

## 城市环境背景下多无人机快速任务规划算法

许卓凡<sup>1</sup>, 魏瑞轩<sup>1</sup>, 吕明海<sup>1</sup>, 唐灵丽<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学无人机运用工程系, 西安 710038; 2. 江南计算技术研究所, 江苏 无锡 214083)

**摘要:** 伴随着城市化进程的迅速发展, 无论在作战中还是民用, 都对无人机自主协同能力提出了新的要求。以城市环境为背景, 以无人机任务规划为研究对象, 针对目前无人机任务规划算法普遍较为复杂、实时性较差的问题, 提出一种新颖的任务规划算法。首先对城市中的建筑物建立简单的数学模型, 针对模型的特点使用了改进通视图法计算出所有最短路径, 然后使用背包算法完成任务分配。仿真结果表明该算法规划准确, 满足实时性要求。

**关键词:** 多无人机; 任务规划; 通视图; 背包算法; 城市环境

**中图分类号:** V279      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)10-0010-05

## A Fast Mission-Planning Algorithm for UAVs in Urban Environment

XU Zhuo-fan<sup>1</sup>, WEI Rui-xuan<sup>1</sup>, LÜ Ming-hai<sup>1</sup>, TANG Ling-li<sup>2</sup>

(1. Department of UAV Utilization Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Jiangnan Institute of Computing Technology, Wuxi 214083, China)

**Abstract:** The rapid development of urbanization presents new requirements to autonomous collaboration capability of UAVs both in military and civilian application. Considering that the current mission planning algorithms for UAVs have the drawbacks of high complexity and poor real-time performance, we proposed a novel UAV mission planning method based on urban environment. Simple mathematical models were created for the urban buildings at first. Then, the improved visibility graph was applied to create all the shortest paths based on the models, and knapsack problem algorithm was used to allocate the missions. Simulations show that the algorithm can make an accurate planning that satisfies the real-time requirements.

**Key words:** multi-UAV; mission planning; visibility graph; knapsack problem algorithm; urban environment

### 0 引言

在作战环境日益复杂、作战任务日益多样化的形势下, 单架无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)所发挥的功能极为有限, 一般都需要多架无人机相互协同才能完成<sup>[1-2]</sup>。而对于多机协同控制来说, 在线任务规划的主要难点是很难在合理的时间内找到近似的最优解<sup>[3]</sup>。

现代化战争中, 城市作战是主要的作战形式之一。美军在二战后进行的 250 多次对外军事干涉中, 有 90% 涉及到了城市, 预计到 2030 年, 城市的安危得失将成为战争胜败的重要标志<sup>[4]</sup>, 因此, 本文选择城市环

境为背景研究无人机任务规划问题。

目前相关研究中针对任务规划问题采用的优化算法包括禁忌搜索、遗传算法、粒子群优化等, 文献[5-6]分别采用旅行商问题(Travel Salesman Problem, TSP)和车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)对问题进行了解算, 然而随着 Agent 以及威胁区域数量的增加, 算法的计算量呈指数增长, 计算时间显著增加。因此, 目前的算法普遍存在运算量较大、实时性较差的问题, 在信息密度高、任务需求快速变化的城市环境中不易满足实时规划的需求。针对以上问题, 本文提出了一种适用于城市环境下的快速任务规划算法, 首先对城市环境以及威胁区域进行建模, 通过改进通视图法进行航迹规划, 然后在规划的基础上使用背包算法解决任务分配问题。所提算法运算速度较快, 规划效果较好, 对城市环境下无人机作战具有重要的意义。

收稿日期: 2013-11-15

修回日期: 2013-12-02

基金项目: 航空科学基金(20135896027)

