

一种基于直线往返飞行的无人机 无线覆盖区域扩展方法

岳艳阁¹, 连凯海¹, 陈亚娜²

(1. 河南机电职业学院, 河南 郑州 451191;
2. 郑州电子信息职业技术学院, 河南 郑州 451450)

摘要 本研究提出一种沿带状区域(如公路和铁路)直线往返飞行的方式来扩展无人机的无线覆盖区域的方法, 分为侧偏飞行和航向偏离飞行两种情况, 推导了无人机平均传输速率的闭合表达式。仿真结果证实了理论分析的正确性, 并进一步表明, 无人机的平均传输速率随着侧偏距、航向偏离角、和带状区域长度的增大而降低, 随着发射功率的增加而增大, 但随着飞行高度的增加先增大后减小, 最佳飞行高度可以通过数值仿真的方法获得。

关键词 无人机通信; 无线覆盖; 直线往返飞行

中图分类号: TP24

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.004

0 引言

无人机因体积小、灵活性高等优势在军民领域得到广泛应用, 特别是在灾难时为地面提供通信服务和辅助5G系统。为提高效率, 无人机需覆盖更大面积, 为更多用户服务。现有研究主要关注单机最优部署、三维位置优化、覆盖用户数最大化等问题, 但对公路、铁路等带状区域的覆盖仍需深入研究。受功率和天线波束角限制, 静止无人机覆盖区域固定^[1-3]。本文研究无人机带状区域无线覆盖扩展问题: 建立系统模型, 推导侧偏飞行和航向偏离飞行的平均速率表达式, 通过数值仿真验证理论分析正确性, 为实际部署提供参考。

1 系统模型

设半径 r 远小于区域长度 L , 需沿 OQ 直线匀速往返飞行覆盖所有用户。设覆盖半径远大于区域宽度, y 方向用户无差异。起始点和折返点分别距 O 、 Q 点 r 距离, 确保两端用户获得相同服务(见图1)。

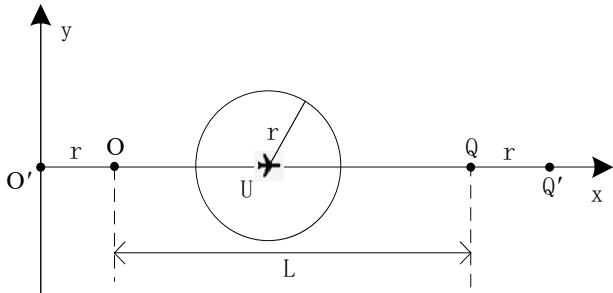


图1 无人机沿带状区域直线飞行

建模假设包括: 采用自由空间路径损耗的视距信道模型; 用户均匀分布且密度足够高; 忽略 y 方向影响简化为一维问题; 飞行高度 H 和速度 v 恒定; 忽略多普勒效应影响^[4]。

2 性能分析

2.1 无人机侧偏飞行

受飞行控制系统、导航系统等因素影响, 无人机飞行中会产生偏差。侧偏是常见偏差类型, 如图2所示, 无人机实际沿 $O'Q''$ 线飞行, 侧偏距为 l , 图1是 $l=0$ 的特例。

设飞行高度 H , 用户 P 坐标 $(0, 0)$, 无人机 t 时刻位于坐标 (vt, l) 。

此时无人机与用户 P 的距离为:

$$d(t) = \sqrt{H^2 + l^2 + (vt)^2}, 0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - l^2} / v \quad (1)$$

基于动态距离关系, 能够进一步分析无人机与用户之间传输速率的特性, 对应传输速率分别为:

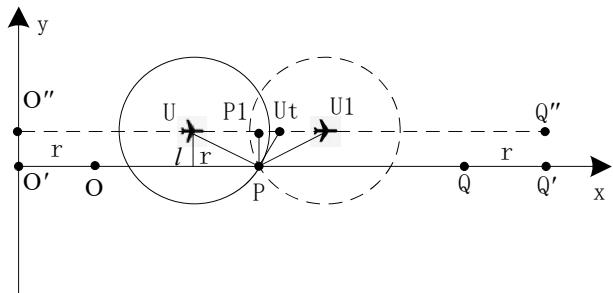


图2 无人机带侧偏飞行

$$R(t) = B \log_2 \left(1 + \frac{P_h(t)}{\sigma^2} \right) = B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + l^2 + (vt)^2} \right),$$

$$0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - l^2} / v \quad (2)$$

通过积分计算单次覆盖过程的总信息量, 结合天线波束角 ϕ 与覆盖半径关系, 最终得到往返周期内平均速率表达式:

$$\bar{R} = 2v\hat{R} / (L + 2H \tan(\phi/2)) \quad (3)$$

该表达式中的因子 2 体现出往返飞行的特征, 分母则反映出总的飞行距离, 侧偏分析做完后, 接下来要考虑另一种重要偏差, 即航向偏离带来的影响。

2.2 无人机航向偏离飞行

航向偏离是无人机的另一种常见偏差。如图 3 所示, 无人机沿 $O'Q''$ 直线飞行而非 OQ 直线, 偏航角为 α 。以 $O'Q''$ 为 x 轴进行分析, P 为 OQ 上用户, P_1 为 P 在 $O'Q''$ 上的投影。

