

搜索打击任务的多无人机编队的研究与优化

徐文涛, 晁爱农, 叶广强, 丛林, 黄烨

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 无人机探测范围和携带的可消耗载荷有限, 因此, 当被侦测的目标需要不同种类和不同数量的载荷才能被完全摧毁时, 就需要一组无人机形成编队来打击目标。提出一种针对搜索打击任务的多无人机编队方法, 该算法通过两个阶段来确保打击目标的时延最短和编队规模最小。同时, 给出了3种不同的搜索策略: 随机搜索、多车道搜索、网格搜索, 进一步优化算法。最后, 利用 Monte-Carlo 方法仿真实现了编队算法并分析了3种搜索策略的性能。

关键词: 多无人机; 编队; 搜索打击; Dubins 曲线

中图分类号: V271.4; TP399

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)04-0043-05

On Multi-UAV Formation for Search and Strike Mission

XU Wen-tao, CHAO Ai-nong, YE Guang-qiang, CONG Lin, HUANG Ye

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

Abstract: The UAVs have limited detection range and can carry limited consumable payloads. Therefore, when it requires different types and different quantities of payloads to completely destroy a detected target, a team of UAVs, called a formation, is needed. A multi-UAV formation for taking search and strike mission was proposed, which ensured the minimum delay of target attacking and the minimum scale of formation through two phases. Three search strategies: random search strategy, multi-lane based search strategy and grid based search strategy, were given. At last, Monte-Carlo simulation was used to implement the formation algorithm and analyze the performance of three search strategies.

Key words: multi-UAV; formation; search and strike; Dubins curve

0 引言

无人机的搜索打击任务一般是指: 单架无人机执行搜索任务, 当无人机侦测到目标时, 对目标进行打击。但是, 针对一些重要目标或特殊情况, 为了完全摧毁目标, 需要不同类型和不同数量的载荷对目标进行打击, 此时的目标一般为重要的军事设施, 如雷达, 火炮等。由于单架无人机自身载重受限, 无法携带足够类型或数量的载荷, 因此, 需要多架无人机之间相互协作来完成对单个目标的同时打击, 这些无人机通常被称为一个编队。编队是指: 由若干架被指定的无人机组成的满足完全摧毁目标载荷需要的一组无人机(多于一架); 侦测到目标的无人机被称为编队头机(Coalition Leader, CL), 编队中的无人机被称为编队成员(Coalition Member, CM)^[1]。编队的组成是暂时的, 一

旦任务完成, 编队随之结束, CM 便执行其他任务。

无人机采用编队具有可以缩短搜索时间、提高搜索效率和打击命中率等优势^[2]。为了更好地完成任务, 形成编队需要满足3个约束: 1) 摧毁目标的时间最短; 2) 编队规模最小; 3) 同时打击目标。许多学者已经研究多终端的编队问题^[3-4]和多机器人的编队问题^[5-6]。

搜索打击目标任务的衡量指标是有界区域内所有目标被摧毁的时耗, 因此, 完成任务的性能取决于编队策略和搜索策略^[7]。许多学者对这两方面进行了深入研究^[8-11], 但都假设: 1) 无人机携带的载荷不可消耗; 2) 单架无人机可以完成对目标的摧毁。

本文假设在有限搜索区域内, 无人机之间可以通信, 同时每架无人机的侦测范围有限。我们提出了一种针对搜索打击任务的多无人机编队算法, 该算法不但考虑到了约束1)、2)、3), 同时也考虑到了假设1)和2)。算法分为2个阶段: 第1个阶段确保打击目标时间最短; 第2个阶段通过优化, 缩小编队规模。再利用3种不同的搜索策略: 随机搜索、多车道搜索、网格

搜索,进一步优化算法。最后,通过 Monte-Carlo 方法仿真实现算法并分析了3种搜索策略的性能。

1 模型建立

1.1 问题初始化

1) N 架无人机在一个矩形区域执行搜索打击任务;

2) 矩形的长为 L , 宽为 W , 矩形内包含有 M 个初始位置未知的目标;