作者简介: 许卓凡(1989—), 男(回族), 江苏南京人, 硕士生, 研究方向为无人飞行器控制理论与应用。

# 1 城市环境建模

## 1.1 建筑物建模

在城市作战环境中,街巷纵横,建筑物高大、坚固、密集,地下工程设施复杂,给城市建模带来了难度。然而,无人机是在一定高度飞行的智能飞行器,所在高度平面的主要障碍是城市中的建筑物,因此只需对无人机所在高度平面内的建筑物建立二维模型。把城市中的建筑物看作由长方体和圆柱体构成的基本立体几何图形,使用矩形以及圆形表示建筑物在一定高度的剖面形状,如图 1 所示。

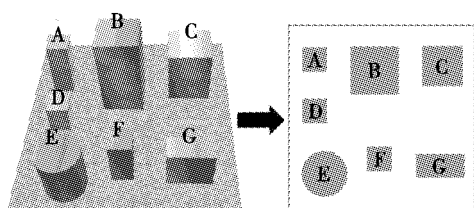


图 1 城市环境建模

Fig. 1 Modeling of urban environment

## 1.2 威胁建模

为了增加无人机的生存率,本文不考虑航迹通过禁飞区以及威胁区的情况,因此,为了方便,将禁飞区和威胁区统一称为威胁区。

在城市作战中,由于建筑物密集、地形复杂,不方便部署大型武器,因此普遍存在的威胁源一般是小范围武器,如枪械、火箭筒、导弹等,这些威胁可以简化为一个以发射点为原点的半球形,如图 2 所示。

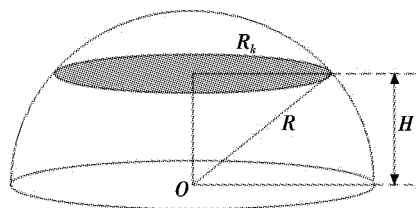


图 2 威胁建模

Fig. 2 Modeling of threats

假设无人机的飞行高度为  $H$ ,那么对于无人机来说威胁区域表示为

$$R_k = \begin{cases} \sqrt{R^2 - H^2}, & 0 \leq H \leq R \\ 0, & H > R \end{cases} \quad (1)$$

## 1.3 建筑物区域预处理

由于通视图法生成的航路都是沿着建筑物边缘的直线路径,对于无人机来说贴着建筑物的边缘飞行具有一定的危险,因此需要在使用改进通视图法前对建筑物区域做一定的处理。

如图 3 所示,对于矩形区域,沿着对角线的方向把 4 个顶点分别向外拓展一段距离,对于圆形区域,把半

径从  $R_1$  增加到  $R_2$ , 设

$$\varphi = AA' = BB' = CC' = DD' = R_2 - R_1 \quad (2)$$

$\varphi$  值的选取要根据实际使用的无人机尺寸和任务的具体要求决定,选取过小会导致与建筑物碰撞的风险增加,过大会增加航路距离,从而增大成本。

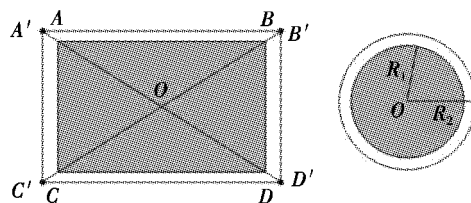


图 3 建筑物区域预处理

Fig. 3 Pretreatment of buildings

# 2 航迹规划

## 2.1 改进通视图法

通视图是指由规划空间中的障碍物互相可见顶点间的连线构成的图形,如图 4 所示。这是国外最早用于航迹规划的方法之一<sup>[7]</sup>,具有算法实现简单、运行速度较快的特点。

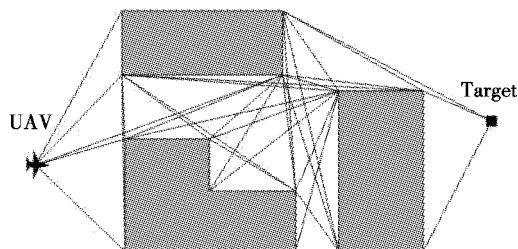


图 4 通视图

Fig. 4 Intervisibility graph

对于城市环境中的航迹规划问题,由于大多数建筑物的俯视图都可以简化为矩形,比较容易找出其顶点,因此适合使用通视图法规划。但是城市中的建筑除了立方体之外还存在部分圆柱体建筑,而传统的通视图方法中并没有涉及圆形区域的规划。因此,为了在规划中加入简化为圆形的建筑物,需要对基本通视图法做以下改进:除了无人机初始位置点、目标点以及矩形建筑物互相可见的顶点互相连线之外,以上顶点还要向圆形做切线,以形成新的航路,如图 5 所示。

