

引用格式:郑超,许阳明. 无人机覆盖搜索地域通信网交叉式航路规划[J]. 电光与控制,2018,25(5):31-35. ZHENG C, XU Y M. Crossed path planning for UAV reconnoitering field communication network[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(5):31-35.

无人机覆盖搜索地域通信网交叉式航路规划

郑超, 许阳明

(国防科技大学电子对抗学院,合肥 230037)

摘要: 针对地域通信网的侦察搜索问题,提出一种以交叉式航路来实现对地域通信网部署区域完全覆盖搜索的无人机航路规划方法。首先,根据地域通信网结构特点以及干线节点天线波束特性,定性分析得到无人机侦察干线节点时的最大侦察距离与盲区侦察距离,并分析得到无人机搜索干线节点的静态模型以及动态模型;其次,根据侦察模型,建立并优化无遗漏搜索的无人机交叉式搜索航路模型,该方法可保证搜索到地域通信网所有干线节点,并提高任务执行效率;最后,对无人机交叉搜索航路进行仿真,仿真结果表明,该方法能有效搜索到地域通信网每一个干线节点,并求解了无人机交叉式覆盖搜索航路代价。

关键词: 无人机; 地域通信网; 交叉航路; 覆盖搜索; 航路规划

中图分类号: V279 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.05.007

Crossed Path Planning for UAV Reconnoitering Field Communication Network

ZHENG Chao, XU Yang-ming

(Institute of Electronic Countermeasures, NUDT, Hefei 230037, China)

Abstract: To address the problem in reconnoitering the field communication network, a UAV path planning method is put forward for a full-coverage search of the deployment area of the field communication network by using crossed paths. Firstly, according to the structural characteristics of the field communication network and the node antenna beam, the maximum reconnaissance distance and the blind reconnaissance distance of UAV reconnoitering the nodes are obtained through a qualitative analysis. Then the static model and the dynamic model of UAV reconnoitering the nodes are obtained as well. Then, based on the reconnoitering model, the UAV crossed searching path model with exhaustive searching abilities is built and optimized. This method can find out all the nodes of the field communication network and improve the search efficiency. Lastly, a simulation of UAV crossed searching path is carried out. The simulation results indicate that the method can find out all the nodes of the field communication network, and the cost of UAV crossed searching path is calculated.

Key words: UAV; field communication network; crossed path; covering search; path planning

0 引言

地域通信网是由栅格状干线节点和传输系统组成的覆盖战术战役区域的栅格状通信系统,包括干线节点、大小入口节点、无线用户入口节点以及移动用户车辆等^[1]。干线节点间通过微波接力机设备相连组成栅格状网络,实现一定地域的通信网络覆盖,且节点间距离一般在20 km左右。节点波束具有方向性强以及波

束窄的特点,这使得干线节点不易被侦察到。近年来,无人机在战场中发挥着越来越重要的作用。在军事上,电子对抗无人机因体积小、造价低、无人员伤亡、机动性强等特点,主要用于执行侦察、监视、通信中继、电子对抗、战果评估等任务。文献[2]提出在无人机平台上通过对地域通信网节点信号的侦察、测向和辐射源定位等手段,获取地域通信网信息的方法。然而目前的文献只研究了利用无人机侦察地域通信网的有效性与可行性,并没有得到利用无人机侦察地域通信网的具体方法。

由于地域通信网各个干线节点在待侦察区域中的

收稿日期:2017-06-12

修回日期:2018-01-12

作者简介:郑超(1992—),男,浙江德清人,硕士生,研究方向为无人机系统与技术。

位置以及节点间的通信链路往往是未知的,可以利用无人机对地域通信网部署区域覆盖搜索来得到这些信息。无人机区域覆盖路径规划(Coverage Flight Path Planning, CFPP)定义为:在满足某种(某些)性能指标最优的前提下,避开障碍物和威胁源,规划出一条传感器探测区域遍历待覆盖区域的最优路线^[3-4]。

因此本文提出一种利用无人机以纵横交叉的航路实现对地域通信网部署区域覆盖搜索的方法,保证无人机能侦察到区域内任意位置的干线节点以及节点间所有通信链路,有效提高了任务执行效率。

1 无人机侦察干线节点模型确定

不同于普通的光学侦察,地域通信网干线节点天线波束窄、增益高的特点,使无人机对干线节点的侦察搜索必须满足严格的空域条件,满足空域条件是指无人机必须飞入干线节点定向天线波束覆盖的区域。

