

文章编号: 2010-0920(2012)05-0747-05

基于修正 Riccati 方程与 Kuhn-Munkres 算法的多传感器跟踪资源分配

童俊, 单甘霖

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 多传感器管理是对一组传感器或测量设备进行自动或半自动控制的一种处理过程, 它实现了整体性能的优化和资源的有效利用. 在建立多传感器管理中传感器资源分配一般数学模型的基础上, 研究基于修正 Riccati 方程与 Kuhn-Munkres 算法相结合的多传感器跟踪资源分配, 同时给出了目标-传感器最优分配解的求解步骤. 仿真结果表明了该方法的可行性.

关键词: 多传感器管理; 多传感器跟踪资源分配; 修正 Riccati 方程; 价值函数; Kuhn-Munkres 算法

中图分类号: TP391; TN95

文献标识码: A

Study of multi-sensor allocation based on modified Riccati equation and Kuhn-Munkres algorithm

TONG Jun, SHAN Gan-lin

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China.
Correspondent: TONG Jun, E-mail: tongjun.oec@163.com)

Abstract: Multi-sensor management can be described as a process that provides automatic or semi-automatic control of a suite of sensors or measurement devices, which can improve the whole performance and gives an effective usage of resources. This paper presents a general model of multi-sensor allocation, and a study of multi-sensor allocation based on modified Riccati equation and Kuhn-Munkres algorithm is provided. And the steps of solving optimization are given. Simulation results show the feasibility of this method.

Key words: multi-sensor management; multi-sensor allocation; modified Riccati equation; value function; Kuhn-Munkres algorithm

1 引言

随着传感器技术、信号检测与处理以及计算机技术的发展, 多传感器信息融合得到广泛应用. 多传感器管理作为信息融合中的一个新的研究领域, 其目的是对多个传感器或多模式单传感器按照某种最优准则进行适当管理, 以获得各具体特性(检测概率、跟踪精度等)的最优值.

多传感器资源分配是多传感器管理的重要研究内容, 它根据一定的最优准则实现目标与传感器的配对. 多传感器资源分配研究由 Nash^[1]首次提出, 使用线性规划确定目标与传感器的配对. 文献[2-3]将分辨力增量作为 Nash 线性规划目标函数中的传感器分配效用, 对传感器资源进行分配; [4]提出一种基于效

用函数的传感器管理方法, 其实质也是利用优化方法确定最优解; [5]利用协方差控制的策略, 通过设置期望协方差来分配传感器, 此方法最大特点是直接控制跟踪性能; [6-7]是从协方差控制的角度出发, 提出基于 Riccati 方程的稳态传感器分配算法, 并在此基础上研究了自适应协方差控制的传感器分配; [8]利用随机有限集统计学工具, 建立了一种基于势分布概率假设密度滤波器的传感器管理统一架构, 为传感器管理提出一种新方法.

本文以地面防空武器系统为背景, 首先建立了多传感器资源分配一般模型; 然后针对多传感器执行跟踪任务时的特点, 结合修正 Riccati 方程与 Kuhn-Munkres 算法, 研究了多传感器跟踪资源最优分配; 最

收稿日期: 2010-11-10; 修回日期: 2010-12-31.

基金项目: 军内科研基金项目.

作者简介: 童俊(1984—), 男, 博士生, 从事信息融合系统中传感器管理的研究; 单甘霖(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息融合与电子系统故障诊断的研究.

后通过仿真实验对本文方法进行了验证.

2 多传感器资源分配一般模型

在地面防空武器系统中,多传感器系统、火控系统、火力打击系统主要执行“搜索(检测)-跟踪-识别-截获-击毁”的动态过程,其中前3项主要由多传感器系统完成.在多传感器系统工作时,首先考虑空中目标的优先级.

2.1 目标优先级函数

影响目标优先级的因素很多,依据具体任务不同,侧重点也不同.当上级指示作用于目标时,目标优先级最高;当没有上级指示时,主要影响因素有:目标与我防御阵地中心的距离 D ,目标速度 v ,目标航向角 θ ,目标到达我方阵地的飞行时间 t 以及目标类型 ID.

定义目标 i 的优先级函数为 p_i ,其值是目标 i 在目标集中优先级排序位数的倒数,则 $p_i \in (0, 1]$.当上级指示作用于目标 i 时, $p_i = 1$;当没有上级指示作用于目标时, $p_i = p(D, v, \theta, t, \text{ID})$.