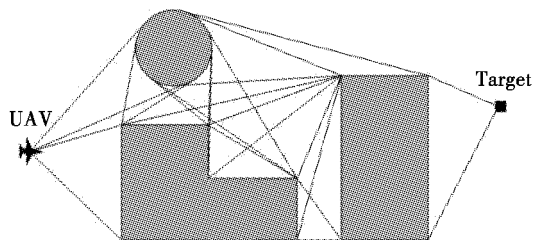


图 5 改进通视图

Fig. 5 Improved intervisibility graph

## 2.2 Dijkstra 寻优算法

Dijkstra 算法是典型的最短路径算法,用于计算图中一个节点到其他节点的最短路径,主要特点是以起始点为中心向外层层扩展,直至扩展到终点位置,该算法能够找到最短路径的最优解。算法流程如下所述。

1) 航路的起点(无人机位置)为 Start,终点(目标点位置)为 Target,当前位置点为  $u$ ,从起点到达各点的距离代价记为  $d(u)$ 。

2) 对于通视图中的每一个点,将从起点到达该点的代价  $d(s)$  设置为无穷大。

3) 将起点到其自身的代价设置为零,将  $S$  初始化为一个空集。

4) 将  $Q$  设置为全体通视图点的集合。

5) 如果  $Q$  中仍然有点,并且  $u \neq \text{Target}$  (即当前点并非终点),循环以下部分:

① 从所有的  $Q$  中寻找从起点到其代价为最小的点,记为  $u$ ;

② 将  $u$  放入集合  $S$ ;

③ 对于每一个和  $u$  有链接的点  $v$ ,若  $d(v) > d(u) + \text{edge\_cost}$ ,即起点到  $v$  点的代价大于从起点经过  $u$  点到达  $v$  点的代价,那么将起点到  $v$  点的代价设置为  $d(v) = d(u) + \text{edge\_cost}$ ;

④ 将  $u$  从集合  $Q$  中移除。

其中,  $\text{edge\_cost}$  是  $u$  点到达  $v$  点的代价,算法不断重复,直到找到从无人机位置到目标点位置的最短路径。

## 3 任务分配

基本的任务分配问题可以使用多维度、多选择背包算法(Multi-dimensional Multiple-choice Knapsack Problem, MMKP)解决<sup>[8]</sup>,即在资源一定的情况下,如何选择背包使总体的某项性能达到最大。在 MMKP 算法中,所有的货物都有一定的价值,但同时也会占用一定的资源,算法的目的是选择货物的组合使得在资源受限的情况下达到最大价值。

在无人机任务分配问题中,货物或者是对象代表了无人机访问目标点的排列顺序,限制条件就是每一个目标点都必须被访问一次,每一个无人机必须要有一条可选的路线,优化的目标是使得所有航路的代价和最小。在这个问题中,每一个可选的排列都被赋予了一定的代价,MMKP 算法就是通过比较这些代价来找到最优的航路组合。无人机任务分配的问题可以描述为

$$\min J = \sum_{i=1}^N c_i x_i \quad (3)$$

式中:  $c_i$  为每一段路径的代价值;  $x_i$  为一个二进制开关变量,如果路径  $i$  被选择了则等于 1,否则等于 0。

## 4 算法分析

### 4.1 多机协同任务规划问题描述及约束

设  $V = \{V_i, i = 1, 2, \dots, N_v\}$ , 为执行任务的 UAV 集合;  $T = \{T_i, i = 1, 2, \dots, N_v\}$ , 为相对应的任务目标所构成的集合;  $M = \{M_i, i = 1, 2, \dots, N_p\}$ , 为威胁区域集合;  $E$  为  $N_L \times N_w$  的任务区域; 任务起点为  $S_i$ ;  $V_i$  的轨迹  $R_i$  由一系列导航点  $\{np_k^{(i)} = (x_k^{(i)}, y_k^{(i)}), k = 1, 2, \dots, n_i\}$  构成。

