

引用格式:张士磊,王元利.考虑单目标探测需求的多传感器联盟技术研究[J].电光与控制,2017,24(10):49-54. ZHANG S L, WANG Y L. Multi-sensor coalition building with consideration of single target tracking requirements[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):49-54.

考虑单目标探测需求的多传感器联盟技术研究

张士磊, 王元利

(河南工学院自动控制系,河南 新乡 453003)

摘要:针对传感器联盟的组建问题,在考虑单目标探测精度需求和能耗需求的情况下,阐述了多传感器组建联盟的具体流程,建立了传感器联盟模型,引入并改进人工狼群算法求解适应度最佳的传感器联盟方案。仿真实验表明,所述的传感器联盟组建流程具有可行性,模型具有合理性,算法具有有效性。

关键词: 目标探测; 多传感器联盟; 改进人工狼群算法; 探测精度; 能耗

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.010

Multi-sensor Coalition Building with Consideration of Single Target Tracking Requirements

ZHANG Shi-lei, WANG Yuan-li

(Department of Automatic Control, Henan Engineering College, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The technique for building multi-sensor coalitions is studied. With consideration of the precision and energy consumption requirements for single target detection, the specific process for building multi-sensor coalition is presented, and the model of the multi-sensor coalitions is built up. The wolf pack algorithm is introduced and improved to seek the optimum multi-sensor coalition scheme. The simulation result indicates that the process of building multi-sensor coalitions is feasible, the model is rational, and the algorithm is effective.

Key words: target detection; multi-sensor coalition; improved wolf pack algorithm; detecting precision; energy consumption

0 引言

传感器协同探测是传感器工作的一种重要方式,通过一个传感器向另一个传感器发送目标信息,直接对目标进行详细信息的获取,从而为信息融合提供所必需的数据^[1-2]。在数据融合过程中,传感器协同探测的重要意义在于:当一个目标来袭,在考虑对该目标的探测问题时,一方面由于单个传感器极少能够提供关于该目标的全部信息,另一方面由于传感器资源有限,所有传感器不可能全部同时对该目标进行探测,必须针对该目标选择部分传感器组建联盟对其进行探测,在该联盟中多个传感器之间进行协作,共同得到针对该目标所需的全部信息。

传感器提示的基础是组建多传感器联盟,其联盟方式直接影响传感器性能的发挥。本文研究多传感

器联盟组建问题,在此方面,国内外已进行如下探讨:KANG 等人介绍了一种基于能量感知的传感器节点选择算法,参考传感器节点的信息效用、通信能耗和剩余能量进行传感器分配,以此增加网络寿命,保持负载平衡^[3];YU 等人研究同构单跳网络环境,提出了一个带整数线性规划的多项式时间三阶段启发式算法来求取传感器分配方案^[4];CASTANON 等人采用动态规划的方法有效解决了传感器分配问题^[5];PARK 等人提出了能源有效的任务分配框架,采用模拟退火算法把任务分配到节点上,节点以其能量状态对任务进行迁移,优化任务分配^[6];王华东等人建立了传感器提示过程中无线传感器的能耗模型,提出了一种蝙蝠算法优化神经网络算法,以此求解数据融合方案,仿真结果表明,该算法能够较好地降低数据冗余、节省传感器资源、缩短传感器工作时间^[7];朱卫宵等人提出一种利用目标战术重要性函数量化求解目标优先级的方法,基于信息增益准则建立了传感器分配模型,将遗传算法用于解决多传感器多目标分配问题,该算法显示出较强的稳定性和较快的收敛性^[8];蒋志强等人研究三目

收稿日期:2016-10-21 修回日期:2017-06-08

作者简介:张士磊(1982—),男,河南南阳人,硕士,研究方向为网络化控制技术、信息融合技术、陀螺导航技术。

标任务分配问题,基于 0-1 非线性规划理论建立代价函数,选择离散粒子群优化算法求解传感器分配方案,仿真表明该方法能节约传感器资源,缩短任务调度时间,并增强网络节点剩余能量的均衡性^[9]。

