

空中骨干网覆盖策略

郑博^{1,2}, 张衡阳¹, 李勇², 程伟²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077; 2. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129)

摘 要: 将采用定向天线的高空长航时无人机 (HALE-UAV, high-altitude long-durance unmanned aerial vehicle) 和长方体形状的空走廊作为研究对象, 覆盖策略的基本思想是提取运动球顶锥体的不变覆盖区域——圆柱体, 作为基本覆盖单元填充空中走廊; 总体目标是在满足圆柱体的高大于空中走廊高度的条件下, 使用尽可能少的 HALE-UAV。采用几何方法分析了 HALE-UAV 两种典型的运动轨道——圆形和三角形轨道, 得到了圆柱体底面半径和高的数学表达式。通过最优化理论比较两种覆盖策略, 得到了最优覆盖方案。研究表明, 圆形轨道总体优于三角形轨道; 最优方案是采用准静态浮空平台, 次优方案是采用半径较小的圆形轨道, 或边长较小的三角形轨道, 同时单个轨道上布设一个 HALE-UAV。

关键词: 空中骨干网; 覆盖; 空中走廊; 高空长航时无人机; 圆柱体

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018226

Coverage in airborne backbone network

ZHENG Bo^{1,2}, ZHANG Hengyang¹, LI Yong², CHENG Wei²

1. Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China

2. College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

Abstract: The high-altitude long-durance unmanned aerial vehicle (HALE-UAV) equipped with directional antenna and the cuboid-shaped air corridor (AC) were taken as the study objects, and the basic idea was to extract the invariant coverage area of moving spherical cones, cylinder, as the basic component to fill AC. The general goal was to employ HALE-UAV as few as possible under the condition that the height of the cylinder was larger than that of AC. The circular and triangular orbits of HALE-UAV were analyzed in geometry respectively, and the mathematical expressions of the radius and height of the cylinder were derived. Then two coverage schemes were introduced. Through comparing the two schemes by optimization theory, the optimal coverage strategy was derived. Results show that the circular orbit is better than the triangular orbit. Moreover, the optimal solution is to employ the quasi-static floating platforms, and the suboptimal is to adopt the circular orbit of a small radius, or the triangular orbit of a small side, with a HALE-UAV on an orbit.

Key words: airborne backbone network, coverage, air corridor, high-altitude long-durance unmanned aerial vehicle, cylinder

1 引言

在未来战争中, 为了满足指控中心与各种作战单元之间的信息通信需求, 战场无线通信网络必须具有高速率、大容量、超视距、无缝覆盖、实时接入的信息传输能力。空中骨干网是一个利用长滞空

平台组网构建的大尺度、高速率、超视距通信覆盖的网络, 为视距内和视距外的陆、海、空各种作战单元提供接入、转发和路由功能, 可满足战场上各类业务信息的实时性传输需求^[1-2], 它不需要依靠网络基础设施, 采用移动 ad hoc 网络的组网方式, 根据作战任务临时布设, 具备自组织、自修复的能力

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-10-31

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No.20161996010, No.20150896010)

Foundation Item: The Aeronautical Science Foundation of China (No. 20161996010, No.20150896010)

和快速机动、灵活高效组网的优势。近年来，美军致力于该领域的研究和建设，开展了联合空中层网络（JALN, joint aerial layered network）^[3]、战场空中通信节点（BACN, battlefield airborne communications node）^[4]、机载战术网络（ATN, airborne tactical network）^[5]等项目计划。

覆盖算法是空中骨干网的一个基础性研究问题。如何利用高空长航时无人机（HALE-UAV, high-altitude long-durance unmanned aerial vehicle）等长滞空平台的规律运动对有待覆盖空域进行稳定可靠的无缝覆盖具有较高的研究价值。近年来，无线传感器网络（WSN, wireless sensor network）的覆盖控制问题已引起了研究人员的广泛关注^[6-8]。其中，水声传感器网络（UWSN, underwater sensor network）等三维 WSN^[9-11]，以及涉及移动节点的 WSN 的覆盖问题也是研究热点问题^[12-15]。但这些研究成果对空中骨干网覆盖问题的参考价值较少，该问题的挑战性在于如何通过对基于某种运动方式的节点进行合理而高效的布设，从而实现三维空间的完全覆盖。文献[16]针对多无人机传感器网络覆盖问题，提出了基于势博弈与 log-linear 学习的分布式最优传感器配置方法，但该方法并不适用于空中骨干网中规律运动的 HALE-UAV。文献[17]针对圆形轨道上运动的 HALE-UAV 研究了空中骨干网的覆盖优化问题，但缺少对其他运动轨道的分析。此外目前还鲜有其他公开发表的研究成果。