1) 空间协同约束。

多 UAV 协同执行任务的过程中,为了避免发生碰撞,任意时刻各 UAV 航路之间必须满足一定的安全空间间隔  $d_{\text{safe}}$ , 设  $u_i(t)$  为  $V_i$  在  $t$  时刻的位置,则  $\|u_i(t) - u_j(t)\| \geq d_{\text{safe}}, i, j = 1, 2, \dots, N_v, i \neq j$ 。

2) 威胁区域约束。

在生成航迹的过程中,为了避免进入威胁区域,任意时刻各 UAV 必须与威胁区域间隔一定的安全距离  $\varphi$ , 设  $u_i(t)$  为  $V_i$  在  $t$  时刻的位置,则  $d_{\text{is}}(u_i(t), M_i) \geq \varphi, i = 1, 2, \dots, N_v$ , 其中,  $d_{\text{is}}$  表示无人机  $V_i$  到威胁区域边缘的垂直距离。

### 4.2 算法流程

本文所提算法的流程如图 6 所示。

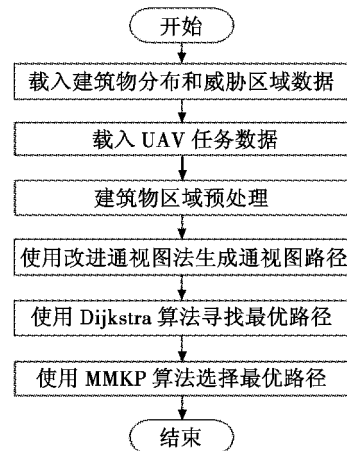


图 6 算法流程

Fig. 6 Flow chart of the algorithm

### 4.3 算法复杂度分析

如图 7 所示,假设通视图所具有的顶点数为  $n$  (不包含圆形区域), 共存在  $m$  个圆形区域, 那么除去自身以外一共有  $n/4 - 1$  个矩形, 矩形的每个顶点最多的可见顶点数为 3, 那么对于任意一个顶点, 可与其他矩形的可见顶点相连接形成的边数为  $3(n/4 - 1)$ , 算上圆形区域一个顶点可以连接形成的边数为  $3(n/4 - 1) + 2m$ , 总共有  $n$  个顶点, 因此算法的时间复杂度为  $O\left(\frac{3}{4}n^2 - 3n + 2mn\right) = O(n^2)$ 。

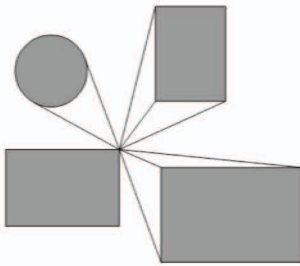


图 7 通视图分析

Fig. 7 Analysis of intervisibility graph

## 5 算法仿真

### 5.1 无威胁情况

假设在  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  的城市空间内,存在一定的建筑物分布以及 3 架无人机  $V_1, V_2, V_3$  和 3 个目标点  $T_1, T_2, T_3$ ,现提出以下任务要求:1) 分别对 3 个目标点进行侦察,每个目标点需侦察一次,每架无人机访问一个目标点;2) 要求所花费的总代价最小。

根据上文提出的算法,首先对建筑物区域进行一定的预处理,小型无人机的翼展一般在  $3\text{ m}$  以内<sup>[9]</sup>,这里选择  $d_{\text{safe}} = \varphi = 10\text{ m}$ ,这个距离对于小型无人机来说满足安全性要求。预处理之后的区域如图 8 所示,图中:灰色矩形和圆形代表预处理之后城市区域的建筑物分布情况;“◆”点表示无人机的位置;“■”点表示目标点。