通过研究发现,以往模型中主要存在以下两方面缺点:一是在研究多传感器联盟组建问题时,大多数文献仅侧重于计算传感器联盟的静态结果,而极少分析联盟组建的动态过程;二是多传感器组建联盟过程中仅仅考虑联盟方案整体适应度的高低,而不考虑是否满足单个目标的探测需求。

本文主要围绕多传感器协同探测多目标中多传感器联盟组建问题,选择单目标探测精度需求和能耗需求作为探测指标,寻找在满足单目标探测需求情况下的适应度值最大的多传感器联盟方案,同时注重联盟组建的动态过程分析,在求解联盟方案时对人工狼群算法进行改进,用改进人工狼群算法求解得到多传感器联盟方案,通过仿真实验证明模型和算法的有效性。

1 考虑单目标探测需求的多传感器联盟组建流程

传感器网络中共有 m 个传感器,某时刻有目标 t 来袭。对传感器资源进行管理并开始组建针对该目标探测任务的多传感器联盟。本文中将对目标的探测任务定义为探明目标的属性、类型、速度、角度、高度、距离和态势等特征。

在对多目标建立多传感器联盟过程中,以探测精度和能耗作为探测指标,对目标 t 提出探测精度需求 α 和能耗需求 β ,然后建立多传感器联盟,多传感器初步联盟方案有以下几种类型:

- 1) 不存在满足目标探测精度需求或能耗需求的多传感器联盟方案;
- 2) 存在满足目标能耗需求的多传感器联盟方案,而不存在满足目标探测精度需求的方案;
- 3) 存在满足目标探测精度需求的多传感器联盟方案,而不存在满足目标能耗需求的方案;
- 4) 存在同时满足目标的探测精度需求和能耗需求的多传感器联盟方案。

在此,根据作战态势把传感器对目标的探测任务类型分为 3 类。

A 类。执行此类任务时传感器资源充足,对目标的探测任务紧急,以保证对目标的探测精度需求为主导地位。当满足 1) 和 2) 时,优先提高能耗需求以保证探测精度需求。当所有传感器均加入到对该目标的多传感器联盟依旧满足不了对该目标的探测精度需求时,降低探测精度需求。

B 类。执行此类任务时传感器资源紧缺,对目标的探测任务不紧急,以节省传感器资源为主导地位。当满足 1) 和 3) 时,优先降低探测精度需求以满足能耗需求。

C 类。执行此类任务时传感器资源较为充足,对目标的探测任务不紧急,保证对目标的探测精度和节省传感器资源占据几乎同等重要地位,当满足 1) 时交叉降低探测精度需求和提高能耗需求,当满足 2) 时降低探测精度需求,当满足 3) 时降低能耗需求。

若 A, B 和 C 这 3 类情况下的初步联盟方案满足 4) 且联盟方案仅有一种,则选择该方案为最终联盟方案;若不止一种,则根据适应度最佳原则,选择适应度最高的联盟方案作为对目标 t 的最终多传感器联盟方案。设同时满足目标 t 探测精度需求和能耗需求的联盟方案共 K 种,第 k 种方案 X_k 的适应度算式为

$$f(X_k) = \frac{1 - \prod_{i=1}^m x_i^k (1 - p_i)}{\sum_{i=1}^m x_i^k c_i} \quad (1)$$

式中:传感器分配方案 X_k 共 m 个元素,取值为 0 或 1;有 $x_i^k = \begin{cases} 0 & \text{传感器 } s_i \text{ 不加入到对目标 } t \text{ 的动态联盟} \\ 1 & \text{传感器 } s_i \text{ 加入到对目标 } t \text{ 的动态联盟} \end{cases}$; p_i 为传感器 s_i 对目标 t 的探测精度; c_i 为传感器 s_i 对目标 t 探测时消耗的传感器资源。