本文针对空中骨干网覆盖问题，考虑了 HALE-UAV 的两种典型的运动轨道——圆形和三角形轨道，并采用最优化理论比较了两种覆盖策略，得出了完全覆盖的最优方案。研究结果对空中骨干网的设计具有一定的参考价值。

2 网络模型及问题描述

本文设计的空中骨干网将预先布设的 HALE-UAV 作为骨干节点，通过骨干节点实现地面、海上、空中各种作战单元的实时接入，其网络架构如图 1 所示。图 1 中，虚线部分为有待覆盖的空中走廊（AC, air corridor），各 HALE-UAV 布设于 AC 的上方，对 AC 进行通信覆盖。AC 可建模为一定数量的长方体集合，如图 2 所示。为了保证 AC 内飞机信息传输的实时性和可靠性以及资源利用的有效性，本文需要研究的问题是如何基于 HALE-UAV 特定的运动方式对一定体积的 AC 进行

完整且高效的覆盖，即覆盖问题的目标是利用最少量的 HALE-UAV 为 AC 提供完全覆盖。

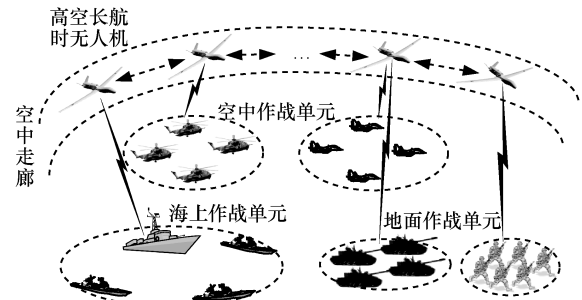


图 1 空中骨干网网络架构示意

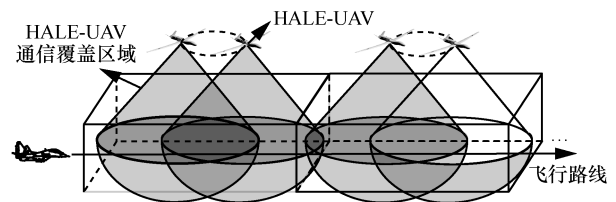


图 2 HALE-UAV 对 AC 的覆盖示意

作为空中骨干网的节点，HALE-UAV 现有的典型运动轨道主要有圆形、三角形等轨道。在各种轨道上，每个 HALE-UAV 以相同的速率匀速飞行。为了提高功率利用率，HALE-UAV 采用定向天线发射信号，其通信覆盖范围近似为一个球顶椎体（半径记为 r_s ，顶角记为 θ ），如图 2 所示。每个轨道上节点的数量为 n ($n \geq 1$)，且在轨道上均匀分布。为了对下方的 AC 进行有效覆盖，节点的运动轨道需要部署在 AC 上方，轨道数为 m ，因此需要的节点总数为 mn 。

3 圆形、三角形轨道几何分析

3.1 圆形轨道

假设圆形轨道的半径为 r_0 ，当节点在各自轨道上运动时，其覆盖的球顶椎体也在随之运动。图 3 为一个圆形轨道上 3 个节点覆盖效果的 3D 视图、俯视图和侧视图。不管各个节点运动到哪个位置，AC 中的某部分区域始终能够被覆盖到，这部分区域本文称之为不变覆盖区域（ICA, invariant coverage area）。本文的覆盖策略就是利用 ICA 作为基础构件来填充 AC。由于各球顶椎体形成的 ICA 仍然是一个球顶椎体，很难直接利用其作为构造单元。为了在覆盖模型中使用规则形状的构造单元，本文从 ICA 中提取出一个圆柱体，并利用该圆柱体来填充 AC。图 4 为单个圆形轨道上布设两个节点的情况，其 ICA 为加粗线所形成的球顶椎体。该球

顶椎体由一个圆锥体和一个球缺组成, 可以从圆锥体中截取出底面半径为 r_c 、高为 h_{c_1} 的圆柱体, 从球缺中截取出底面半径为 r_c 、高为 h_{c_2} 的圆柱体, 两者组合成一个新的圆柱体作为基本覆盖单元去填充 AC。易知, 圆柱体的底面半径为 r_c 和高为 $h_{c_1} + h_{c_2}$ 取决于参数 r_0 、 n 、 r_s 和 θ 。而且, 为了形成圆柱体, 同一轨道上各节点必须有重叠覆盖区域, 即 $r_0 < r_s \sin \frac{\theta}{2}$ 。