地域通信网干线节点天线是定向的,如图 1 所示。图中: h 为无人机飞行高度; P_1, P_2 分别为到达盲区侦察距离时与最大侦察距离时的无人机位置。

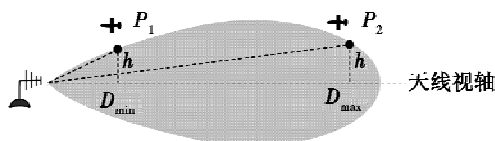
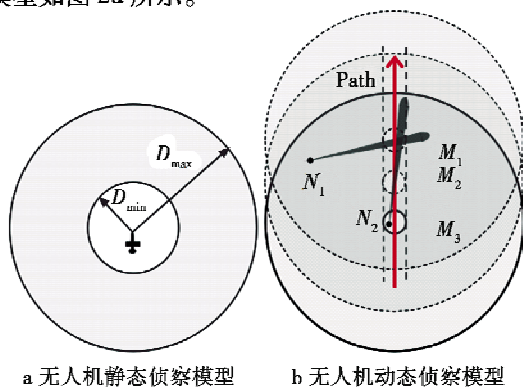


图 1 侦察距离示意图

Fig. 1 Distance of reconnaissance

无人机处于干线节点天线的波束轴向方位:当无人机与干线节点小于某个距离时,由于俯仰角过大,无人机无法侦察到节点天线辐射的信号,称该距离为盲区侦察距离 D_{\min} ;当无人机与干线节点距离过大时,会产生严重的信号衰减,当距离大于一定值,无人机无法侦察到节点天线辐射的信号,称该距离为最大侦察距离 D_{\max} 。无人机机载侦察设备侦察区域投影到地面后的模型如图 2a 所示。



a 无人机静态侦察模型 b 无人机动态侦察模型

图 2 无人机侦察模型

Fig. 2 Reconnaissance model of UAV

以无人机为圆心,在半径为 D_{\min} 的圆内的干线节点,无论波束指向何处都无法被侦察到,该区域称为侦察盲区;在距离圆心 D_{\min} 至 D_{\max} 的圆环内的干线节点,当波束指向圆心时节点可被侦察到,该区域称为有效侦察区域。

对于时刻运动的无人机来说,其侦察区域的圆心一直改变,圆心产生的轨迹即无人机的飞行航路 Path,如图 2b 中红色带箭头实线所示。图中,节点 N_1 的波束与无人机航路交于一点 M_1 ,表示当无人机位于点 M_1 时,干线节点 N_1 的波束正好指向无人机(满足空域条件),若节点 N_1 至交点 M_1 的距离 d_1 大于盲区侦察距离 D_{\min} 且小于最大侦察距离 D_{\max} (满足能量域条件),节点 N_1 能被沿航路 Path 飞行的无人机侦察到。

因此对于运动的无人机来说,只要其航路穿过节点波束,且满足侦察距离条件,节点就能被侦察到。

在飞行的过程中,无人机的侦察盲区一直随其位置的改变而改变,某个时刻的侦察盲区可能在下个时刻可能不再是侦察盲区而是有效侦察区域。称图 2b 中两条虚线之间宽度为 $2D_{\min}$ 的区域为似侦察盲区,似侦察盲区由时刻移动的侦察盲区叠加而成,称两条虚线为似盲区边界线。如当无人机位于 M_3 位置时,节点 N_2 处于无人机侦察盲区内,无法被侦察到;而当无人机飞行至 M_2 位置时,节点 N_2 处于无人机侦察盲区外,可被侦察到,因此似侦察盲区可被视为有效侦察区域来研究。

2 以交叉式航路覆盖搜索地域通信网的航路规划方法

假设地域通信网干线节点在待侦察区域内各个位置存在的概率是均匀分布的,节点波束指向也是均匀分布的。当无人机航路以合适的间隔距离 l “包围”具有定向天线波束的干线节点时,无论干线节点波束指向何处都能被无人机侦察到。当纵向扫描线间隔与横向扫描线间隔大小相等时,无人机航路所围区域范围最大,重复侦察区域最小,侦察效率最高。本文提出的无人机以交叉航路覆盖搜索地域通信网的方法是指无人机通过纵横两个相互垂直的交叉航路,能保证搜索到待侦察区域内每一个干线节点的方法。