2.2 目标-传感器分配效能函数

目标-传感器资源分配时,需要考虑分配效能最大,这就需要对分配效能进行建模.定义目标 i 对传感器 j 的分配效能函数为 q_{ij} .

q_{ij} 由传感器 j 对目标 i 执行任务时的价值函数 V_{ij} 和目标 i 对传感器 j 的损耗函数 C_{ij} 两部分组成,其数学表达式为

$$q_{ij} = \alpha V_{ij} + \beta C_{ij}. \quad (1)$$

其中: α, β 为加权系数,且 $\alpha + \beta = 1$.

价值函数 V_{ij} 一般根据具体任务的需求定义,主要有以下3种:

1) 目标检测: V_{ij} 描述为传感器 j 对目标 i 的检测概率 p_d 和虚警概率 p_f ;

2) 目标跟踪: V_{ij} 描述为传感器 j 对目标 i 的跟踪精度,主要用跟踪误差协方差阵及相应矩阵度量值表示;

3) 目标识别: V_{ij} 描述为传感器 j 对目标 i 的识别概率 P_S .

损耗函数 C_{ij} 主要是指进行分配后给整个多传感器系统乃至我防御阵地带来的损失.主要有:

1) 目标 i 分配给传感器 j 后,使传感器 j 无法再对其他目标执行任务.例如:火控雷达一旦跟踪某一目标,就无法对其他目标进行跟踪,直至目标被击毁或飞离我方阵地.

2) 目标 i 分配给传感器 j 后,容易造成整个防御阵地生存概率的下降.例如:火控雷达在执行任务时易暴露自身,从而受到反辐射导弹的袭击.

2.3 多传感器资源分配一般模型

定义目标-传感器分配矩阵 X ,其元素为 x_{ij} .当目标 i 与传感器 j 配对成功时, $x_{ij} = 1$;否则, $x_{ij} = 0$.

对于地面防空武器系统,多传感器系统作战总效能

$$E_f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_i q_{ij} x_{ij}). \quad (2)$$

此时,多传感器资源分配一般模型可描述为:在一定约束条件下,求满足下式的目标-传感器分配矩阵 X :

$$E_f = \max. \quad (3)$$

约束条件如下:

1) 每个传感器(如火控雷达)只能作用于一个目标,即 $\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n$.

2) 每个目标至少被一个传感器所执行任务,即 $\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq 1, i = 1, 2, \dots, m$.

3 基于修正 Riccati 方程的多传感器跟踪资源分配模型

3.1 基于 Kalman 滤波的修正 Riccati 方程

设目标状态方程为

$$x_{k+1} = Fx_k + Gw_k, \quad (4)$$

传感器量测方程为

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (5)$$

其中: x_k 为目标状态; z_k 为量测; F 为系统矩阵; G 为过程噪声分布矩阵; H 为量测矩阵; w_k, v_k 分别为过程噪声与量测噪声.

假设传感器检测概率为 $p_d, p_d \in (0, 1]$.根据文献[9],修正 Kalman 滤波器协方差阵为

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - p_d K_k H P_{k|k-1}. \quad (6)$$

此时修正 Kalman 滤波器迭代式为

$$\begin{cases} K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1}, \\ P_{k|k} = P_{k|k-1} - p_d K_k H P_{k|k-1}, \\ P_{k+1|k} = F P_{k|k} F^T + G Q G^T. \end{cases} \quad (7)$$

其中: K_k 为滤波增益, $P_{k|k-1}$ 为预测协方差阵, $P_{k|k}$ 为滤波协方差阵.

对式(7)进行相应处理可得

$$\begin{aligned} P_{k+1|k} = & F P_{k|k-1} F^T - p_d F P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1} \\ & H P_{k|k-1} F^T + G Q G^T. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)称为修正 Riccati 方程,当 $p_d = 1$ 时,为严格意义上的 Riccati 方程.对于 Kalman 滤波器,滤波协方

差最终要趋于稳态解, 同样基于修正 Riccati 方程的 Kalman 滤波协方差也会趋于稳态解.

修正 Riccati 方程稳态滤波协方差的求解步骤如下:

Step 1: 已知 $P_{1|0} = P_1$, 并取一充分小的门限值 ε ;

Step 2: 对式 (8) 进行反复迭代;

Step 3: 若 $\|P_{k+1|k} - P_{k|k-1}\| < \varepsilon$, 即 $P_{k+1|k} - P_{k|k-1}$ 的某种范数意义下小于 ε , 则迭代结束, 此时稳态预测协方差 $P = P_{k+1|k}$;

Step 4: 稳态预测协方差确定后, 将其代入式 (7), 可计算出稳态滤波误差协方差.