针对目标 t 建立多传感器联盟,其传感器联盟组建流程如图 1 所示。

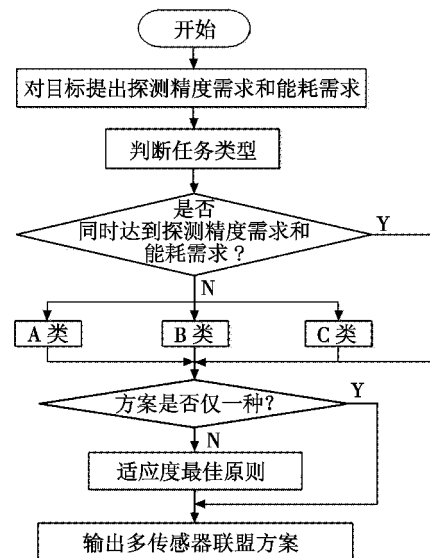


图 1 多传感器联盟组建流程图

Fig. 1 The procedure for building multi-sensor coalition

针对目标建立多传感器联盟的步骤为:

- 1) 联盟组建开始;
- 2) 对该目标提出探测精度需求 α 和能耗需求 β , 确定任务类型(A, B 或 C);

3) 求解多传感器联盟方案；

4) 若满足探测精度需求和能耗需求的多传感器联盟方案有且仅有一种,则输出该方案,显示器显示该方案,跳到 8)；

5) 若满足探测精度需求和能耗需求的多传感器联盟方案有多种,则按照适应度最佳原则,选择适应度最高的方案输出,跳到 8)；

6) 若没有同时满足探测精度需求和能耗需求的多传感器联盟方案,按照任务类型执行相应操作；

7) 回到 1)；

8) 联盟组建结束。

2 考虑单目标探测需求指标的多传感器联盟模型

传感器网络中共有 m 个传感器,某时刻共有 n 个目标来袭。

设多传感器联盟方案 X 为一个 $m \times n$ 阶的 0-1 矩阵,有

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{传感器 } s_i \text{ 不加入到对目标 } t_j \text{ 的跟踪多传感器联盟} \\ 1 & \text{传感器 } s_i \text{ 加入到对目标 } t_j \text{ 的跟踪多传感器联盟} \end{cases} \quad (2)$$

传感器对目标的探测精度为一个 $m \times n$ 阶矩阵,其中, p_{ij} 为传感器 s_i 对目标 t_j 的探测精度,即

$$p_{ij} = (n_{ij} * t_{ij}) / (N * T) \quad (3)$$

式中: n_{ij} 表示 s_i 对 t_j 探测到的特征个数; t_{ij} 表示 s_i 探测到 t_j 的有效时间; N 表示所需探测 t_j 的总特征个数; T 表示 t_j 在传感器网络中飞行的总时间。

多传感器联盟 X 对目标 t_j 的探测精度为

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij} x_{ij}) \quad (4)$$

传感器 s_i 重要级 m_i 表征该传感器在传感器网络中的重要程度,其值大小采用归一化后的值。当占用该传感器时,能耗值 c_i 为

$$c_i = m_i / N_i^* \quad (5)$$

式中, N_i^* 为传感器 s_i 可同时探测目标个数,即传感器的探测能力。

多传感器联盟方案 X 探测目标 t_j 的能耗为

$$C_j = \sum_{i=1}^m c_i x_{ij} \quad (6)$$

在组建联盟过程中,应使联盟方案 X 对所有目标的总探测精度 P 最大和总能耗 C 最小,因此有目标函数

$$\max P = \max \sum_{j=1}^n P_j \quad (7)$$

$$\min C = \min \sum_{j=1}^n C_j \quad (8)$$

本文讨论的情况为传感器可同时对多个目标进行探测,但传感器 s_i 实际同时探测的目标个数 n_i^* 不能超过其可同时探测的最多目标个数 N_i^* 。在传感器分配过程中,针对目标 t_j 组建的多传感器联盟中传感器个数 n_j 不能为 0,因此有约束条件

$$n_i^* \leq N_i^* \quad (9)$$

$$n_j \geq 0 \quad (10)$$

式中: n_i^* 为传感器 s_i 实际探测目标的个数; n_j 为针对目标 t_j 组建的探测联盟中的传感器个数。

多传感器联盟 X 的适应度 $F(X)$ 表征该传感器方案的优劣程度。以往文献在选择适应度函数时往往表示为

$$F(X) = P/C \quad (11)$$

若采用此种方法计算适应度值,作为评判联盟方案的依据,易选择以下两种存在问题的方案作为分配结果:

1) 适应度值较高可能是由于能耗过小造成的,不一定能够保证对目标的探测精度需求;

2) 适应度值较高可能是由于探测精度过高造成的,不一定能够保证对目标的能耗需求。

针对此问题,并考虑目标 t_j 对我方的威胁度 R_j ,传感器联盟分配方案 X 的适应度值算式为

$$F(X) = \left\{ \sum_{j=1}^n \{ P_j \cdot R_j \cdot [1 + e^{\lg(P_j - \alpha_j)} \cdot 0.01] \cdot [1 + e^{\lg(\beta_j - C_j)} \cdot 0.01] \} \right\} / \sum_{j=1}^n C_j \quad (12)$$

式中, α_j 和 β_j 分别为给定的对目标 t_j 的最低探测精度和最高能耗。

由式(12)可知,只有当 $P_j > \alpha_j$ 且 $C_j < \beta_j$ 时,该式才成立,因此,使用该式作为适应度函数时,能够保证求得的最多传感器联盟方案满足对每个目标的探测精度要求和能耗需求。

3 改进人工狼群算法

人工狼群算法是 2007 年 YANG 等人模拟狼群捕食行为提出的一种智能寻优算法,具有较好的全局收敛性和计算鲁棒性^[10]。在人工狼群算法中,每匹狼代表一个可行解,本文中即多传感器联盟方案。人工狼群算法存在探狼、头狼和猛狼 3 种分工,游走、召唤和围攻 3 种智能行为,及“胜者为王”头狼产生机制和“强者生存”的狼群更新机制两种机制^[11-12],其关系如图 2 所示。

文献[10]介绍的基本人工狼群算法存在求解精度不高和易陷入局部最优的问题,在此对其进行改进,提出改进人工狼群算法,并用改进人工狼群算法求解多传感器联盟组建问题。

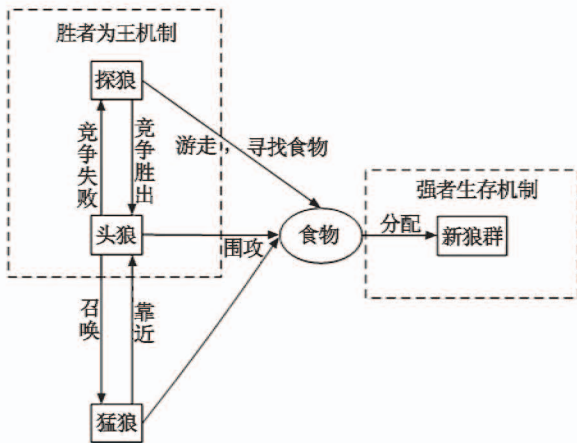


图2 狼群关系图

Fig.2 The relationship of wolves

在基本人工狼群算法中,进行寻优的狼群只有一个,当头狼对猛狼进行召唤时,无论猛狼与该头狼距离远或近,都向该头狼靠拢。在改进人工狼群算法中采取 N_0 个狼群同时搜索的策略,算法初始化和狼群更新时选取适应度排名较高的前 N_0 匹狼作为头狼,按照距离最近原则把 N_1 匹猛狼分成 N_0 类,探狼只接受距离它最近的头狼召唤,并向其移动。采用改进后的人工狼群算法,一方面可以提高算法的全局搜索能力,另一方面还能缩短猛狼向头狼方向移动的时间,提高算法的收敛速度。

设 N 个 0-1 矩阵 X_1, X_2, \dots, X_N 为算法初始化过程中 N 匹探狼对应的多传感器联盟方案,探狼 X_i 和 X_r 之间的距离采用曼哈顿距离,为

$$d(X_i, X_r) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |x_{ij}^i - x_{ij}^r| \quad (13)$$