分别讨论能保证无人机对待侦察区域内节点的完全覆盖搜索的交叉航路,以及对航路的优化方法。

2.1 覆盖搜索策略

给定一个有界的封闭待侦察区域 E , 规模为 $L \times W$ ^[5], 其中, L 为无人机横向搜索路径长度, W 为无人机纵向搜索路径长度。如图 3 中蓝色实线框所示,未知的地域通信网部署在该区域内。以区域左下角顶点 A

为原点,左边界 AB 为 Y 轴,下边界 AD 为 X 轴建立平面直角坐标系。为了使航路“包围”待侦察区域,无人机的初始航路在待侦察区域外侧,设无人机起始位置为点 $(-D_{\min}, -D_{\min})$ 。红色实线表示无人机航路,搜索过程如图3所示^[6-7]。

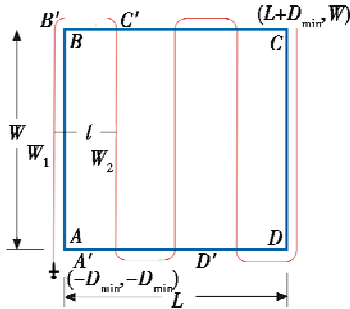


图3 纵向搜索

Fig.3 Vertical search

用以下6个步骤描述无人机完成对地域通信网覆盖搜索的交叉航路。

- 1) 如图3所示,无人机从起始位置 $(-D_{\min}, -D_{\min})$ 开始起飞,速度方向竖直向上。
- 2) 无人机到达待侦察区域的上边界 BC 延长线上的 B' 后,进行右转弯—直线—右转弯飞行,到达上边界 BC 上的 C' ,无人机的飞行航路为 $W_1 \rightarrow B'C'$ 。
- 3) 无人机到达待侦察区域的下边界 AD 上的 A' 后,进行左转弯—直线—左转弯飞行,到达下边界 AD 上的 D' ,无人机的飞行航路为 $W_2 \rightarrow A'D'$ 。重复步骤1)~3),直到无人机完成对整个区域的纵向搜索,到达点 $(L+D_{\min}, W)$ 。

4) 如图4所示,无人机完成对整个区域的纵向搜索后,在点 $(L+D_{\min}, W)$ 左转 $\pi/2$ 进行纵横搜索转换,从位置 $(L+D_{\min}, W+D_{\min})$ 开始横向飞行,速度方向水平向左。

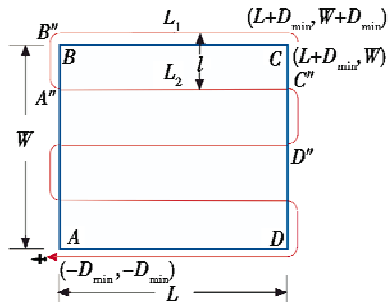


图4 横向搜索

Fig.4 Horizontal search

- 5) 无人机到达待侦察区域的左边界 AB 延长线上的 B'' 后,进行左转弯—直线—左转弯飞行,到达左边界 AB 上的 A'' ,无人机的飞行航路为 $L_1 \rightarrow B''A''$ 。
- 6) 无人机到达待侦察区域的右边界 CD 上的 C'' 后,进行右转弯—直线—右转弯飞行,到达右边界 CD 上

的 D'' ,无人机的飞行航路为 $L_2 \rightarrow C''D''$ 。重复步骤4)~6),直到无人机完成对整个区域的横向搜索,到达起始位置 $(-D_{\min}, -D_{\min})$ 后结束任务。

合并纵横2条航路,得到交叉扫描线式覆盖搜索航路如图5所示。

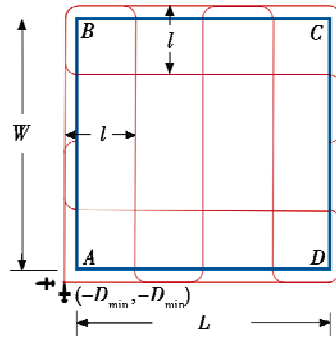


图5 交叉航路覆盖搜索路径

Fig.5 Crossed path of UAV

2.2 扫描线间隔距离的确定

取在待侦察区域内两两垂直的4条航路为例进行分析,如图6所示。

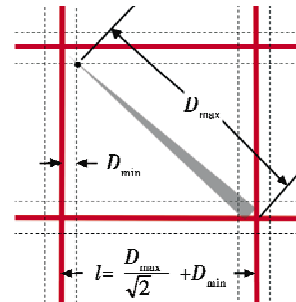


图6 节点位于似侦察盲区外

Fig.6 The node is outside the blind zone

图中:红色实线表示无人机航路,间隔为 l ;航路两侧的黑色虚线表示似盲区边界线;黑色圆点表示无人机位置;长条状灰色部分表示无人机天线波束。下面根据节点可能存在的位置讨论确定航路间隔 l 的大小。