3) 每架无人机 $A_i, i=1, \dots, N$, 位于不同的高度层, 以速度 V_i 匀速航行, 并且携带一定种类和一定数量的载荷^[12]。

选择 N 架不同类型的无人机, 可以携带不同种类和不同数量的载荷。有些载荷是可消耗的, 如导弹; 有些是不可消耗的, 如红外探测设备等。每架无人机具有独一无二的编号 $A_i, i=1, \dots, N$, 并在执行任务之前已经确定。如果无人机 A_i 可以携带 n 种载荷, 用向量 R^A 表示: $R^A = (R_1^A, R_2^A, R_3^A, \dots, R_n^A), i=1, \dots, N$ 。其中, $R_p^A, p=1, \dots, n$, 表示拥有 p 类型的载荷无人机 A_i 的数量。

当 A_i 侦测到了目标 T_j 时, A_i 可以确定摧毁 T_j 所需要的载荷的种类和数量。如果目标 T_j 需要 m 种不同载荷, 用向量表示: $R^T = (R_1^T, R_2^T, R_3^T, \dots, R_m^T), j=1, \dots, m$ 。其中, $R_q^T, q=1, \dots, m$ 且 $m \leq n$, 表示摧毁目标 T_j 所需 q 类型载荷的数量。

1.2 同时打击目标

给定一个无人机的位置和航向以及目标位置, 转弯半径一定时, 将会得到两条到达目标 Dubins 曲线^[13]: 1) 最短 Dubins 曲线 D_1 ; 2) 最长 Dubins 曲线 \bar{D}_1 。如图 1 所示。

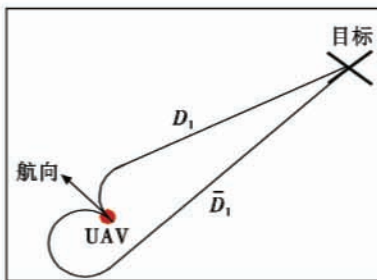


图1 Dubins 曲线

Fig.1 Dubins curves

如图 2 所示, A_1 是 CL, A_2 是 CM。当选择最短的 Dubins 路径, A_1 必须调整它的航迹确保 $D_1 = D_2$ 。但是, 如果目标在最小转弯半径的圆内时, A_1 就无法调整航迹来满足同时打击, 所以, 只能选择最长 Dubins 曲线作为无人机的航迹。这种情况下, 对于任意的 $\bar{D}_2 > \bar{D}_1$, 可以通过增加 A_1 的转弯半径, 确保同时打击。

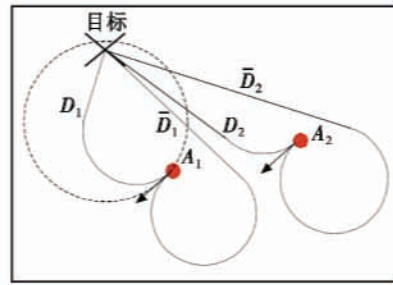


图2 Dubins 航迹的确定

Fig.2 Selecting Dubins path

1.3 全局目标

任务的全局目标是: 在最少的时间内完成搜索和摧毁给定区域的所有目标, T 为完成任务的时间, 目标的位置和所需的载荷事先并不知道, 无人机必须执行搜索任务来侦察目标, 当发现目标后, 通过形成编队摧毁目标。所以, T 由无人机发现目标时间和编队摧毁目标的时间所组成, 搜索策略的好坏决定了发现目标时间的长短。如果无人机搜索策略用 S , 形成编队的策略用 C , 那么完成任务的时间由函数 S 和 C 组成。

$$T(SC) \leftarrow f(T_s, T_j^c), \forall j \quad (1)$$

式中: $T(SC)$ 表示采用 S 搜索策略和 C 编队策略的任务时间; T_s 表示采用 S 搜索策略侦测目标的时间; T_j^c 表示采用 C 编队策略摧毁目标 T_j 的时间。