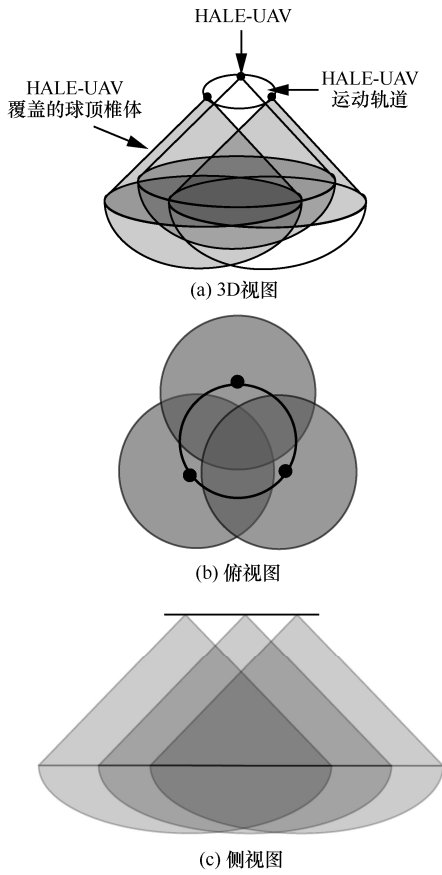


图 3 圆形轨道上 3 个 HALE-UAV 的覆盖效果

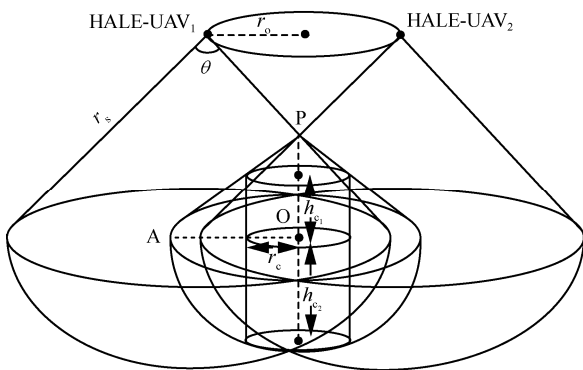


图 4 圆形轨道上两个 HALE-UAV 提取出的圆柱体

下面分析覆盖区域的几何关系。图 5 所示为圆形轨道上 3 个连续节点的俯视图。当一个轨道上有 n 个节点时, $\angle AOC_2 = \frac{\pi}{n}$ 。根据几何关系, r_c 可表示为

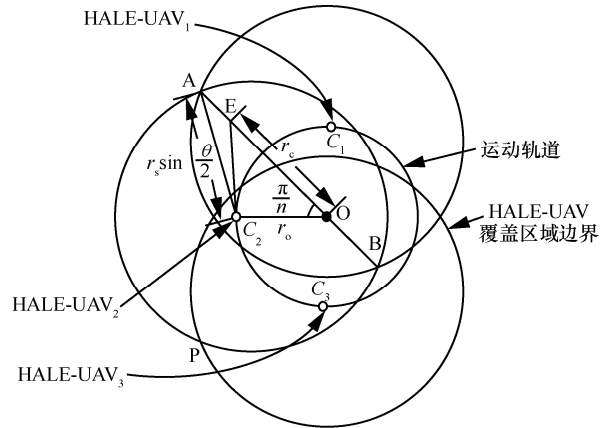


图 5 圆形轨道上 3 个连续 HALE-UAV 的俯视图

$$r_c = r_0 \cos \frac{\pi}{n} + \sqrt{r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - h_{c_2}^2 - 2r_s h_{c_2} \cos \frac{\theta}{2} - r_0^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \quad (1)$$

h_{c_2} 的限制条件为

$$h_{c_2} < \sqrt{r_s^2 - r_0^2} - r_s \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

下面求 h_{c_1} 。如图 5 所示, 根据几何关系, 有

$$r_{cmax} = |AO| = r_0 \cos \frac{\pi}{n} + \sqrt{r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - r_0^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \quad (3)$$

如图 4 所示, 易知

$$\frac{r_c}{|AO|} = \frac{|OP| - h_{c_1}}{|OP|} \quad (4)$$

且 $|OP| = r_s \cos \frac{\theta}{2} - r_0 \cot \frac{\theta}{2}$ 。因此, 由式 (4) 可得

$$h_{c_1} = r_s \cos \frac{\theta}{2} - r_0 \cot \frac{\theta}{2} - \frac{\left(r_c r_s \cos \frac{\theta}{2} - r_c r_0 \cot \frac{\theta}{2} \right) \left(r_0 \cos \frac{\pi}{n} - \sqrt{r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - r_0^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \right)}{r_0^2 - r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (5)$$

因此, 结合式(1)、式(2)和式(5), 可得圆柱体底面半径与高的约束关系。当 $n=1$, $r_0=0$ 时, 此

问题衍化为采用准静态浮空平台对 AC 进行覆盖，此时圆柱体的基本参数为

$$\begin{cases} r_c = \sqrt{r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - h_{c_2}^2 - 2r_s h_{c_2} \cos \frac{\theta}{2}} \\ h_{c_1} = r_s \cos \frac{\theta}{2} - r_c \cot \frac{\theta}{2} \\ h_{c_2} < r_s \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \end{cases} \quad (6)$$