表1 传感器对目标探测精度表

Table 1 Tracking precision of sensors to targets

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	重要级	监测能力	能耗
传感器1	0.614 7	0.278 5	0.657 2	0.592 2	0.678 7	0.18	6	0.03
传感器2	0.605 8	0.546 9	0.485 4	0.659 5	0.757 7	0.18	6	0.03
传感器3	0.127 0	0.757 5	0.600 3	0.655 7	0.743 1	0.10	5	0.02
传感器4	0.713 4	0.764 9	0.147 9	0.035 7	0.392 2	0.20	5	0.04
传感器5	0.632 4	0.157 6	0.042 8	0.649 1	0.655 5	0.10	5	0.02
传感器6	0.097 5	0.670 5	0.715 7	0.234 0	0.171 2	0.24	8	0.03
威胁度	0.15	0.15	0.20	0.28	0.22	1	35	

仿真实验过程中,狼群个数 N_0 、探狼匹数 N 、猛狼匹数 N_1 和循环次数 k 越大,算法收敛速度越慢,运行时间越长,但全局搜索能力越强,结果精度越高;猛狼匹数 N_1 和循环次数 k 越小,算法收敛速度越快,运行时间越短,但全局搜索能力越弱,结果精度越低。经过多次实验,4 个参数可取如下值,既能保证较强的全局搜索能力,又能取得较为理想的算法运行时间:狼群个数 $N_0 = 3$, 探

式中, x_{ij}^i 和 x_{ij}^r 分别为探狼 X_i 和 X_r 内的第 i 行第 j 列元素。

应用改进人工狼群算法解决多传感器联盟组建问题,算法步骤如图3所示。

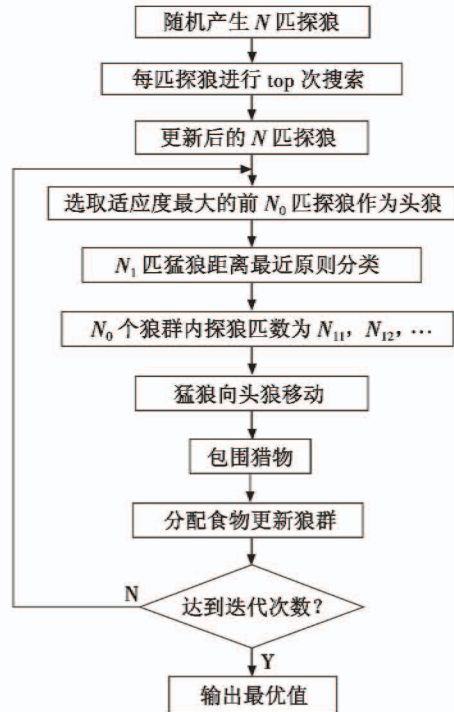


图3 算法流程图

Fig.3 The procedure of the algorithm

4 仿真实验与结果分析

假设 1 个传感器网络由 6 个传感器构成,某一时刻共有 5 个目标来袭。各个传感器对来袭目标的探测能力见表 1,其中均采用归一化后的数据。

狼匹数 $N = 10$, 猛狼匹数 $N_1 = 30$, 循环次数 $k = 50$ 。

4.1 针对单目标的多传感器联盟组建过程分析

当仅考虑单目标 t_1 来袭时,对目标 t_1 提出的探测精度需求和能耗需求为:探测精度下限 $\alpha_1 = 0.98$, 能耗上限 $\beta_1 = 0.02$ 。

任务类型不同时,传感器网络对该目标建立探测联盟的过程如表 2 所示。

表 2 多传感器联盟建立过程

Table 2 The process for building multi-sensor coalition

任务类型	步骤	探测下限	能耗上限	探测联盟
A	1	0.98	0.02	
	2	0.98	0.05	
	3	0.98	0.08	
	4	0.98	0.10	
	5	0.98	0.15	1,2,3,4,5
B	1	0.98	0.02	
	2	0.90	0.02	
	3	0.80	0.02	
	4	0.70	0.02	
	5	0.60	0.02	5
C	1	0.98	0.02	
	2	0.98	0.05	
	3	0.95	0.05	
	4	0.95	0.10	2,4,5

