

文章编号: 1001-0920(2006)05-0517-04

一种基于联合信息增量的网络级传感器管理算法

王峰, 潘泉, 梁彦, 程咏梅, 张洪才
(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘要: 针对网络级传感器管理问题, 提出一种基于联合信息增量的集中式网络多平台传感器管理算法。该算法充分考虑了网络通信故障、通信延迟以及配准误差等因素。仿真研究表明, 该算法性能优于轮流分配算法, 且分配结果随通信因素的变化规律符合实际物理意义。

关键词: 联合信息增量; 多平台; 传感器管理; 网络通信

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Network Level Sensor Management Algorithm Based on Joint Information Gain

WANG Feng, PAN Quan, LIANG Yan, CHENG Yongmei, ZHANG Hongcai

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China Correspondent: WANG Feng, E-mail: fomykoala@hotmail.com)

Abstract: To the problem of network level sensor management, a centralized network multiplatform sensor management algorithm based on joint information gain is proposed. The impact of communicating faults, delay and calibration error on the algorithm is considered. Simulation results show that this algorithm is better than the alternate allocating algorithm and the tendency of allocating results evolving with these communicating factors agrees with the physical rule.

Key words: Joint information gain; Multiplatform; Sensor management; Network communication

1 引言

近10年来, 传感器管理得到了越来越多的关注。传感器管理可以分为单传感器管理、单平台多传感器管理、多平台多传感器管理等, 其中多平台多传感器管理应用于在地理上分布的多传感器或传感器平台组成的网络, 又称为网络级管理^[1]。网络级管理与单平台多传感器管理的差异主要体现在前者要受到通信带宽、通信延迟以及故障等网络特性的影响。

传感器网络的发展以及“网络中心战”的需求, 对传感器管理问题提出了新的挑战, 使得网络级传感器管理成为传感器管理的研究重点和难点。

目前, 国内外已有的研究成果主要是基于单平台多传感器的管理算法^[2-8], 而对于网络级传感器

管理问题的研究成果还很少见, 且主要是针对网络多平台传感器管理系统的建模^[9-12]。本文将考虑一些典型的网络特性, 在此基础上提出一种网络级传感器管理算法。

2 集中式网络多平台传感器管理结构

在传感器或传感器平台数量不太多的网络系统中, 为了能够获得良好的系统性能, 往往对多传感器或传感器平台进行集中式控制。

在集中式传感器管理系统结构中, 传感器管理功能在决策中心实现, 通过控制网络中多平台传感器的动作, 以获得整体分配效能的最优。基于效能函数的集中式多传感器多目标分配准则为^[13]

$$U^*(k) = \arg \max_{U, u} J(U, k), \quad (1)$$

收稿日期: 2005-04-14; 修回日期: 2005-05-31

基金项目: 国防科技“十五”预研课题项目(102010302); 国家自然科学基金项目(60404011)

作者简介: 王峰(1978—), 男, 南京人, 博士生, 从事传感器管理、信息融合等研究; 潘泉(1961—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 从事信息融合理论与应用、自适应滤波等研究。

其中: $J(U_l, k)$ 为多传感器分配方案下获得的联合效用; $U_l = \{u_{1,l}, u_{2,l}, \dots, u_{s,l}\}$ 为第 l 种多传感器分配方案; 每种传感器动作集合方案包含了所有传感器的动作, U 为所有可能的多传感器动作集合方案

3 基于联合信息增量的集中式网络级传感器管理算法

3.1 目标跟踪中的联合信息增量计算

假设网络由 S 个传感器组成, 其覆盖区域内在 k 时刻有 T 个目标, 且 T 个目标的状态为 $X^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_{T-1}^k, x_T^k\}$, k 时刻的观测集为 $Z^k = \{z^1, z^2, \dots, z^k\}$.