3.2 三角形轨道

在三角形轨道中，由于转弯拐角弧度相对于轨道边长较小，可忽略不计，因此可近似为等边三角形，记其边长为 a 。与圆形轨道不同，三角形轨道的覆盖需要根据单个轨道上节点的数量分情况讨论。

1) $n = 1$

当三角形轨道上只有一个节点时，要形成稳定的覆盖区域，需满足 $r_s \sin \frac{\theta}{2} > \frac{\sqrt{3}}{2} a$ 。如图 6 所示，底面上的最大稳定覆盖区域为加粗线所形成的区域，易知其内接最大圆的半径为 $r_{c_{\max}} = r_s \sin \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a$ 。同理，采用截取上、下两个圆柱体的思路，推导可得合成圆柱体底面半径与高的约束关系为

$$\begin{cases} r_c = \sqrt{r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - h_{c_2}^2 - 2r_s h_{c_2} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a} \\ h_{c_1} = r_s \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a \cot \frac{\theta}{2} - \frac{r_c \left(r_s \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a \cot \frac{\theta}{2} \right)}{r_s \sin \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a} \\ h_{c_2} < \sqrt{r_s^2 - \frac{1}{3} a^2} - r_s \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (7)$$

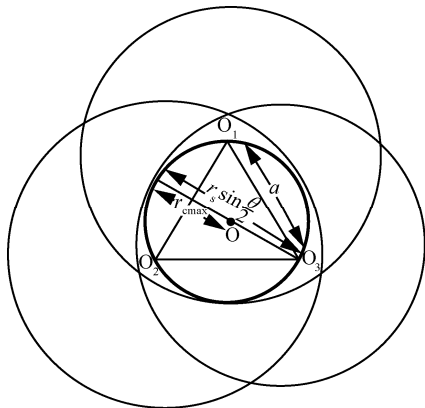


图 6 三角形轨道 $n = 1$ 时的俯视图

2) $n = 2$

当三角形轨道上有两个节点时，要形成稳定的覆盖区域，需满足 $r_s \sin \frac{\theta}{2} > \frac{\sqrt{3}}{4} a$ 。如图 7 所示，当两个节点分别位于 A_1 和 A_2 、 B_1 和 B_2 、 C_1 和 C_2 时，两者之间的距离最短，即 $\overline{O_1 A_1} = \overline{O_1 A_2} = \overline{O_2 C_1} = \overline{O_2 C_2} = \overline{O_3 B_1} = \overline{O_3 B_2} = \frac{3}{4} a$ 。

此时在圆锥体底面上的投影分别为图 7 中实线、点画线、虚线的圆，而且此时两球顶椎体形成的稳定覆盖区域最小，其在底面上的投影为粗线所形成的区域。易知其内接最大圆的半径为 $r_{c_{\max}} = r_s \sin \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a$ ，且 $\overline{OC_2} = \frac{\sqrt{21}}{12} a$ 、 $\overline{EC_2} = \frac{\sqrt{7}}{4} a$ 。同理，根据上文推导思路，可得所截取圆柱体底面半径与高的约束关系为

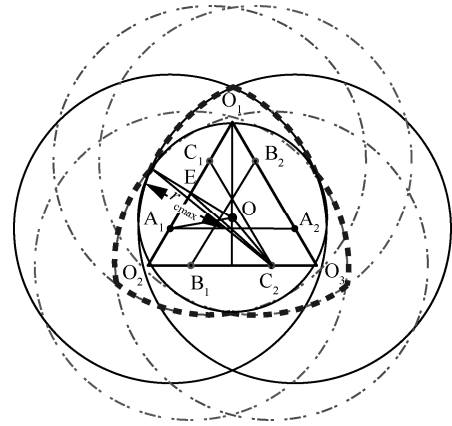


图 7 三角形轨道 $n = 2$ 时的俯视图

$$\begin{cases} r_c = \frac{1}{8} \sqrt{64r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - 64h_{c_2}^2 - 128r_s h_{c_2} \cos \frac{\theta}{2} - a^2} - \frac{5\sqrt{3}}{24} a \\ h_{c_1} = r_s \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a \cot \frac{\theta}{2} - \frac{r_c \left(r_s \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a \cot \frac{\theta}{2} \right)}{r_s \sin \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3} a} \\ h_{c_2} < \sqrt{r_s^2 - \frac{1}{3} a^2} - r_s \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (8)$$

3) $n \geq 3$

当 $n \geq 3$ 时，要形成稳定的覆盖区域，需满足 $r_s \sin \frac{\theta}{2} > \frac{\sqrt{3}}{3} a$ 。图 8 所示为 $n \geq 3$ 时三角形轨道的俯视图，当节点间相距最大时，各球顶椎体相交部