任务类型不同时所得联盟方案的实际探测精度和能耗变化对比如图 4 所示。

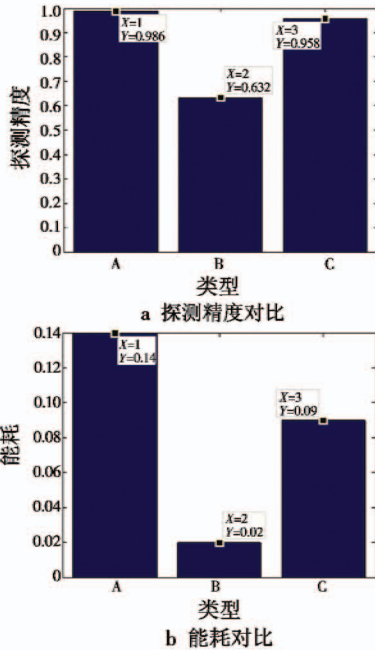


图 4 联盟方案对比图

Fig.4 The contrast of coalition schemes

4.2 针对多目标的多传感器联盟组建方案

当对目标 t_1, t_2, t_3, t_4 和 t_5 的探测精度下限分别为 0.80, 0.85, 0.85, 0.61 和 0.75, 能耗上限分别为 0.15, 0.16, 0.15, 0.12 和 0.10 时, 采用基本人工狼群算法与改进人工狼群算法计算联盟方案(见表 3)最佳适应度曲线变化如图 5 所示。由图 5 可知, 采用基本人工狼群算法和改进人工狼群算法都能够有效得到多传感器联盟方案。但基本人工狼群算法在计算 34 次后收敛, 得到的联盟方案的适应度为 3.563, 改进人工狼群算法在计算 13 次后收敛, 得到的联盟方案的适应度为 3.969。改进人工狼群算法在寻优过程中更易跳出局部最优解,

且收敛速度有所提高, 寻优能力增强。

改进人工狼群算法寻优能力增强的原因: 1) 增加了狼群个数, 算法的全局搜索能力增强, 使得在计算过程中更易跳出局部最优解; 2) 猛狼只接受离其最近的头狼的召唤并向其靠拢, 算法的收敛速度有所提高。

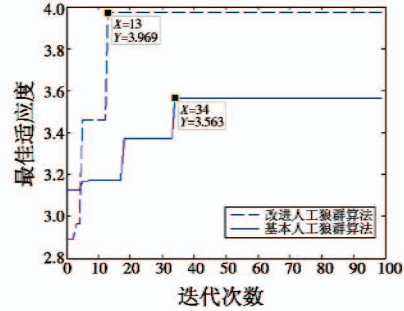


图 5 算法改进前后对比

Fig.5 The improved algorithm vs the original one

表 3 不同算法下多传感器联盟方案

Table 3 The multi-sensor coalition scheme of different algorithms

目标	基本人工狼群算法			改进人工狼群算法		
	传感器	探测精度	能耗	传感器	探测精度	能耗
t_1	1,2,4,5,6	0.985 6	0.15	1,5	0.858 4	0.05
t_2	2,4	0.893 5	0.07	3,6	0.920 1	0.05
t_3	1,3	0.863 0	0.05	3,6	0.886 4	0.05
t_4	3	0.655 7	0.04	3	0.655 7	0.04
t_5	3,5	0.911 5	0.04	2	0.757 7	0.02

4.3 考虑单目标探测需求指标与不考虑单目标探测需求指标两种情况对比

当对目标 t_1, t_2, t_3, t_4 和 t_5 的探测精度下限分别为 0.80, 0.85, 0.85, 0.61 和 0.75, 能耗上限分别为 0.15, 0.16, 0.15, 0.12 和 0.10 时, 应用改进狼群算法计算联盟方案(见表 4)最佳适应度曲线变化如图 6 所示。

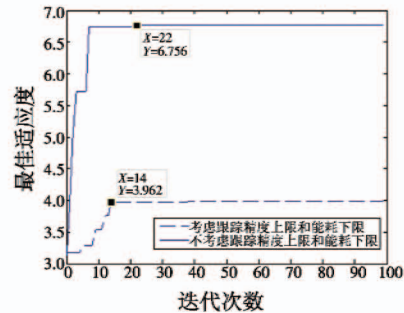


图 6 模型改进前后对比

Fig.6 The improved model vs the original one

由图 6 可知, 当考虑单目标的探测精度需求和能耗需求时, 与不考虑单目标的探测精度需求和能耗需求时相比, 收敛速度有所提高, 但得到的多传感器联盟方案的适应度降低。不考虑单目标的探测精度需求和能耗需求, 虽能得到适应度较高的多传感器联盟方案, 但一味追求较高的适应度却不能保证对每个传感器的