联合信息增量(JIG)为量测执行前后的多目标联合信息熵之差, 其表达式为

$$I(X^{k-1}, X^k, Z^k) = \sum_{i=1}^T H(x_i^k | x_i^{k-1}) - \sum_{i=1}^T H(x_i^k | z_i^k). \quad (2)$$

假设同一时刻一个传感器只能分配给一个目标, 则 k 时刻的量测数为 S 个. 对于那些没有获得传感器资源分配的目标, 传感器量测前后的联合信息熵保持不变, 此时, 式(2)变为

$$I(X^{k-1}, X^k, Z^k) = \sum_{i=1}^S H(x_i^k | x_i^{k-1}) - \sum_{i=1}^S H(x_i^k | z_i^k). \quad (3)$$

假设随机变量 x 的概率密度 $p(x)$ 服从正态分布, 相应的信息熵为^[7]

$$H(x) = - \int p(x) \log(p(x)) dx = \frac{1}{2} \log(2\pi e \sigma^2). \quad (4)$$

目标跟踪中, 传感器量测前的信息熵为

$$H(x_{i,l}(k | k-1)) = \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}(k | k-1)), \quad (5)$$

传感器量测后的信息熵为

$$H(x_{i,l}(k | k)) = \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}(k | k)). \quad (6)$$

其中: $P_{i,l}(k | k-1)$, $P_{i,l}(k | k)$ 分别为 k 时刻第 l 种传感器动作集合方案中传感器 i 所分配目标的状态预测误差协方差阵和状态估计误差协方差阵

将式(5), (6)代入(3), 得量测前后的联合信息增量为

$$I(X^{k-1}, X^k, Z^k) = \sum_{i=1}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}(k | k-1)) - \sum_{i=1}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}(k | k)). \quad (7)$$

3.2 集中式网络级传感器管理算法

传感器管理的目的之一是通过与目标环境的交互, 获取目标的相关信息, 以降低目标的不确定性而信息增量是信息量的一种度量方式

目标跟踪中, 联合信息增量反映了多传感器资源对多目标分配前后获得的关于多目标的信息量, 因此可以作为集中式传感器管理方案中的联合效用, 则第 l 种传感器动作方案的联合效用为

$$J(U_l, k) = I(X^{k-1}, X^k, Z^k | U_l) = \sum_{i=1}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}^{U_l}(k | k-1)) - \sum_{i=1}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}^{U_l}(k | k)). \quad (8)$$

上述分配算法并没有考虑网络特性, 因而仅适用于单平台多传感器系统. 在实际网络多平台系统中, 网络中的很多特性都会对传感器管理算法产生重要影响. 下面将研究网络通信故障、网络通信延迟以及网络配准误差等因素对该算法带来的影响

1) 网络通信故障

战场环境中, 由于敌方的电子干扰以及环境干扰等因素, 网络中时常出现传感器无法工作(如雷达由于受到敌方反辐射导弹的威胁而选择静默)、传感器平台与中心平台通信中断等现象

假设 k 时刻网络中有 S_1 个传感器失效, 不妨认为这 S_1 个失效传感器的集合为 S_F , 此时, 网络中的传感器数量由 S 个变为 $S - S_1$ 个, 则第 l 种传感器资源决策方案下的联合信息增量为

$$I(X^{k-1}, X^k, Z^k | U_l) = H(X^k | X^{k-1}) - H(X^k | Z^k) = \sum_{i=1, i \notin S_F}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}^{U_l}(k | k-1)) - \sum_{i=1, i \notin S_F}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,l}^{U_l}(k | k)). \quad (9)$$

2) 网络通信延迟

网络通信延迟是网络传输中的另一种常见现象, 尤其是当通信资源有限或传感器观测数据量很大时, 通信延迟会比较明显. 由于系统对传感器管理的实时性要求较高, 在进行传感器资源分配决策时, 如果发生量测通信延迟, 则不妨认为该量测丢失

由于通信延迟带来了量测丢失, 使得目标状态估计误差协方差有所增大, 因此联合信息增量也将发生变化, 从而导致不同的传感器资源分配结果

3) 配准误差

多平台网络中由于各传感器平台所处的空间位置不一样, 获得目标量测的时间也不一致, 因而当传感器平台将信息传送到中心平台时, 首先需要有多

平台信息进行时空配准 时空配准统一了来自不同平台量测的时空坐标,但一般也会引入误差源,不妨将配准误差等效为传感器量测误差的函数

定义 1 配准误差函数

$$e_i^R = f(e_i), \quad (10)$$

其中 e_i 为平台 i 的传感器量测误差

引入配准误差 e_i^R 后,平台 i 的量测误差变为

$$e_i^m = e_i + e_i^R. \quad (11)$$

由于数据配准引入了新的量测误差,使得目标状态估计误差协方差增大,因此联合信息增量也发生了变化,从而导致不同的传感器资源分配结果

考虑上述通信因素,则网络级传感器资源决策方案 U_i 下的联合信息增量为

$$I(k, U_i, S_F, D, E) = \sum_{i=1, i \in S_F}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,b_r,E_i}^U(k|k-1)) - \sum_{i=1, i \in S_F}^S \frac{1}{2} \log(2\pi e P_{i,b_r,E_i}^U(k|k)), \quad (12)$$