分最少，截取出的圆柱体的高最小，因此应以此最小值作为限制条件，即

$$h_{c_2\max} = \sqrt{r_s^2 - \overline{OO_2}^2} - r_s \cos \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

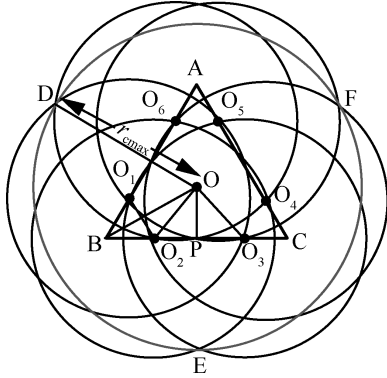


图 8 三角形轨道 $n \geq 3$ 时的俯视图

如图 8 所示，当相邻节点间的距离最小时，球顶椎体底面形成的稳定覆盖区域最小，此时 $\overline{O_1B} = \overline{O_2B}$ 。因此，底面最大的稳定覆盖区域为图 8 中以 O 为圆心，以 $r_{c\max}$ 为半径的圆，易知

$$r_{c\max} = \frac{\sqrt{3}}{6}a + \frac{1}{2}\sqrt{4r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - \frac{9a^2}{n^2}}$$

由于 n 个 UAV 将 $\triangle ABC$ 的周长均分，则 $\overline{O_1B} + \overline{O_2B} = \frac{3a}{n}$ 。由几何关系可得，

$$\overline{O_1B} = \overline{O_2B} = \overline{O_1O_2} = \frac{3a}{2n}, \quad \overline{O_1P} = \overline{O_2P} = \frac{3a}{4n},$$

$$\overline{OO_2} = \frac{a\sqrt{3n^2 + 81}}{6n}$$

根据上文推导思路，可得所截取圆柱体底面半径与高的约束关系为

$$\begin{cases} r_c = \frac{\sqrt{3}}{6}a + \sqrt{\frac{a^2}{48} - \frac{81a^2}{48n^2} + r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - h_{c_2}^2 - 2r_s h_{c_2} \cos \frac{\theta}{2}} \\ h_{c_1} = r_s \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3}a \cot \frac{\theta}{2} - \frac{r_c \left(r_s \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3}a \cot \frac{\theta}{2} \right)}{\frac{\sqrt{3}}{6}a + \frac{1}{2}\sqrt{4r_s^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - \frac{9a^2}{n^2}}} \\ h_{c_2} < \sqrt{r_s^2 - \frac{1}{12}a^2 - \frac{9a^2}{4n^2}} - r_s \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (10)$$

4 覆盖问题解决方案

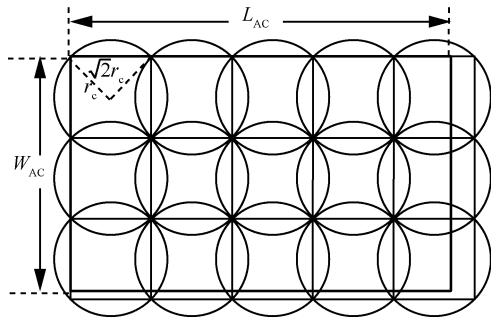
对于长、宽、高分别为 L_{AC} 、 W_{AC} 、 H_{AC} 的 AC，现采用截取的圆柱体对其进行覆盖，圆柱体的底面

半径 r_c 和高 $h_{c_1} + h_{c_2}$ ，以及轨道数量 m 和每个轨道上节点的数量 n 均为变值。该覆盖问题的总体目标是在满足约束条件 $h_{c_1} + h_{c_2} \geq H_{AC}$ 的情况下，获得 mn 的最小值。在约束条件满足时，此 3D 覆盖问题可简化为平面覆盖问题，即利用半径为 r_c 的圆对 $L_{AC} \times W_{AC}$ 的矩形区域进行覆盖。具体有两种策略。

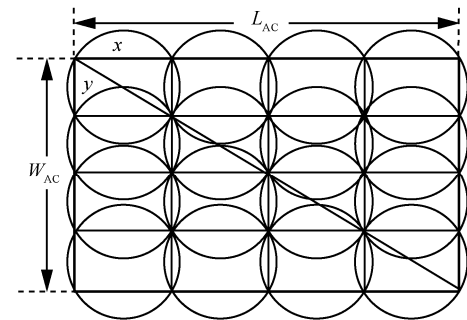
策略 1 利用圆柱体底面圆内接的最大正方形作为基础构件去填充长 L_{AC} 、宽 W_{AC} 的矩形，如图 9(a) 所示。由于正方形的边长为 $\sqrt{2}r_c$ ，则

$$m = \left\lceil \frac{L_{AC}}{\sqrt{2}r_c} \right\rceil \times \left\lceil \frac{W_{AC}}{\sqrt{2}r_c} \right\rceil$$

$$\begin{cases} \min & mn = \left\lceil \frac{L_{AC}}{\sqrt{2}r_c} \right\rceil \times \left\lceil \frac{W_{AC}}{\sqrt{2}r_c} \right\rceil \times n \\ \text{s.t.} & h_{c_1} + h_{c_2} \geq H_{AC} \end{cases} \quad (11)$$