2 形成编队的算法

2.1 简述 CL

不同类型的多架无人机通过形成编队完成对目标的摧毁, 编队是根据摧毁目标所需的载荷而形成的^[14]。发出形成编队请求的无人机被称为 CL, 编队中的无人机被称为 CM。CL 不一定是 CM, 因为: 1) CL 没有目标所需的载荷; 2) 其他的成员可以完成任务; 3) CL 是其他编队中的成员。CL 的作用就是形成编队, 并告知所有 CM 打击目标的时间。一旦编队形成, 并广播了相应的信息后, CL 的作用随之结束。在同一时刻, 侦测到了多个目标, 它会随机选择一个目标, 成为该目标的 CL。

当编队成功后, CL 和 CM 的关系分为两种情况: 1) CL 在编队中, 此时 CL 和 CM 的地位相同, 都称为 CM; 2) CL 不在编队中, 此时 CL 和 CM 没有任何关系。当任务完成后, 编队自动解除, 也就是说, 当同时打击时间 t (最晚到达时间) 结点到了之后, 编队就解除了, 无人机继续执行编队前的任务。

2.2 算法模型

A 代表搜索区域的所有无人机集合, $A = \{A_i\}, i=1, \dots, N$ 。 $A_i \subset A$, A_i 表示响应请求的无人机的集合。 λ_k 表示 A_k 最早到达时间 (ETA), 其中 $A_k \in A_i$, 并且

$A_i = \{\lambda_k\}, \forall A_k \in A_i$ 。为了形成最小规模的编队同时打击目标时间最短,目标函数为

$$\min \tilde{A}_i \max_{k: \lambda_k \in \tilde{A}_i} \lambda_k \quad (2)$$

约束条件为

$$R_{ij}^c \geq R_{jp}^T, \forall p = 1, \dots, m \quad (3)$$

其中, $\tilde{A}_i \subseteq A_i, \tilde{A}_i \in A_i, R_{ij}^c = \sum_{k: A_k \in \tilde{A}_i} R_{kp}^A$ 。

目标函数决定了最晚到达目标(\tilde{A}_i 中 λ_k 的最大值)的时间和最小规模的集合 \tilde{A}_i 。只有用最晚到达时间才能确保规模最小的编队对目标进行同时打击。

2.3 具体算法

形成摧毁目标的最短时间和最小规模的编队可以分成两步来实现:1) 确定满足最短时间需求的编队;2) 缩减编队到最小规模。具体如算法1和算法2所示,其中, A_i 是发现了目标 T_j 的 CL, T_j 的载荷需求为 R_{jp}^T 。

算法1。

```

初始化变量:
 $C_i^j = []$ ;
 $R_j^{C_i} = []$ ;
 $D_c = []$ ;
UAV_responded =  $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ ;
ETAs =  $\{D_u^1, \dots, D_u^N\}$ ;
 $[D_u, D_A] = \text{Sort}(\text{ETAs})$ ;
for ( $k = 1; k <= |UAV\_responded|; k++$ )
{
     $A_q = D_u(k)$ ;
    添加  $A_q$  到  $C_i^j$ ;
    添加  $R^{A_q}$  到  $R_j^{C_i}$ ;
    添加到  $D_u(k)$  到  $D_c$ ;
for ( $p = 1; p <= m; p++$ ) ;
{
    if ( $R_{jp}^{C_i} > R_{jp}^T$ );
    {
        RETURN( $C_i^j, D_c, R_j^{C_i}$ );
        break;
    }
else { continue };
}
return ("NoCoalition")
}
    
```

其中 C_i^j 为 A_i (A_i 为 CL) 针对目标 T_j 的编队集合, $R_j^{C_i}$ 为 C_i^j 的载荷量, D_c 用来存储 C_i^j 中 CM 的 ETA。

算法1 首先将编队集合和编队载荷集合置空, CL 将响应的无人机按开销的升序排列。按顺序取出 A_q , 将 A_q 添加到 C_i^j , 更新 $R_j^{C_i}$ 和 D_c ; 然后检查是否满足目标所需的载荷。如果不满足, 再增加一架无人机, 直到目标载荷的需求得到满足; 如果满足, 算法1 就结束了。如果所有的响应无人机的载荷累加都无法满足目标需求, 则无法形成编队。