其中: S_F 为通信故障因素, D 为通信延迟因素, E 为配准误差因素

4 仿真研究

考虑分布在不同地理位置上的 2 个传感器共同探测 4 个目标,仿真时间为 100 s,传感器的采样周期为 0.1 s,对应仿真拍数 1 000 拍.传感器 1 与传感器 2 的量测噪声标准差均为 (200, 150, 80)m.滤波器采用 MMKF 算法,模型分别为 CV, CA 模型. CV 模型系统噪声为 5 m/s^2 , CA 模型系统噪声为 40 m/s^3 ,模型初始概率为 [0.5, 0.5],马尔可夫转移概率矩阵为 [0.98, 0.02; 0.02, 0.98]

目标 1: 初始位置 (160, -130, 20)km, 初始速度 (-180, 120, 0)m/s, 在 0~20 s, 41~100 s 内作匀速运动; 在 21~40 s 内作匀加速运动, 加速度 (40, 30, 0)m/s². 目标 2: 初始位置 (150, 120, 8)km, 初始速度 (-120, -185, 0)m/s, 在 0~100 s 内作

匀速运动. 目标 3: 初始位置 (140, -80, 5)km, 初始速度 (-250, -300, 0)m/s, 在 0~60 s, 81~100 s 内作匀速运动; 在 61~80 s 内作匀加速运动, 加速度 (40, 30, 0)m/s². 目标 4: 初始位置 (170, 100, 14)km, 初始速度 (-120, -150, 0)m/s, 在 0~100 s 内作匀速运动

4.1 集中式方案与轮流分配方案比较

对于集中式传感器管理系统结构,传感器之间进行资源联合管理,以联合信息增量作为联合分配的效能.仿真中采用如下假设:同一时刻至多只能分配一个传感器给同一个目标

基于联合信息增量的集中式和轮流分配管理方案的仿真结果见表 1.

由表 1 可以看出,在联合信息增量算法的分配结果中,无论目标是否作机动,其跟踪精度都比在轮流分配方案下的跟踪精度有较大程度的提高,这是由于该算法是在多传感器联合效用的基础上进行资源分配,具有全局最优性质

4.2 网络通信对传感器管理的影响

假设以平台 1 为决策中心,平台 2 向平台 1 传输数据,传感器的采样周期均为 0.1 s.考虑以下情况:平台 1 在对平台 2 的量测数据进行配准时引入了误差源,假设该误差服从 $N(0, \lambda\sigma_2^2)$ 的正态分布.其中: σ_2^2 为传感器 2 的量测误差方差, λ 为配准误差系数;当某时刻发生通信延迟时,认为该时刻平台 2 的数据丢失, F_d 为数据延迟发生频度;当网络通信故障或传感器平台 2 无法工作时,认为该平台失效, T_f 为失效起始时刻,此后无法继续向平台 1 传送数据

分别对上述情况进行仿真研究,结果见表 2.

分析表 2 中数据,以 RMSE 指标为例.随着配准误差系数的增大,机动目标的 RMSE 有较大幅度的增加,而非机动目标的 RMSE 增加幅度较小;随着数据延迟频度的增大,4 个目标的 RMSE 都有所增加;随着网络通信故障时间的延长,目标的 RMSE

表 1 联合信息增量法和轮流分配法的性能比较

($t = 0.1 \text{ s}$)

分配策略	目标	ME/km	RMSE/km	RME	RRMSE	SN
轮流分配	1	0.072 57	0.093 381	0.000 354 44	0.000 456 28	0.503 75
	2	0.050 516	0.064 059	0.000 278 65	0.000 354 13	0.352 48
	3	0.067 62	0.088 422	0.000 420 16	0.000 548 51	0.476 82
	4	0.051 357	0.065 037	0.000 272 55	0.000 345 55	0.344 4
联合信息增量	1	0.063 26	0.085 979	0.000 307 78	0.000 420 01	0.463 48
	2	0.042 82	0.054 632	0.000 236 17	0.000 301 99	0.298 96
	3	0.060 479	0.081 745	0.000 375 69	0.000 506 98	0.440 3
	4	0.040 088	0.051 234	0.000 211 45	0.000 270 12	0.270 92