(a) 策略1



(b) 策略2

图 9 对 AC 的两种覆盖策略示意

策略 2 利用圆柱体底面圆内接且与矩形 $L_{AC} \times W_{AC}$ 具有相同长宽比的最大矩形，作为基础构件去填充长 L_{AC} 、宽 W_{AC} 的矩形，如图 9(b) 所示。

令 x 、 y 分别表示该矩形的长和宽，则

$$\frac{x}{y} = \frac{L_{AC}}{W_{AC}} \quad (12)$$

$$x^2 + y^2 = (2r_c)^2 \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可得

$$x = \frac{2r_c L_{AC}}{\sqrt{L_{AC}^2 + W_{AC}^2}} \quad (14)$$

$$y = \frac{2r_c W_{AC}}{\sqrt{L_{AC}^2 + W_{AC}^2}} \quad (15)$$

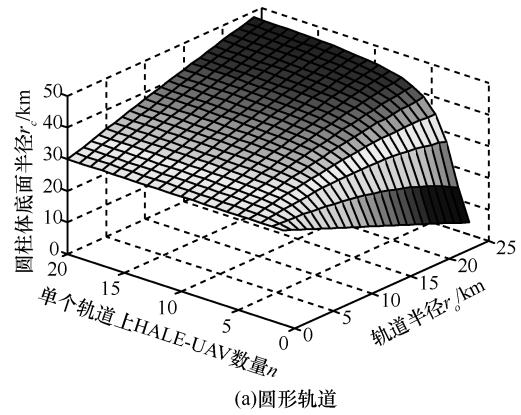
由于覆盖整个区域所需的轨道数 $m = \left\lceil \frac{L_{AC}}{x} \right\rceil \times$

$\left\lceil \frac{W_{AC}}{y} \right\rceil$ ，则策略 2 的优化问题为

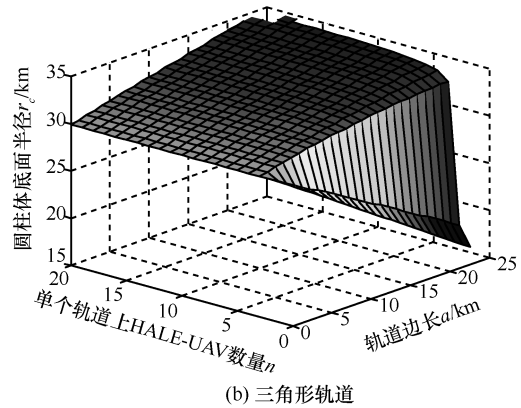
$$\begin{cases} \min & mn = \left\lceil \frac{\sqrt{L_{AC}^2 + W_{AC}^2}}{2r_c} \right\rceil^2 \times n \\ \text{约束条件:} & h_{c_1} + h_{c_2} \geq H_{AC} \end{cases} \quad (16)$$

针对 L_{AC} 、 W_{AC} 、 H_{AC} 分别为 100 km、70 km、10 km 的 AC，当 HALE-UAV 通信覆盖的球顶椎体中 $r_s=50$ km、 $\theta=\frac{\pi}{2}$ 时，在圆形和三角形轨道中，圆柱体底面半径 r_c 与每个轨道上 HALE-UAV 的数量为 n 、轨道半径为 r_0 （或轨道边长 a ）的关系如图 10 所示。由图 10 可知，无论是圆形轨道还是三角形轨道，当 $n=1$ 时， r_c 随 r_0 或 a 的增大而减小，当 $n \geq 3$ 时， r_c 随着 r_0 或 a 的增大而增大； r_c 随 n 的增大而增大，当 n 值较小时， r_c 增幅明显，当 n 值较大时， r_c 增幅较小。

圆形轨道、三角形轨道中策略 1 和策略 2 所需 HALE-UAV 的数量分别如图 11~图 13 所示。由图 11~图 13 可知，对于圆形轨道，策略 1 总体需要的 HALE-UAV 数量较少；对于三角形轨道，策略 2 总体需要的 HALE-UAV 数量较少。圆形和三角形两种轨道相比而言，圆形轨道总体需要的 HALE-UAV 数量较少。在给定的 AC 场景大小和 HALE-UAV 通信覆盖能力的条件下，圆形轨道采用策略 1，当 $n=1$ ， $r_0 \leq 5$ km 时，可取得目标函数的最小值为 6；三角形轨道采用策略 1，当 $n=1$ 、 $a \leq 8$ km 时，也可取得目标函数的最小值为 6。由此可见，在设计构建空中骨干网时，最优覆盖策略是采用准静态浮空平台，次优覆盖策略是采用半径较小的圆形轨道，或边长较小的三角形轨道，同时单个轨道上布设一个 HALE-UAV 即可。