算法2。

```

 $\tilde{C}_i^j = C_i^j$ ;
for ( $k = 1; k <= |C_i^j|; k++$ )
{
     $A_q = C_i^j(k)$ ;
     $\tilde{R}_j^{C_i} = R_j^{C_i} - R_j^{A_q}$ ;
    for ( $l = 1; l <= m; l++$ )
        if ( $R_{lp}^{C_i} > R_{lp}^T$ )
        {
             $\tilde{C}_i^j \leftarrow$  从  $\tilde{C}_i^j$  中删除  $A_q$ ;
             $\tilde{R}_j^{C_i} = R_j^{C_i}$ ;
        }
else
{
    continue;
}
}
 $C_i^j = \tilde{C}_i^j$ 
    
```

算法2 实现编队规模最小化。判断每一个 $A_q \in C_i^j$ (C_i^j 为算法1 得到的编队) 是否为必不可少的。如果 A_q 的载荷是不需要的, 从 C_i^j 中删除 A_q , 同时从 $R_j^{C_i}$ 删除 A_q 的载荷。对 $A_q \in C_i^j$ 的所有元素进行上述判断。

3 搜索策略

一个高效的搜索算法可以快速发现目标以及摧毁目标, 下面给出了随机搜索、多车道搜索和网格搜索3种搜索策略。

3.1 随机搜索策略

随机搜索是指: 无人机 A_i 以恒定的航迹角在搜索区域内飞行到达区域边界后, 再以最小转弯半径转弯进入搜索区域, 此时无人机以该航迹角继续飞行, 如此往复, 如图3所示。由于搜索区域是连续的, 所以无人机不需要记住之前的航迹, 摧毁目标后, 从当前位置继续开始搜索目标, 所以该策略容易实现。

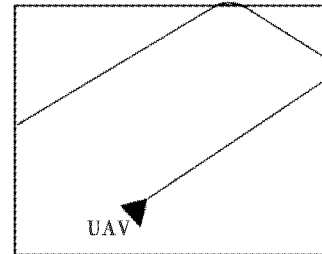


图3 随机搜索

Fig.3 Random search

3.2 多车道搜索策略

该方法将搜索区域分割成一系列的车道, 如图4所示。无人机沿着车道飞行搜索目标。车道数量确定为

$$N_i = \frac{L}{2 \times r_c}, r_c \text{ 为最小转弯半径} \quad (4)$$

当无人机完成了在一个车道的搜索,就指派一个未搜索的车道。当某些无人机完成了搜索任务,并且没可分配的新车道,无人机飞到搜索区域的中心位置,执行固定半径的盘旋飞行任务,这样是为了当有编队请求时,可以快速加入编队。

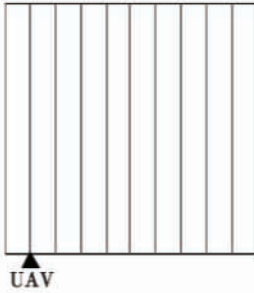


图 4 多车道搜索

Fig. 4 Multi-lane based search

编队形成后,CM 记录自己当前车道的位置作为完成任务后返回执行搜索任务的起点,之所以这样,是因为多车道搜索不同于随机搜索。随机搜索时,只要目标不在 CL 的探测范围内,CL 就放弃编队的形成;而在多车道搜索中,没有其他无人机负责该车道的搜索。如果编队没有形成,CL 就必须以随机的时间间隔阶段性地请求形成编队。

3.3 网格搜索策略

在基于网格的搜索中,搜索区域被离散为一系列的小正方形。小正方形的宽为

$$w = \sqrt{2} r_c \quad (5)$$

式中: r_c 为搜索范围;每一个小正方形具有唯一的标记 $C_\gamma, \gamma = 1, \dots, L * W/w^2$ 。初始时,所有的小正方形的值都为 1,即 $V(\gamma) = 1$ 。当小正方形区域进入无人机的探测范围时,该值变为 0,即 $V(\gamma) = 0$,如图 5 所示。

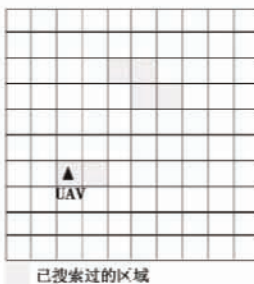


图 5 网格搜索

Fig. 5 Grid based search

当一个小正方形区域被搜索完后,无人机选择另一个小正方形区域作为起点。选择的原则是离无人机最近且 $V(\gamma) = 1$ 的小正方形区域作为下一个目的点。一旦选择了,这个信息将会共享给搜索区域的所