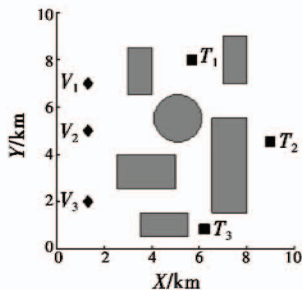


图 8 预处理之后的无人机任务区域

Fig. 8 Mission region of UAV after pretreatment

接下来使用 MMKP 算法求解。在预处理后的任务区域做出通视图,在通视图中找出 3 架无人机分别到 3 个目标点的最短航路,如图 9 所示。

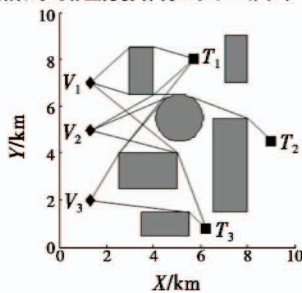


图 9 通视图中的最短航路

Fig. 9 The shortest paths in the intervisibility graph

每条航路的航路距离如表 1 所示。

表 1 无人机分别到 3 个目标点的距离

Table 1 Distance between UAVs and target points

	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_1$	5.025	5.353	7.363
$T_2$	8.253	8.522	10.171
$T_3$	8.078	7.166	5.153

可以得出以下排列组合,每种组合的航路总代价如表 2 所示。

表 2 每种组合的航路总代价

Table 2 Total route costs of each combination

$V_1$ 侦察	$V_2$ 侦察	$V_3$ 侦察	航路总代价/km
$T_1$	$T_2$	$T_3$	18.700
$T_1$	$T_3$	$T_2$	22.362
$T_2$	$T_1$	$T_3$	18.759
$T_2$	$T_3$	$T_1$	22.782
$T_3$	$T_1$	$T_2$	23.602
$T_3$	$T_2$	$T_1$	23.963

根据表 2 可得,当无人机  $V_1$  侦察目标点  $T_1, V_2$  侦察  $T_2, V_3$  侦察  $T_3$  的时候,航路总代价最小,为最优方案,算法总共用时  $0.269\text{ s}$ ,规划生成的航路如图 10 所示。

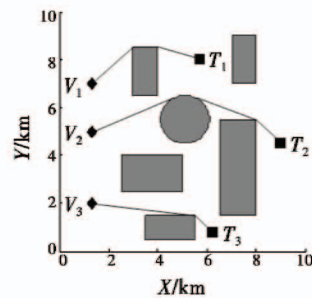


图 10 规划生成的航路

Fig. 10 The route generated by the algorithm

### 5.2 存在威胁的情况

与 4.1 节所假设的城市环境一样,取  $\varphi = 10\text{ m}$ ,预处理之后的区域如图 11 所示,图中:半圆形表示威胁区域;威胁源在半圆形区域的圆心,用“×”表示,无人机不能够直接通过该区域,因此在使用通视图规划的时候就需要避开威胁区域。

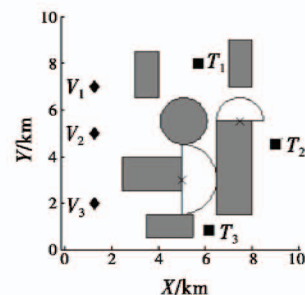


图 11 存在威胁区域的任务空间

Fig. 11 Mission region with threats

同样地,使用 MMKP 算法求解最优任务规划。在预

处理后的任务区域做出通视图,在通视图中找出 3 架无人机分别到 3 个目标点的最短航路,如图 12 所示。

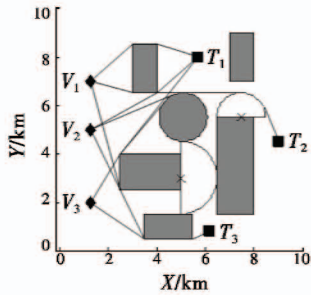


图 12 通视图中的最短航路

Fig. 12 The shortest paths in the intervisibility graph  
每条航路的航路距离如表 3 所示。

表 3 无人机分别到 3 个目标点的距离

Table 3 Distance between UAVs and target points

	km		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_1$	5.025	5.353	7.363
$T_2$	8.841	9.039	11.027
$T_3$	9.581	7.702	5.401