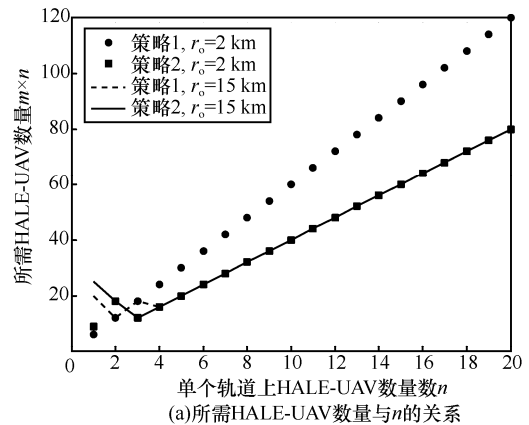


(a)圆形轨道

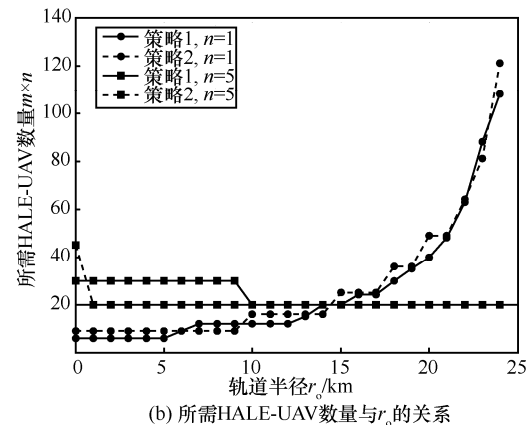


(b)三角形轨道

图 10 所截取圆柱体的底面半径 r_c 与其他变量的关系



(a)所需 HALE-UAV 数量与 n 的关系



(b)所需 HALE-UAV 数量与 r_0 的关系

图 11 圆形轨道中策略 1、策略 2 所需 HALE-UAV 数量的比较

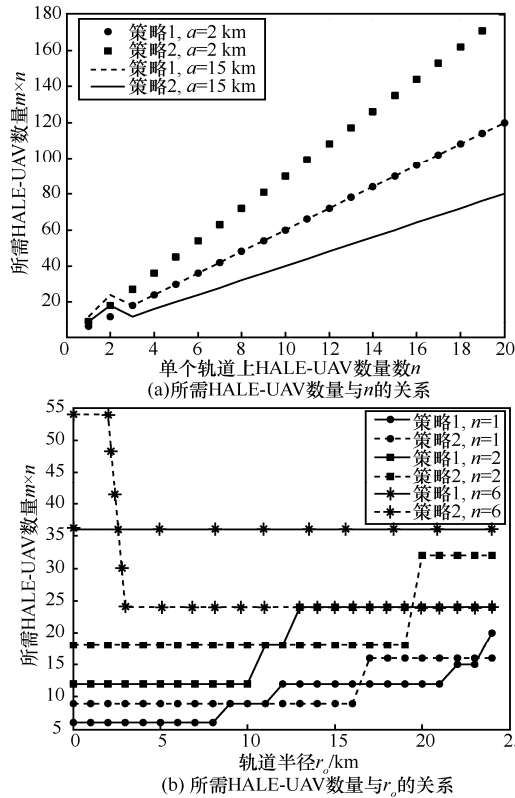


图 12 三角形轨道中策略 1、策略 2 所需 HALE-UAV 数量的比较

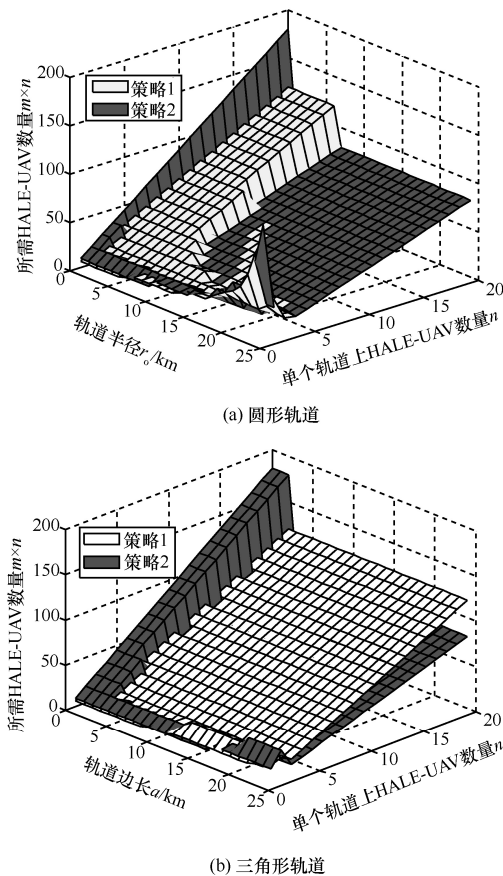


图 13 策略 1、策略 2 所需 HALE-UAV 的数量与其他变量的关系

5 结束语

本文对空中骨干网覆盖策略进行了研究。针对具有长方体形状的 AC, 本文的覆盖方案是将沿轨道规律运动的 HALE-UAV 的不变覆盖区域作为基础构件来填充 AC, 目标是利用最少量的 HALE-UAV 为 AC 提供完全覆盖。针对圆形、三角形两种运动轨道和策略 1、策略 2 两种覆盖策略, 采用几何理论、最优化理论得出了最优覆盖方案。研究表明, 圆形轨道总体优于三角形轨道; 最优覆盖方案是采用准静态浮空平台, 次优覆盖方案是采用半径较小的圆形轨道, 或边长较小的三角形轨道, 同时单个轨道上布设一个 HALE-UAV。

参考文献:

- [1] CHENG B N, CHARLAND R, CHRISTENSEN P, et al. Evaluation of a multihop airborne IP backbone with heterogeneous radio technologies[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(2): 299-310.
- [2] WANG J, SHAKE T, DEUTSCH P, et al. Topology management algorithms for large-scale aerial high capacity directional networks[C]// IEEE Military Communications Conference. 2016: 343-348.
- [3] SCHUG T, DEE C, HARSHMAN N, et al. Air force aerial layer networking transformation initiatives[C]//IEEE Military Communications Conference. 2012: 1974-1978.
- [4] BURNS K, SMITH K. Battlefield airborne communications node (BACN) realizing the vision of the aerial layered network (ALN)[C]//AIAA SciTech. 2016: 1-20.
- [5] CHENG B N, BLOCK F J, HAMILTON B R, et al. Design considerations for next-generation airborne tactical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 138-145.
- [6] SANGWAN A, SINGH R P. Survey on coverage problems in wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 80(4): 1475-1500.
- [7] BENATIA M A, SAHNOUN M, BAUDRY D. Multi-objective WSN deployment using genetic algorithms under cost, coverage, and connectivity constraints[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 94(4): 2739-2768.
- [8] PANANJADY A, BAGARIA V K, VAZE R. Optimally approximating the coverage lifetime of wireless sensor networks[J]. IEEE-ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 98-111.
