和目标权重算法的优点,使有限的传感器资源既能够根据期望的跟踪精度自适应分配,又能够根据目标优先级动态调整,提高了传感器资源分配的合理性和有效性。

### 参考文献

[1] 刘先省,申石磊,潘泉. 传感器管理及方法综述[J]. 电子学报,2002(3):394-397.  
LIU X X, SHEN S L, PAN Q. A survey of sensor management and methods[J]. Acta Electronica Sinica, 2002(3): 394-397.

[2] 刘先省,周林,杜晓玉. 基于目标权重和信息增量的传感器管理方法[J]. 电子学报,2005(9):1683-1687.

- LIU X X, ZHOU L, DU X Y. A method of sensor management based on target priority and information gain [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005(9):1683-1687.
- [3] 姜佩琴, 潘泉, 梁彦, 等. 基于信息增量的机动目标传感器管理算法[J]. *火力指挥与控制*, 2008, 33(1):17-20.
- JIANG P Q, PAN Q, LIANG Y, et al. Information-gain based sensor management for maneuvering multi-targets [J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 33(1):17-20.
- [4] 周文辉, 胡卫东, 郁文贤. 基于 Riccati 方程的稳态传感器分配算法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2004(7):863-866.
- ZHOU W H, HU W D, YU W X. Steady-state sensor allocation algorithm based on Riccati equation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004(7):863-866.
- [5] 周文辉, 胡卫东, 郁文贤. 自适应协方差控制的传感器分配算法[J]. *信号处理*, 2005(1):57-62.
- ZHOU W H, HU W D, YU W X. An adaptive sensor allocation algorithm with covariance control [J]. *Signal Processing*, 2005(1):57-62.
- [6] 张广远, 王福军, 魏震生, 等. 一种协方差和信息增量联合控制的多传感器管理算法[J]. *电光与控制*, 2009(7):33-35.
- ZHANG G Y, WANG F J, WEI Z S, et al. A sensor management algorithm jointly controlled by covariance and information gain [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009(7):33-35.
- [7] MAHLER R. Unified sensor management using CPHD filters [C]//The 10th International Conference on Information Fusion, Minnesota, 2007:1-7.
- [8] 王放, 魏玺章, 黎湘. 一种改进的多传感器多目标跟踪中的传感器管理方法[J]. *电光与控制*, 2005, 12(2):11-13.
- WANG F, WEI X Z, LI X. An improved method of sensor management for multisensory multitarget tracking [J]. *Electronics Optics & Control*, 2005, 12(2):11-13.
- [9] 周文辉, 胡卫东, 余喜安, 等. 基于协方差控制的集中式传感器分配算法研究[J]. *电子学报*, 2003(12A):2158-2162.
- ZHOU W H, HU W D, YU X A, et al. A study of sensor allocation algorithm based on covariance control in centralized multisensor system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003(12A):2158-2162.
- [10] 刘先省. 传感器管理研究[D]. 西安:西北工业大学, 2000.
- LIU X X. Study of sensor management [D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2000.
- (上接第46页)
- Mechanics Conference and Exhibit, 2002:1-13.
- [4] 宗群, 田栢苓, 窦立谦. 基于 Gauss 伪谱法的邻近空间飞行器上升段轨迹优化[J]. *宇航学报*, 2010, 31(7):1775-1781.
- ZONG Q, TIAN B L, DOU L Q. Ascent phase trajectory optimization for near space vehicle based on Gauss pseudospectral method [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(7):1775-1781.
- [5] 雍恩米, 唐国金, 陈磊. 基于 Gauss 伪谱方法的高超声速飞行器再入轨迹快速优化[J]. *宇航学报*, 2008, 29(6):1766-1772.
- YONG E M, TANG G J, CHEN L. Rapid trajectory optimization for hypersonic reentry vehicle via Gauss pseudospectral method [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(6):1766-1772.
- [6] JORRIS T R. Common aero vehicle autonomous reentry trajectory optimization satisfying waypoint and no-fly zone constraints [D]. Ohio: Department of The Air Force Air University, 2007.
- [7] KARASZ W J. Optimal re-entry trajectory terminal state due to variations in waypoint locations [D]. Ohio: Department of The Air Force Air University, 2008.
- [8] PHILLIPS T H. A Common Aero Vehicle (CAV) model, description, and employment guide [R]. Technical Report, Schafer Corporation for AFRL and AFSPC, 2003, 2.
- [9] YONG E, TANG G J, CHEN L. Three-dimensional optimal trajectory for global range of CAV [C]//Harbin: The 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006:1396-1400.