可以得出以下排列组合,每种组合的航路总代价如表 4 所示。

表 4 每种组合的航路总代价

Table 4 Total route costs of each combination

$V_1$ 侦察	$V_2$ 侦察	$V_3$ 侦察	航路总代价/km
$T_1$	$T_2$	$T_3$	19.465
$T_1$	$T_3$	$T_2$	23.754
$T_2$	$T_1$	$T_3$	19.595
$T_2$	$T_3$	$T_1$	23.906
$T_3$	$T_1$	$T_2$	25.961
$T_3$	$T_2$	$T_1$	25.983

根据表 4 可得,当无人机  $V_1$  侦察目标点  $T_1$ ,  $V_2$  侦察  $T_2$ ,  $V_3$  侦察  $T_3$  的时候,航路总代价最小,为最优方案,算法总共用时 0.296 s,规划生成的航路如图 13 所示。

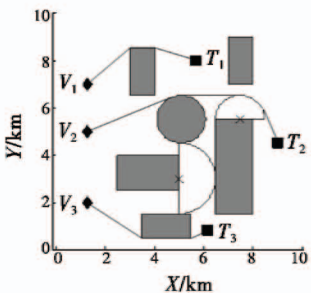


图 13 规划生成的航路

Fig. 13 The route generated by the algorithm

### 5.3 算法快速性比较

对比 A\* 算法与本文提出的改进通视图生成算法的快速性,结果如图 14 所示。虚线为成熟的 A\* 算法生成同样性能指标航路所需的运行时间。

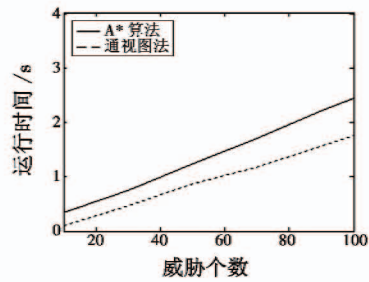


图 14 算法比较

Fig. 14 Comparison of two algorithms

由图 14 可见,通视图法较 A\* 算法运行时间减少了很多。考虑 50 个威胁区域时,算法的执行时间约为 0.9 s,能够满足在线航迹的需要。

从上述仿真结果可以得出以下结论:1) 使用矩形和圆形对城市空间进行建模,方法简单、效果明显,使无人机任务规划问题得到简化,有利于问题的迅速解决;2) 无论是否存在威胁,该算法都能够找到到达目标点的最短路径,安全性较高、解算时间较小,可满足实时规划的要求。

## 6 结束语

本文运用改进通视图法和背包算法较好地解决了在城市作战环境下的任务规划问题,算法具有较好的实时性和准确性,对现有的无人机任务规划发展具有重要的意义。然而,本算法仍有需完善之处,比如考虑不同楼层的形状、无人机在威胁区域内穿过时的代价估计以及无人机的高度可以机动变化情况下的任务规划,这将在后续的研究中进行完善。

### 参考文献

- [1] 魏铁涛,屈香菊. 多机协同与多目标分配任务规划方法[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(8):917-920,924.  
WEI T T, QU X J. Route planning method for multiple vehicles coordinated target assignment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(8):917-920,924.
- [2] 叶文,范洪达,朱爱红. 无人机飞行器任务规划[M]. 北京:国防工业出版社,2011:1-12.  
YE W, FAN H D, ZHU A H. Mission planning for unmanned aerial vehicles[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011:1-12.
- [3] HUO C L, LAI T Y, SUN T Y. The preliminary study on multi-swarm sharing particle swarm optimization: Applied to UAV path planning problem[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC), 2011:1770-1776.