- [9] WATFA M K, COMMURI S. The three-dimensional wireless sensor network coverage problem[C]//IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. 2006: 856-861.
- [10] ALAM S M N, HAAS Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 34(C): 157-169.
- [11] VIEIRA L F M, ALMIRON M G, LOUREIRO A A F. Link probability, node degree and coverage in three-dimensional networks[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 37(P2): 153-159.
- [12] WANG B, LIM H B, MA D. A survey of movement strategies for improving network coverage in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2009, 32(13-14): 1427-1436.

- [13] ROUT M, ROY R. Self-deployment of mobile sensors to achieve target coverage in the presence of obstacles[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(14): 5837-5842.
- [14] LIU B Y, DOUSSE O, NAIN P, et al. Dynamic coverage of mobile sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(2): 301-311.
- [15] 王良民, 李菲, 秦颖. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修复方法[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 1-8.
WANG L M, LI F, QIN Y. Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes[J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 1-8.
- [16] 孙昌浩, 段海滨. 基于进化势博弈的多无人机传感器网络 K-覆盖[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(10): 1016-1023.
SUN C H, DUAN H B. An evolutionary potential game theoretic approach for the K-COVER problem in multi-UAV sensor networks[J]. Sci Sin Tech, 2016, 46(10): 1016-1023.
- [17] SEN A, GHOSH P, SILVA T, et al. Architecture and algorithms for an airborne network[J]. Computer Science, 2010: 1-14.

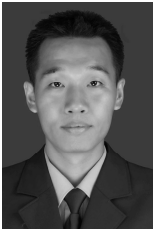


张衡阳 (1978-), 男, 湖南祁东人, 博士, 空军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线自组网、无线传感器网络、航空数据链、机载通信网等。



李勇 (1962-), 男, 陕西西安人, 博士, 西北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线电、软件无线电、实时数字信号处理及其应用、雷达信号处理等。

[作者简介]



郑博 (1982-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 空军工程大学讲师, 西北工业大学电子信息学院博士后, 主要研究方向为无线自组网、机载通信网、空中骨干网等。



程伟 (1980-), 男, 陕西志丹人, 博士, 西北工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线自组网、无线传感器网络、认知无线网络、物联网等。