3.2 多传感器跟踪资源分配模型

根据多传感器资源分配一般模型, 当传感器执行跟踪任务时, 价值函数 V_{ij} 描述为对目标的跟踪精度, 用滤波误差协方差或其某种矩阵度量来表示. 因此, 本文用基于修正 Riccati 方程的稳态滤波误差协方差的迹(主对角线上元素之和)的相反数来描述价值函数 V_{ij} .

假设目标 i 对传感器 j 的稳态滤波误差协方差为 P_{ij} . 对于跟踪精度, 滤波误差协方差阵的迹越小, 对应的跟踪误差就越小, 反映的跟踪精度越高. 为了获得作战效能最大值, 取

$$V_{ij} = -\text{trace}(P_{ij}). \quad (9)$$

此时暂不考虑传感器的损耗函数 C_{ij} , 且取 $\alpha = 1$, 则式 (1) 演变为

$$q_{ij} = V_{ij} = -\text{trace}(P_{ij}). \quad (10)$$

相应的多传感器跟踪资源分配模型演变为求使

$$E_f = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_i \text{trace}(P_{ij}) x_{ij}) \quad (11)$$

成立的目标-传感器分配矩阵 X , 约束条件不变. 不难看出, 多传感器跟踪资源分配模型确立后, 只需选择合适的优化方法, 即可求出最优解.

4 基于 Kuhn-Munkres 算法的多传感器跟踪资源最优分配

4.1 Kuhn-Munkres 算法

Kuhn-Munkres 算法是基于图论的一种优化算法, 用来解决最优分配问题. 其基本思想^[10]是: 设有二分类 (X, Y) 的赋权二分图 $G = (V, E)$. 其中: 两部顶点集分别为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 并且给任意边 $x_i y_j$ 赋权 $w_{ij} = w(x_i y_j)$. 设 L 为二分图 G 的顶点集 V 到实数集 R 的映射, 若对任意 x, y , 均有

$$L(x) + L(y) \geq w(xy), \quad (12)$$

则称 L 为 G 的可行顶点标记. 令

$$E_L = \{xy | e = xy \in E(G), L(x) + L(y) = w(e)\}, \quad (13)$$

称以 E_L 为边集的二分图 G 的生成子图为 G 的相等子图, 记为 G_L .

定理 1 若二分图 G 的相等子图 G_L 有最优分配, 则该分配是图 G 的最大权分配.

证明 设 M^* 是 G_L 的最优分配, 则 M^* 也是 G 的最优分配, 即

$$w(M^*) = \sum_{e \in M^*} w(e) = \sum_{v \in V(G)} L(v); \quad (14)$$

另一方面, 若 M 是 G 的任意一个分配, 则有

$$w(M) = \sum_{e \in M} w(e) \leq \sum_{v \in V(G)} L(v). \quad (15)$$

联合式 (14) 与 (15), 有

$$w(M^*) \geq w(M). \quad (16)$$

故 M^* 是图 G 的最大权分配. \square

上述定理表明, 欲求二分图的最优分配只需求其相等子图的最优分配. Kuhn-Munkres 算法用于解决这一问题, 它反复修改顶点标记, 使新的相等子图的最大权分配逐渐扩大, 直到最终出现相等子图的最优分配.

4.2 基于 Kuhn-Munkres 算法的多传感器跟踪资源分配

根据 Kuhn-Munkres 算法的基本思想, 结合多传感器跟踪资源分配模型的特点, 得到以下计算步骤:

Step 1: 根据目标、传感器数目确定赋权二分图 $G = (V, E)$. 其中: 两端顶点集分别为目标集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 多传感器集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. 任意边的权值为 $w_{ij} = p_i q_{ij}$, 目标-传感器分配矩阵 X 为图的分配矩阵, 作战总效能 E_f 为最优分配时的权值和.

Step 2: 假设 L 是一个初始可行顶点标记, 取其为

$$\begin{cases} L(t) = \max_{s \in S} (p_t q_{ts}), t \in T; \\ L(s) = 0, s \in S. \end{cases} \quad (17)$$

依据定理 1, 设 X 为图 G 的相等子集 G_L 的一个分配. 若 T 的每个点都是 X 的饱和点, 则 X 就是所求目标-传感器分配矩阵; 否则, 取 X 的非饱和点 $u \in T$, 令 $A = \{u\}$, $B = \emptyset$, 转入 Step 3.