(下转第 19 页)

## 4 结论

体系作战指挥的时效性问题是影响信息化战争进程的关键要素,研究体系作战的节奏问题就显得尤为重要。本文在构建基于信息的体系作战网络化模型基础上,依据作战节点改变战场信息流与信息质量的能力,利用复杂网络的结构特征参数提出了特征信息距离与信息熵来计算网络的整体信息交互节奏,进而基于 OODA 环计算体系作战的指挥节奏。研究表明,充分的网络化交互与均匀的信息能力分布可缩短体系作战指挥周期,同时为下一步深入研究体系作战指挥的同步问题奠定了基础。

### 参考文献

- [1] 李德毅,王新政,胡钢锋. 网络化战争与复杂网络[J]. 中国军事科学,2006,19(3):111-119.  
LI D Y, WANG X Z, HU G F. Network warfare and complex network[J]. Military Science of China, 2006, 19(3): 111-119.
- [2] 胡晓峰,司光亚. 战争模拟原理与系统[M]. 北京:国防大学出版社,2009.  
HU X F, SI G Y. War gaming & simulation principle and system[M]. Beijing: National Defense University Press, 2009.
- [3] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393:440-442.
- [4] ALBERT R, BARABÁSI A L. Topology of evolving networks: Local events and universality[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(24):5234-5237.
- [5] ALBERT R, BARABÁSI A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1):47-97.
- [6] CARES J R. Distributed networked operations; The foundations of network centric warfare[M]. Bloomington: Luni-verse Inc, 2005.
- [7] 金伟新. 体系对抗复杂网络建模与仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2010.  
JIN W X. SoS-Ops M & S based on the complex network[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [8] 王庆功,沈寿林,袁昌平. 基于复杂网络的作战体系网络模型分析[J]. 指挥控制与仿真,2013,35(1):6-10.  
WANG Q G, SHEN S L, YUAN C P. Combat system network model analysis based on complex network[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(1):6-10.
- [9] 江林. 军队指挥的科学[M]. 2版. 北京:军事科学出版社,2011.  
JIANG L. Military-cybernetics[M]. 2nd ed. Beijing: Military Science Press, 2011.
- [10] LING F M, MOON T, KRUZINS E. Proposed network centric warfare metrics; From connectivity to the OODA cycle[J]. Military Operations Research, 2005, 10:5-13.
- [11] CHEN Y Q, PACE P E. Simulation of information metrics to assess the value of networking in a general battlespace topology[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2008:1-6.
- (上接第 14 页)
- [4] 任国军. 美军联合作战情报支援研究[M]. 北京:军事科学出版社,2010:1-18.  
REN G J. US army combined operation intelligence support research[M]. Beijing: Military Science Publishing Press, 2010:1-18.
- [5] VINCENT P, RUBIN I. A framework and analysis for cooperative search using UAV swarms[C]//ACM Symposium on Applied Computing, Nicosia, Cyprus, 2004:79-86.
- [6] O'ROURKE K P, CARLTON W B, BAILEY T G, et al. Dynamic routing of unmanned aerial vehicles using reactive tabu search[J]. Military Operations Research Journal, 2001, 6(1):5-30.
- [7] SUJIT P B, BEARD R W. Distributed sequential auctions for multiple UAV task allocation[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2007:3955-3960.
- [8] SCHUMACHER C, CHANDLER P, PACHTER M, et al. UAV task assignment with timing constraints via mixed-integer linear programming[C]//AIAA 3rd Unmanned-Unlimited Technical Conference, 2004:238-252.
- [9] 刘亚威,黄俊. 微型固定翼飞行器的最新发展动态研究[J]. 航空兵器,2008(1):12-16.  
LIU Y W, HUANG J. Research of the latest development trends of fixed-wing micro aerial vehicles[J]. Aero Weaponry, 2008(1):12-16.