有无人机,这种方法类似于先验式的网格搜索^[15]。

当某个无人机侦察到了目标,它就成为 CL,负责编队的形成,CM 调整自己的航迹来完成对目标的打击。在调整航迹和飞向目标的过程中,如果某些小正方形区域被完全覆盖,这些正方形的值就减到 0。无论何时,只要搜索区域内正方形的值被更新,这个信息就要广播给搜索区域所有的无人机,这样就使得重复搜索的区域最小化,但增加了通信的开销。

4 仿真结果

4.1 编队算法仿真结果

利用 Monte-Carlo 方法仿真实现。仿真的任务场景为 4 架无人机和 4 个目标,区域大小为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$,无人机的地速为 10 m/s ,探测区域为 300 m ,无人机飞离有效区域再以最小转弯半径飞回有效区域。其中, $R^1 = (2, 3, 4), R^2 = (2, 1, 3), R^3 = (3, 2, 4), R^4 = (2, 2, 0), R^T_1 = (1, 1, 2), R^T_2 = (3, 2, 4), R^T_3 = (2, 1, 2), R^T_4 = (3, 4, 1)$ 。

无人机在区域内搜索目标,当发现目标时,形成编队。 $t = 0.6 \text{ s}$ 时, A_1 发现了目标 T_1 ,因为 $R^4 > R^T_1$,所以 A_1 直接攻击目标,不需要形成编队, A_1 的航迹如图 6 所示。时间 $t = 1 \text{ s}$ 时, A_3 侦测到了目标 T_4 ,通过算法 1, A_3, A_2 与 A_4 形成编队(此时, A_1 是针对 T_1 的 CM,所以无法响应),再通过算法 2 优化,最终, A_3 和 A_4 形成编队,航迹如图 7 所示。在 $t = 147.8 \text{ s}$ 时, A_2 发现了目标 T_3 ,载荷满足目标的需要,航迹如图 8 所示。

最后, T_2 在 $t = 164 \text{ s}$ 时被 A_1 发现, A_1 和 A_3, A_4 形成编队,航迹如图 9 所示。任务完成时间为 263 s 。

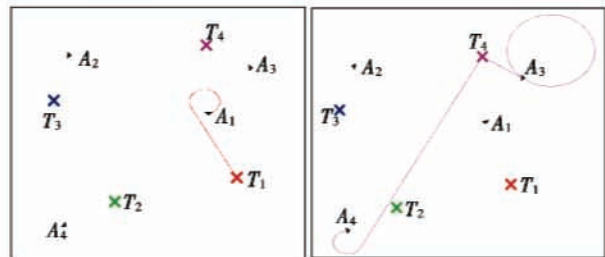


图 6 A_1 的航迹
Fig. 6 Path of A_1

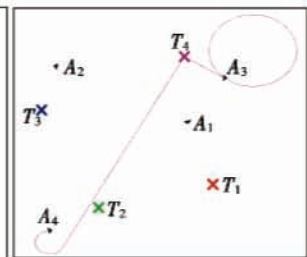


图 7 A_3 和 A_4 的航迹
Fig. 7 Path of A_3 and A_4

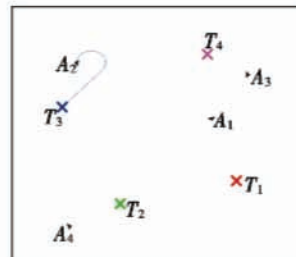


图 8 A_2 的航迹
Fig. 8 Path of A_2

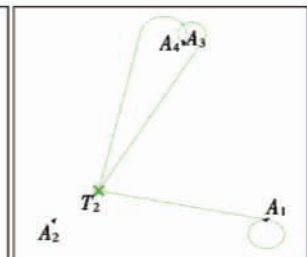


图 9 A_3, A_4 和 A_1 的航迹
Fig. 9 Paths of A_3, A_4 and A_1

4.2 搜索策略仿真

4.2.1 仿真场景

搜索区域为 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 。无人机的数量为 10、15、20, 区域内目标 M 数为 5、10、15 和 20。目标的位置随机生成。无人机的地速在 $15 \sim 30\text{ m/s}$ 之间。无人机的载荷和目标的载荷都为 3 种类型, 数量为 $\text{rand}(0, [(1/2)M])$, 无人机的探测区域为 100 m , 通信是全局范围内的。在给定目标数和载荷需求的情况下进行了 100 次仿真实验。