- 1) 节点位于似侦察盲区外,即节点位于图中正方形框内,当节点波束方向为对角线方向时,节点到航路的距离最远,如图6所示,当该距离小于无人机最大侦察距离,即

$$(l - D_{\min})\sqrt{2} \leq D_{\max} \quad (1)$$

对于在正方形框内任意位置以及波束指向任意的节点,其波束始终能够被无人机航路穿过,节点能被无人机侦察到,此时 $l \leq (D_{\max}/\sqrt{2}) + D_{\min}$ 。

- 2) 节点位于似侦察盲区内,由于无人机始终在飞行侦察,视似侦察盲区为有效侦察区域。如图7所示,节点波束方向为对角线方向时,节点到航路的距离最远,该距离小于无人机最大侦察距离,即

$$(l + D_{\min})\sqrt{2} \leq D_{\max} \quad (2)$$

而此时节点与邻近航路有交点,且到交点的距离大于盲区侦察距离 D_{\min} 。节点被多次侦察到,使得侦察效能降低。

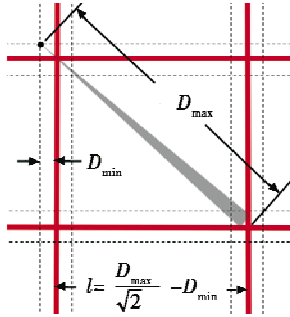


图 7 节点位于似侦察盲区内

Fig. 7 The node is inside the blind zone

3) 同时考虑节点到邻近航路距离最小的情况,图 8 中空心圆表示无人机位于纵横航路交点处时的侦察盲区,节点位于以纵横航路交点为圆心的侦察盲区的边界线上,且波束指向为对角线方向。当无人机在邻近航路上时,该节点无法被侦察到,而当无人机在其他航路上时,节点能被侦察到。节点到航路的距离小于最大侦察距离,即

$$\sqrt{2}l + D_{\min} \leq D_{\max} \quad (3)$$

2 条航路之间的距离 l 最大只能取 $(D_{\max} - D_{\min})/\sqrt{2}$,在该条件下,位于待侦察区域内任意位置以及波束指向任意的节点,其波束始终能够被无人机航路穿过,节点可被无人机侦察到。

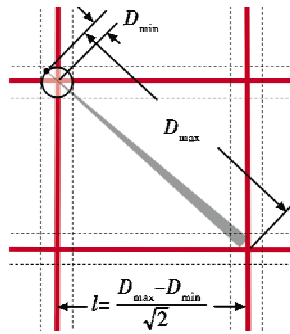


图 8 航路间隔的确定

Fig. 8 Gap between flight paths

2.3 调头转弯路径优化

为了使航路能够“包围”每一处的节点,且受到最小转弯半径的约束,无人机需要在待侦察区域外部进行转弯调头。无人机在结束一次纵(横)向搜索后需要调头进行下一次纵(横)向搜索,称无人机结束一次纵(横)向搜索飞离搜索区域的点为飞出点 Z_1 ,调头后进入搜索区域的点为飞入点 Z_2 。无人机飞出区域边界后,要以最短的路径长度回到待侦察区域内执行侦察搜索任务,即求飞出点与飞入点之间的最短路径长度。

如图 9 所示,当无人机结束一次纵向搜索,在点 Z_1 飞离区域边界时开始转弯,为了不遗漏任意位置的节点,取转弯半径 R 为 D_{\min} ^[8]。由计算得到盲区侦察距离一般大于最小转弯半径,满足无人机机动性能要求。