Step 3: 记 $N_L(A) = \{v | u \in A, uv \in E_L\}$. 若 $N_L(A) = B$, 则 G_L 没有最优分配, 转 Step 4; 否则, 转入 Step 5.

Step 4: 调整可行顶点标记, 计算

$$c_L = \min\{L(t) + L(s) - F(ts) | t \in A, s \in S \setminus B\}. \quad (18)$$

由此可得新的可行顶点标记为

$$\begin{cases} H(v) = L(v) - c_L, v \in A; \\ H(v) = L(v) + c_L, v \in B; \\ H(v) = L(v), \text{ other.} \end{cases} \quad (19)$$

令 $L = H, G_L = G_H$, 重新给出 G_L 的一个分配 X , 转 Step 2.

Step 5: 取 $s \in N_L(A) \setminus B$, 若 s 是 X 的饱和点, 转 Step 6; 否则, 转 Step 7.

Step 6: 设 $ts \in X$, 则令 $A = A \cup \{t\}, B = B \cup \{s\}$, 转 Step 3.

Step 7: 在 G_L 中的 (u, s) 路是 X 增广路, 记为 P , 并令 $X = X \oplus P$, 转 Step 2, 最终求得 X .

5 仿真与分析

假设在平面内作匀速直线运动的 6 个目标, 其状态向量记为 $[x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T$, 两坐标轴上的加速度为相互独立的零均值白噪声. 各目标运动与我方阵地的位置关系如图 1 所示. 图中: 圆圈表示目标初始位置, 五角星表示我方防御阵地位于中心位置. 假设已知目标优先级排序 $T_2 > T_4 > T_3 > T_5 > T_1 > T_6$, 且每个目标只被一部雷达跟踪.



图 1 各目标运动与我方阵地的位置关系

仿真实验中设计 6 部火控雷达, 每部火控雷达测量目标的位置坐标为 (x, y) . 其量测噪声参数设置如表 1 所示. 设各火控雷达同步采样, 采样周期为 1 s, 采样时间为 100 s, 且每部雷达只跟踪一个目标.

表 1 各火控雷达量测噪声参数 m

雷达编号	x 标准差	y 标准差	相关系数	检测概率
S_1	21.1	8.2	0.82	0.98
S_2	20.3	9.1	-0.74	0.90
S_3	8.22	20.3	0.78	0.89
S_4	9.23	20.9	-0.61	0.85
S_5	31.6	18.1	-0.65	0.90
S_6	19.1	30.1	0.74	0.95

由于各雷达量测噪声协方差阵是对称正定的, 传感器观测的不确定性可用几何图形表示. 对于任意给定的对称正定阵 $R > 0$, 与之对应的不确定性椭球体为

$$\text{ellipsoid}(R) = \{x | x^T R^{-1} x \leq 1, x \in R^n\}. \quad (20)$$

对于平面运动目标 $n = 2$, 量测噪声协方差阵的不确定性用椭圆来描述, 椭圆所围成的面积越小, 传感器

的量测精度越高. 对于表 1 中的 6 部火控雷达相应的不确定性椭圆如图 2 所示.

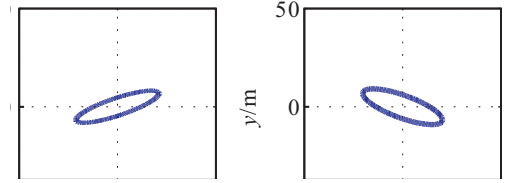


图 2 各火控雷达对应的不确定性椭圆

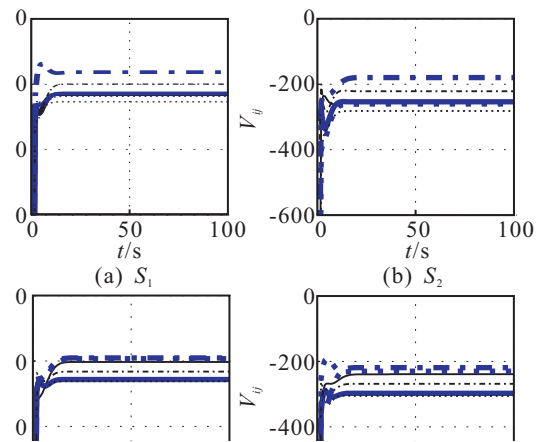


图 3 各雷达对应各目标价值函数与时间关系

根据修正 Riccati 方程, 结合各雷达相应量测噪声与检测概率, 计算出各时刻 6 部雷达分别与各目标的滤波误差协方差阵, 并对其求迹取反, 可得各雷达对应各目标价值函数与时间的关系, 如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 各价值函数均能经过一段时间后进入稳态, 这是因为修正 Riccati 方程的解最后趋于稳态值.