表2 网络通信对传感器管理的影响

网络通信因素	目标	ME/km	RMSE/km	RME	RRMSE
$\lambda = 0.2$	1	0.064567	0.08822	0.00031421	0.00043111
	2	0.041778	0.053263	0.00023051	0.00029473
	3	0.061074	0.082855	0.00037936	0.00051381
	4	0.041373	0.052748	0.00021828	0.00027821
$\lambda = 0.5$	1	0.068018	0.096061	0.00033225	0.00047183
	2	0.04242	0.053859	0.00023321	0.00029597
	3	0.065071	0.098006	0.00040368	0.00060574
	4	0.043323	0.055217	0.00022934	0.0002921
$F_d = 5$	1	0.068315	0.091099	0.00033366	0.00044663
	2	0.04406	0.056179	0.0002427	0.00030991
	3	0.06634	0.090974	0.000412	0.00056404
	4	0.043391	0.055155	0.00022884	0.00029065
$F_d = 10$	1	0.066421	0.089843	0.0003239	0.00043988
	2	0.043556	0.055629	0.00024016	0.00030739
	3	0.063936	0.08804	0.00039703	0.00054575
	4	0.042116	0.053623	0.0002221	0.00028261
$T_f = 80$	1	0.064873	0.089444	0.00031685	0.00043838
	2	0.042408	0.054255	0.00023258	0.00029842
	3	0.059746	0.082255	0.00037162	0.00051058
	4	0.041168	0.052856	0.00021647	0.00027792
$T_f = 20$	1	0.066341	0.086564	0.0003262	0.0004268
	2	0.046446	0.058966	0.000253	0.00032179
	3	0.070521	0.092682	0.00043758	0.00057486
	4	0.046894	0.059851	0.00024618	0.00031426

同样有一定程度的增加 其他指标随这些因素变化的规律类似

总体来说, 配准误差越大, 网络通信延迟频度越大或者网络通信故障时间越长, 基于联合信息增量分配准则下的目标状态估计精度也越低, 这表明该算法符合实际物理意义

5 结 语

本文研究了网络多平台中的传感器管理问题 网络级传感器管理在单平台多传感器管理问题的基础上, 还应当考虑网络传感器平台故障、通信故障、通信延迟以及多平台数据配准等问题 本文提出了一种网络级传感器管理算法, 给出了几种网络典型因素在算法中的实现, 并通过仿真研究验证了该算法的有效性和可行性

参考文献(References)

[1] Stromberg D. A Platform-based Data Fusion and Sensor Management Node [A]. *IEE Conf on Radar* 2002[C]. Edinburgh, 2002: 483-487.

[2] Hernandez M L, Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. Multisensor Resource Deployment Using Posterior Cramer-rao Bounds[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(2): 399-416

[3] Kalandros M. Covariance Control for Multisensor Systems[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1138-1157.

[4] Kreucher C, Kastella K, Hero A O. A Bayesian Method for Integrated Multitarget Tracking and Sensor Management [A]. *Proc of the 6th Int Conf on Information Fusion* [C]. Cairns, 2003, 1: 704-711.

[5] Schmiedecke Wayne, Kastella Keith. Information Based Sensor Management and MMKF [A]. *Proc of the SPIE* [C]. Bellingham: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1998, 3373: 390-401.

[6] Krishnamurthy V. Algorithms for Optimal Scheduling and Management of Hidden Markov Model Sensors[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(6): 1382-1397.

(下转第526页)