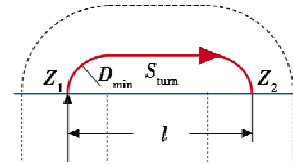


图 9 转弯点的确定

Fig. 9 Turning point

扫描线间隔 $l > 2D_{\min}$,为使无人机由点 Z_2 垂直进入预定航路,无人机在右转 $\pi/4$ 后继续往前水平飞行 $l - 2D_{\min}$,再右转 $\pi/4$ 由点 Z_2 进入待侦察区域执行侦察搜索任务,称这样的转弯方式为常规半圆转弯。图 9 中,蓝色实线表示区域边界;黑色虚线表示无人机的似盲区边界线;红色实线表示无人机实际航路。每一个转弯圆弧的路径长度为 $\pi D_{\min}/2$,完成整个调头的路径,即图 9 中粗实线部分长度为

$$S_r = (D_{\max} - D_{\min})\sqrt{2} + (\pi - 2)D_{\min} \quad (4)$$

无人机在进行纵横航路改变时,可能转过 $\pi/2$ 也可能转过 $3\pi/2$,因此转弯路径长度为 $S_x = \pi D_{\min}/2$ 或 $S_x = 3\pi D_{\min}/2$ 。

2.4 剩余宽度分析

无人机结束在待侦察区域内部的搜索后,为了“包围”待侦察区域,需要沿区域边界外 D_{\min} 处的预定航路飞行,称无人机在区域内部最后一次搜索的航路到区域边界外 D_{\min} 处的预定航路的距离为剩余宽度 L_{left} 。当剩余宽度 L_{left} 不足 l 时,需要根据剩余宽度 L_{left} 的大小讨论无人机以何种方式调头转弯才能保证转弯后沿外侧预定航路飞行。

1) 当 $L_{\text{left}} \geq 2D_{\min}$ 时,如图 10 所示。

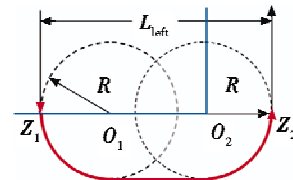


图 10 $L_{\text{left}} \geq 2D_{\min}$ 时的转弯路径

Fig. 10 Turning path when $L_{\text{left}} \geq 2D_{\min}$

图中:蓝色实线表示区域边界,与常规半圆转弯方式类似,无人机由点 Z_1 飞出后先转 $\pi/4$ 再往前水平飞行 $L_{\text{left}} - 2D_{\min}$ 距离,后转 $\pi/4$ 进入预定航路继续执行侦察搜索任务,称这样的转弯方式为 Ω 形边界转弯^[9];红色实线部分为转弯路径,长度为

$$S_{\Omega} = L_{\text{left}} + (\pi - 2)D_{\min} \quad (5)$$

2) 当 $L_{\text{left}} < 2D_{\min}$,如图 11 所示。

为保证无人机由点 Z_2 水平进入预定航路,如图 11a 所示,无人机由点 Z_1 飞出,先沿圆弧右转 φ ,再左转 $\varphi + \pi$,最后直线飞行 $2R\sin \varphi$ 由点 Z_2 水平进入待侦察区域继续执行侦察搜索任务;或如图 11b 所示,无人机由点 Z_1 飞出后先直线飞行 $2R\sin \varphi$,再沿圆弧左转 $\varphi + \pi$,最后右转弯 φ 由点 Z_2 水平进入待侦察区域继续执行侦察搜索任务,称这样的转弯方式为 η 形边界转弯,转弯路径长度为 L_η 。其中 $\varphi = \arccos(L_{left}/2D_{min})$ 。红色实线部分为转弯路径,长度为

$$S_\eta = \pi D_{min} + 2\varphi D_{min} + \sqrt{4D_{min}^2 - L_{left}^2} \quad (6)$$

设完成整个交叉航路的覆盖搜索任务共需要进行横向搜索次数为 n_L 、纵向搜索次数为 n_W 、常规半圆转弯次数为 n_r 、 η 形边界转弯次数为 n_η 、 Ω 形边界转弯次数为 n_Ω 、纵横航路改变次数为 1,因此可得到无人机侦察完整整个任务区域的总航程为

$$S_{total} = n_L L + n_W W + n_r S_r + n_\Omega S_\Omega + n_\eta S_\eta + S_X \quad (7)$$

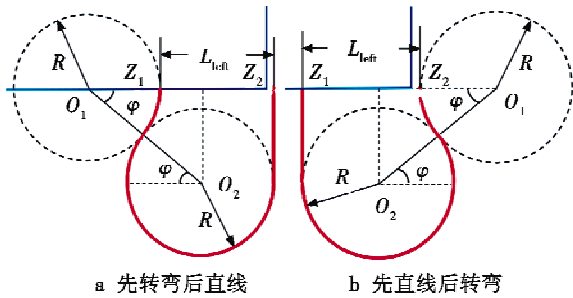


图 11 当 $L_{left} < 2D_{min}$ 时的转弯路径
Fig. 11 Turning path when $L_{left} < 2D_{min}$