在获得各价值函数稳态值后, 将其代入式 (11), 并结合各目标的优先级函数确定 E_f ; 然后利用 Kuhn-Munkres 算法求解最优分配矩阵 X 以及相应的最大 E_f . 在 Matlab 环境下进行仿真, 有

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, E_{f \max} = -538.0. \quad (21)$$

Kuhn-Munkres 算法计算时间为 0.022 043 s. 根据 X 值, 可得目标-雷达分配方案图, 如图 4 所示.

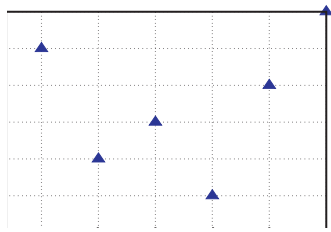


图 4 目标-雷达分配关系图

由图 2 可以看出, 雷达 S_1, S_2 的精度高于 S_3, S_4 ; S_3, S_4 高于 S_5, S_6 . 从图 1 显示的各目标运动情况来看, 目标 2 和目标 4 距离我方防御阵地最近, 且二者优先级较高, 应使用跟踪精度最高的火控雷达; 目标 3, 目标 5, 目标 1 和目标 6 距离我方阵地等距, 但目标 3 和目标 5 的优先级较高, 应使用跟踪精度次高的火控雷达; 目标 1 和目标 6 距离远且优先级低, 应使用跟踪精度较低的火控雷达. 而由图 4 可知, 目标 2-雷达 2, 目标 4-雷达 1, 目标 3-雷达 3, 目标 5-雷达 4, 目标 1-雷达 5, 目标 6-雷达 6, 正符合实际情况, 且此时多传感器系统作战总效能最大.

6 结 论

本文对多传感器资源分配模型进行了统一描述, 针对多传感器跟踪资源最优分配问题, 建立了以稳态协方差阵为基础的数学模型, 并结合基于图论的优化算法, 给出了求解步骤. 仿真结果表明, 本文方法简单

可行有效. 但是, 该方法是一种开环式的多传感器跟踪资源分配, 即它只需离线计算出各传感器与各目标之间的稳态滤波协方差, 进行预先分配目标. 因此, 在此基础上研究自适应在线多传感器跟踪资源的调度是下一阶段的重点与难点.

参考文献(References)

- [1] Nash J M. Optimal allocation of tracking resource[C]. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control. Alifornia, 1977: 1177-1180.
- [2] Schmaedeke W. Information based sensor management[C]. Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition II. Orlando, 1993, 1955: 156-164.
- [3] Schmaedeke W, Kastella K. Information based sensor management and IMMKF[C]. Signal and Data Processing Small Targets. Orlando, 1998, 3373: 390-401.
- [4] Liu Xian-xing, Pan Quan, Zhang Hong-cai, et al. Study on algorithm of sensor management based on functions of efficiency and waste[J]. Chinese J of Aeronautics, 2000, 13(1): 39-44.
- [5] Kalandros M, Pao L Y. Controlling target estimate covariance in centralized multisensor systems[C]. Proc of American Control Conf. Philadelphia, 1998: 2749-2753.
- [6] 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, 26(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, 26(7): 863-866.)
- [7] 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, 21(1): 57-62.
(Zhou W H, Hu W D, Yu W X. An adaptive sensor allocation algorithm with covariance control[J]. Signal Processing, 2005, 21(1): 57-62.)
- [8] Mahler R. Unified sensor management using CPHD filters[C]. The 10th Int Conf on Information Fusion. Minnesota, 2007: 1-7.
- [9] Boers Y, Driessen H, Nederland T. Results on the modified Riccati equation: Target tracking application[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 379-384.
- [10] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其 Matlab 实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 101-102.
(Wang H Y, Huang Q, Li C T, et al. Graph theory algorithm and Matlab realization[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 101-102.)