- [2] Olsder G J, De Vries R E. On an Analogy of Minimal Realization in Conventional and Discrete Event Dynamic Systems[J]. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 1988, 103: 149-161.
- [3] Cunningham-Green R A. Algebraic Realization of Discrete Event Dynamic Systems[A]. *Proc of the 1991 IFAC Workshop on Discrete Event Dynamic System Theory and Application in Manufacturing and Social Phenomena*[C]. Shenyang, 1991: 11-15.
- [4] Qi X D, Chen W D. The Minimal Realization of Discrete Event Systems[A]. *Proc of the 1991 IFAC Workshop on Discrete Event Dynamic System Theory and Application in Manufacturing and Social Phenomena*[C]. Shenyang, 1991: 29-33.
- [5] 陈文德. 离散事件动态系统的实现理论[A]. 1992 中国控制与决策学术年会论文集[C]. 哈尔滨, 1992: 179-183
(Chen W D. Realization Theory of Discrete Event Dynamic Systems[A]. *Proc of 1992 Chinese Control and Decision Conf* [C]. 1992: 179-183.)
- [6] Gaubert S. *Theory of the Linear System in the Dioids* [D]. Paris: National Superior School of Mines of Paris, 1992.
- [7] 涂奉生. 极大代数上特征方程与特征结构[A]. CSIAM系统与控制数学分会学术讨论会[C]. 上海, 1992
(Tu F S. Characteristic Equation and Characteristic Structure in the Max-algebra [A]. *Branch of Colloquium of CSIAM Systems and Control Mathematic Branch* [C]. Shanghai, 1992.)
- [8] 涂奉生. 极大代数上线性系统的最小实现[A]. 1992 中国控制与决策学术年会论文集[C]. 哈尔滨, 1992: 184-189
(Tu F S. Minimal Realization in Linear Systems of the Max-algebra [A]. *Proc of 1992 Chinese Control and Decision Conf* [C]. Harbin, 1992: 184-189.)
- [9] Gaubert S. *On Rational Series in One Variable over Certain Dioids*[R]. Chesnay, 1994.
- [10] De Schutter B, Bart D Moor. Minimal Realization Problem in the Max-algebra Is an Extended Linear Complementarity Problem [J]. *Systems and Control Letters*, 1995, 25(2): 103-111.
- [11] De Schutter B. *Max-algebra Systems Theory for Discrete Event Systems* [D]. Leuven: Faculty of Applied Sciences, 1996.
- [12] Gaubert S, Butkovic P, Cuninghame-Green R A. Minimal (Max, +) Realization of Convex Sequences [J]. *SIAM J Control Optimization*, 1998, 36(1): 137-147.
- [13] Olsder G J, De Schutter B. The Minimal Realization Problem in the Max-algebra [A]. *Open Problem in Mathematical Systems and Control Theory* [C]. London: Springer-Verlag, 1999: 157-162.
- [14] Blondel V D, Portier N. The Minimal Realization Problem in the Max-plus Semiring and Pólya's Problem are NP-hard [M]. *C R Acad Sci Paris*, 2001: 1127-1130.
- [15] Lahaye S, Boimond J L, Hardouin L. Linear Periodic Systems Over Dioids [J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application*, 2004, 14(2): 133-152.
- [16] Olsder G J, Roos C. *Cramer and Cayley-Hamilton in the Max-algebra* [R]. Julianalaani Department of Mathematics and Informatics, 1985.

(上接第520页)

- [7] 刘先省, 申石磊. 基于信息熵的一种传感器管理算法[J]. *电子学报*, 2000, 28(9): 39-41.
(Liu X X, Shen S L. An Algorithm of Sensor Management Based on Information Entropy [J]. *Electronics Transaction*, 2000, 28(9): 39-41.)
- [8] 周文辉, 胡卫东, 余安喜, 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, 31(12A): 2158-2162
(Zhou W H, Hu W D, Yu A X, et al. A Study of Centralized Sensor Allocating Algorithm Based on Covariance [J]. *Electronics Transaction*, 2003, 31(12A): 2158-2162.)
- [9] Durrant-Whyte H, Ben Grocholsky. Management and Control in Decentralized Networks[A]. *Proc of the 6th Int Conf on Information Fusion* [C]. Cairns, 2003, 2: 560-566
- [10] Bonnie Worth Johnson. Naval Network-centric Sensor Resource Management[A]. *The 4th Annual Conf on Implementing Network Centric Warfare* [C]. Washington DC, 2002.
- [11] Ronnie L, Johansson M, Xiong N, et al. A Game Theoretic Model for Management of Mobile Sensors [A]. *Proc of the 6th Int Conf on Information Fusion* [C]. Cairns, 2003, 2: 583-590.
- [12] 田康生, 朱光喜, 徐毓. 基于多代理技术的传感器管理系统[J]. *现代雷达*, 2004, 26(2): 9-13
(Tian K S, Zhu G X, Xu Y. Sensor Management System Based on Multi-agent Technology [J]. *Modern Radar*, 2004, 26(2): 9-13.)
- [13] Ben Grocholsky. *Information-theoretic Control of Multiple Sensor Platforms* [D]. Sydney: Sydney University, 2002.