探测精度需求和能耗需求。例如,得到的方案中,对目标 t_1 的探测任务仅由传感器 5 完成,对目标 t_1 的探测精度为 0.632 4,没有达到要求的探测精度下限 0.80,从这个角度来说,并没有完成对目标 t_1 的探测任务,在实际作战中很可能延误战机。

考虑单目标的探测精度需求和能耗需求与不考虑单目标的探测精度需求和能耗需求相比,收敛速度有所提高的原因是,符合算法寻优条件的可行解个数较少,搜索范围降低,故在较短时间内就能找到最佳联盟方案;最佳分配方案适应度降低的原因是,由于限制了对目标的探测精度和能耗,对目标的探测效果较为苛刻,这必然以牺牲联盟方案的适应度为代价。

表 4 不同需求考虑下多传感器联盟方案

Table 4 The multi-sensor coalition scheme under different considerations

目标	不考虑单目标探测精度、 能耗需求			考虑单目标探测精度、 能耗需求		
	传感器	探测精度	能耗	传感器	探测精度	能耗
t_1	5	0.632 4	0.02	1,5	0.858 4	0.05
t_2	3	0.957 5	0.02	3,6	0.920 1	0.05
t_3	3	0.800 3	0.02	3,6	0.886 4	0.05
t_4	3	0.655 7	0.02	3	0.655 7	0.04
t_5	3	0.743 1	0.02	2	0.757 7	0.02

5 结论

本文主要针对多传感器协同探测目标过程中多传感器联盟的组建问题进行研究,在考虑单目标探测精度需求和能耗需求的情况下,详细描述了多传感器协同探测多目标过程中联盟的组建过程,建立了多传感器联盟模型,采用改进人工狼群算法求解综合效能最大的多传感器联盟方案。通过仿真实验,证明了模型的合理性和算法的有效性。

参考文献

[1] 樊浩,龙治国,黄树彩,等.多传感器交叉提示技术发展现状与研究[J].飞航导弹,2012(2):79-84.

- [2] 樊浩,黄树彩,韦道知,等.多传感器交叉提示技术若干问题[J].电光与控制,2012,19(11):47-53.
- [3] KANG H, LI X L. Power-aware sensor selection in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2006:46-50.
- [4] YU Y, VIKTOR K P. Energy-balanced task allocation for collaborative processing in wireless sensor networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10(12):115-131.
- [5] CASTANON D A. Approximate dynamic programming for sensor management[C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, Washington, 1997:1202-1207.
- [6] PARK H, SRIVASTAVA M B. Energy-efficient task assignment framework for wireless sensor networks, TRUCLA-NESL-200309-03[R]. Los Angeles: Center for Embedded Network Sensing, 2003.
- [7] 王华东,王大羽.蝙蝠算法优化神经网络的无线传感器网络数据融合[J].激光杂志,2015,36(4):164-168.
- [8] 朱卫宵,祝前旺,陈康.一种基于遗传算法的多传感器多目标分配方法[J].电子信息对抗技术,2015,30(3):30-34.
- [9] 蒋志强,廖晓峰,刘群.基于0-1规划的异构传感器网络任务分配策略[J].计算机应用,2012,32(4):913-916.
- [10] YANG C G, TU X Y, CHEN J. Algorithm of marriage in-honey bees optimization based on the wolf pack search [C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Pervasive Computing, 2007:462-467.
- [11] 吴虎胜,张凤鸣,吴庐山.一种新的群体智能算法——狼群算法[J].系统工程与电子技术,2013,35(11):2430-2438.
- [12] 周强,周永权.一种基于领导者策略的狼群智能算法[J].计算机应用研究,2013,30(9):2629-2632.



请扫描二维码关注我刊