4.2.2 仿真结果

图 10 ~ 图 12 给出了随机搜索、多车道搜索、网格搜索完成任务的平均完成时间。

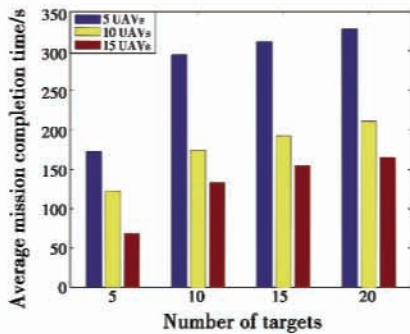


图 10 随机搜索

Fig. 10 Random search

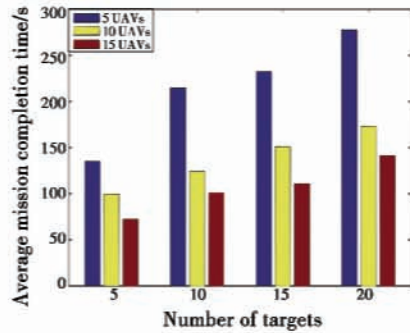


图 11 多车道搜索

Fig. 11 Multi-lane based search

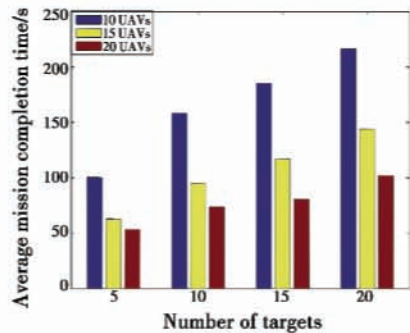


图 12 网格搜索

Fig. 12 Grid based search

可以看出, 基于多车道和基于网格的搜索策略的重复覆盖区域少, 同时, 基于网格搜索方法需要信息共

享, 所以, 这两种方法比随机搜索完成任务的效率要高。结果也说明: 基于多车道搜索方法的性能大约为基于网格搜索策略性能的 70%。在敌对环境下, 通信会增大开销, 因为基于网格搜索策略需要大量的信息共享和通信, 所以不适合该环境。因为基于多车道的搜索方法不要信息共享的开销, 更加适合该情况。

5 结论

为了解决单架无人机由于载荷限制无法完成对侦测到的目标实施完全打击的问题, 给出一种针对搜索打击任务的多无人机编队算法, 该算法通过确保打击目标时间最短和编队规模最小, 实现了无人机根据载荷需求的编队。同时, 给出了 3 种不同的搜索策略: 随机搜索、多车道搜索、网格搜索, 进一步优化算法。最后, 利用 Monte-Carlo 方法仿真实现了编队算法并分析了 3 种搜索策略的性能。

参考文献

- [1] SHEHORY O, KRAUS S. Methods for task allocation via agent coalition formation [J]. *Artificial Intelligence*, 1998, 101(1/2): 165-200.
- [2] 朱战霞, 袁建平. 无人机编队飞行问题初探 [J]. *飞行力学*, 2003, 21(2): 5-8.
ZHU Z X, YUAN J P. Discuss on formation flight of UAV [J]. *Flight Dynamics*, 2003, 21(2): 5-8.
- [3] SANDHOLM T, LARSON K, ANDERSSON M, et al. Coalition structure generation with worst case guarantees [J]. *Artificial Intelligence*, 1999, 111(1/2): 209-238.
- [4] SHEHORY O, SYCARA S K, JHA S. Multi-agent coordination through coalition formation [R]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence, Intelligent Agents IV: Agent Theories, Architectures and Languages*, 1997: 143-154.
- [5] VIG L, ADAMS J A. Market-based multi-robot coalition formation [M]. *Tokyo: Distributed Autonomous Robotic Systems 7*, 2006: 227-236.
- [6] VIG L, ADAMS J A. A framework for multi-robot coalition formation [C] // *Proceedings of the Indian International Conference on Artificial Intelligence*, 2005: 637-649.
- [7] 周小程, 严建钢, 马向铃. 模糊推理方法在无人机编队目标分配中的应用 [J]. *指挥控制与仿真*, 2012, 34(2): 33-34.
ZHOU X C, YAN J G, MA X L. Application of fuzzy inferential method to UCAV team targets distribution [J]. *Command Control & Simulation*, 2012, 34(2): 33-34.