3 实例仿真分析

为了验证无人机以交叉式航路覆盖搜索地域通信网的高效性,现进行仿真分析。设待侦察区域 E 为 $L \times W$ ($200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$) 的矩形区域,无人机侦察地域通信网干线节点的盲区侦察距离 D_{min} 与最大侦察距离 D_{max} 分别为 2 km 与 92 km ,得到航路间隔 $l = 45\sqrt{2} \text{ km}$,无人机起点与终点位置为 $(-2 \text{ km}, -2 \text{ km})$ 。无人机对该待侦察区域的交叉覆盖搜索航路如图 12 所示。其中:蓝色实线表示待侦察区域边界;红色实线表示无人机航路;红色箭头表示无人机飞行航向。

由仿真结果可以看到,无人机从起点 $(-2 \text{ km}, -2 \text{ km})$ 开始搜索,对该区域的交叉搜索共有 5 次纵向搜索与 5 次横向搜索,即 $n_W = 5, n_L = 5$,常规半圆转弯次数 $n_r = 6$, η 形边界转弯次数为 $n_\eta = 0$, Ω 形边界转弯次数 $n_\Omega = 2$,纵横航路改变次数为 1,即 $n_L = 5, n_W = 5, n_r = 6, n_\eta = 0, n_\Omega = 2, L = 200 \text{ km}, W = 200 \text{ km}, S_r = 65.9 \text{ km}, S_\Omega = 13.4 \text{ km}, S_X = \pi \text{ km}$,因此无人机交叉航路的总航程为 $S_{total} = 2425.4 \text{ km}$,并得到由相邻航路围成的

封闭区域内航路点的距离最大不超过最大侦察距离,表明该区域内的节点都能被无人机侦察到,因此无人机通过交叉式的航路侦察地域通信网,能保证搜索得到待侦察区域内所有干线节点。

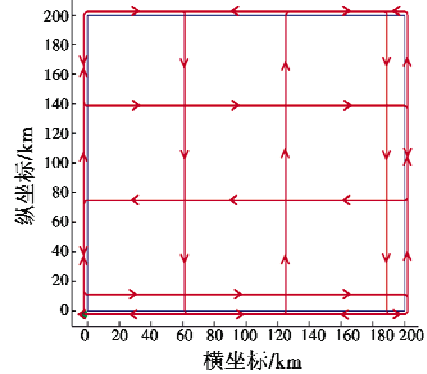


图 12 无人机以交叉式航路覆盖搜索地域通信网仿真
Fig. 12 Simulation diagram of flight path

4 结论

本文通过研究无人机侦察地域通信网干线节点时产生的盲区侦察距离以及最大侦察距离,建立了无人机侦察模型,提出了无人机以交叉航路覆盖搜索地域通信网的方法,可有效搜索得到待侦察区域内的所有干线节点,提高了任务的执行效率。

参考文献

- [1] 柯宏发,郝光宇,葛海龙,等. 地域通信网的干扰技术研究[J]. 电子对抗技术,2004,19(3):40-46.
- [2] 韩成中,夏飞海,徐龙海,等. 无人机平台下对地域通信网的情报获取技术[J]. 通信对抗,2012,31(1):20-24.
- [3] 王文旭,李立,李俨. 无人机覆盖航迹规划中子区域合并方法设计[J]. 电子设计工程,2015,23(11):115-118.
- [4] 陈海,何开锋,钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报,2016,37(3):928-935.
- [5] 龙国庆,祝小平,董世友. 多 UAV 协同区域覆盖侦察方法[J]. 火力与指挥控制,2011,36(10):49-52.
- [6] 王勋,姚佩阳,梅权. 多无人机协同运动目标搜索问题研究[J]. 电光与控制,2016,23(8):18-22.
- [7] 轩永波,黄长强,吴文超,等. 运动目标的多无人机编队覆盖搜索决策[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(3):539-544.
- [8] 于驹男,周锐,夏洁,等. 多无人机协同搜索区域分割与覆盖[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(1):167-173.
- [9] 万明,代忠,褚文奎. 无人机扫描线区域覆盖中的转弯航迹规划[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(9):1750-1754.