(下转第 51 页)

diction[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(10): 65-67, 89.

[2] SMITH W L. Atmospheric soundings from satellites—false expectation or the key to improved weather prediction[J]. The Royal Meteorological Society, 1991, 117(498): 267-297.

[3] BLACKWELL W J, LESLIE R V, PIEPER M L, et al. Hyperspectral microwave atmospheric sounding [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 128-142.

[4] JANSSEN M A. A new instrument for the determination of radio path delay due to atmospheric water vapor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(4): 485-490.

[5] STRAUB C, MURK A, KAMPFER N, et al. Development of a 22 GHz correlating radiometer for the observation of stratospheric water vapor [C]//Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, 2008:1-4.

[6] EL-SHARKAWY A M, SOTIRIADIS P P, BOTTOMLEY P A, et al. A new RF radiometer for absolute noninvasive temperature sensing in biomedical applications [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2007:329-332.

[7] TANNER A B. Development of a high stability water vapor radiometer[J]. Radio Science, 1998, 33(2): 449-462.

[8] TARONCÍ J M, CAMPS A, PULIDO J A. K-band radiometer designed for academic purposes; Intercomparison of performances as total power, dicke or noise injection radiometers [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007:2927-2930.

[9] BLACKWELL W J, GALBRAITH C, HANCOCK T, et al. Design and analysis of a hyperspectral microwave receiver subsystem [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012:3435-3438.

[10] AMADUZZI L, TINTI M. Low cost components radiometer implementation for human microwave electromagnetic field emission detection [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2011, 23:9-18.

[11] KLEMETSEN O, BIRKELUND Y, JACOBSEN S K, et al. Design of medical radiometer front-end for improved performance [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2011, 27:289-306.

(上接第47页)

[8] NYGARD K E, CHANDLER P R, PACTHER M. Dynamic network flow optimization models for air vehicle resource allocation [C]//Proceedings of the American Control Conference, 2001:1853-1858.

[9] SCHUMACHER C, CHANDLER P. UAV task assignment with timing constraints via mixed-integer linear programming [C]//AIAA Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, AIAA-2004-6410, Chicago, Illinois, 2004, doi:10.2514/6.2004-6410.

[10] DARRAH M, NILAND W, STOLARIK B. UAV cooperative task assignments for a SEAD mission using genetic algorithms [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA-2006-6456, Keystone, Colorado 2006, doi:10.2514/6.2006-6456.

[11] ALIGHANBARI M, HOW J P. Robust decentralized task assignment for cooperative UAVs [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, 21-24 August 2006, doi:10.2514/6.2006-6454.

[12] SUJIT P B, GEORGE J M, BEARD R W. Multiple UAV coalition formation [C]//Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, 2008:2010-2015.

[13] LAVALLE S M. 规划算法 [M]. 张庆雅, 孙东, 等译. 北京:清华大学出版社, 2010:595-597.

LAVALLE S M. Planning algorithms [M]. Translated by ZHANG Q Y, SUN D, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2010:595-597.

[14] KINGSTON D B, SCHUMACHER C J. Time-dependent cooperative assignment [C]//Proceedings of the American Control Conference, Portland, Oregon, 2005, 6:4084-4089.

[15] YAMAUCHI B. A frontier-based approach for autonomous exploration [C]//Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1997:146-151.

本刊国内邮发代号为 36 - 693 欢迎订阅