无人机运动到 U 点时 P 进入覆盖范围开始接收数据, 到 U_1 点时离开覆盖范围停止接收。 P_1 为 UU_1 中点, 由于运动过程对称, 仅考虑 P_1 到 U_1 过程。设 P 与 P_1 的距离为 d_0 , 则:

$$d_0 = L_p \sin \alpha \quad (4)$$

该几何关系式反映了航向偏离角 α 对用户一航线距离的直接影响。 P 坐标为 $(0, 0)$, t 时刻无人机与用户 P 的距离为:

$$d(t) = \sqrt{H^2 + d_0^2 + (vt)^2}, 0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - d_0^2} / v \quad (5)$$

该距离公式综合考虑了飞行高度、航向偏离造成的横向位移以及水平运动距离这三个空间分量所做的贡献。在视距传播假设与多普勒效应可忽略的前提条件下, 无人机与用户 P 之间的瞬时传输速率表达式如下, 假设通信链路为视线传播且多普勒效应可消除, 传输速率为:

$$R(t) = B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + d_0^2 + (vt)^2} \right), 0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - d_0^2} / v \quad (6)$$

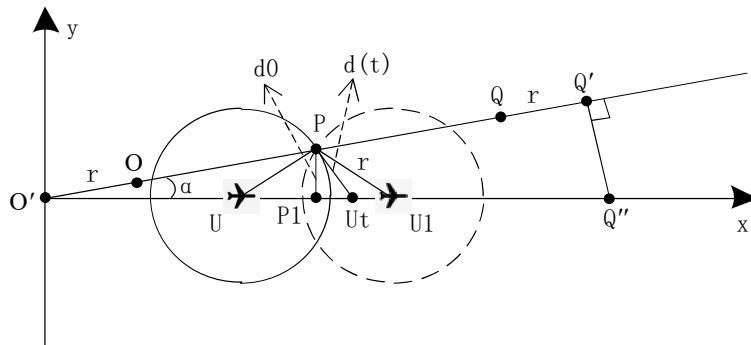


图 3 无人机带偏离角飞行

该速率公式与侧偏情况形式相似, 但 d_0 的位置依赖性使得不同用户存在本质差异。起点用户享受较好通信质量, 远端用户性能下降严重。通过积分计算总信息传输量, 最终得到循环周期内平均速率为:

$$\bar{R}_a = 2v \cos \alpha \hat{R}_a / (L + 2H \tan(\phi/2)) \quad (7)$$

该最终表达式中的 $\cos \alpha$ 因子清晰揭示航向偏离对系统整体性能影响规律。当偏航角为零时, 系统可达到最优性能, 随着偏航角度不断增大系统性能按余弦函数衰减。这一数学关系为实际飞行当中的航向控制精度要求提供量化理论指导。

3 数值仿真

数值仿真采用系统带宽 $B=1$ MHz, 噪声功率谱密度 $N_0=-170$ dBm/Hz, 参考信道增益 $\beta_0=-50$ dB, 无人机飞行速度 30 m/s, 天线波束角 $\phi=90^\circ$ 等参数配置。图 4 展示了无偏差条件下的系统性能, 理论推导与仿真结果高度吻合, 验证了数学模型的准确性。仿真结果表明, 随着带状区域长度增加, 无人机往返周期延长导致单用户服务时间比例下降, 平均传输速率呈递减趋势; 发射功率提升则显著改善通信性能。图 5 进一步分析了航向偏差对系统性能的影响机制, 偏航角增大使用户与无人机间距离增加且有效通信时间缩短, 造成传输速率明显下降。距离起始点较远的用户受偏航角影响更为严重, 性能劣化程度随用户位置呈非线性增长^[5]。

4 结论

本研究提出了一种基于无人机直线往返飞行的方法, 用于扩展带状区域的无线覆盖范围。针对存在飞行偏差的情况, 推导了平均传输速率的理论表达式, 考虑了侧偏距和航向偏离两种因素。通过数值仿真验证了所建立理论模型的正确性。仿真结果表明, 带状区域长度的增加或飞行偏差的增大会导致平均传输速率降低。以上研究结果为实际部署中的无人机辅助无线通信系统设计提供了有价值的参考。

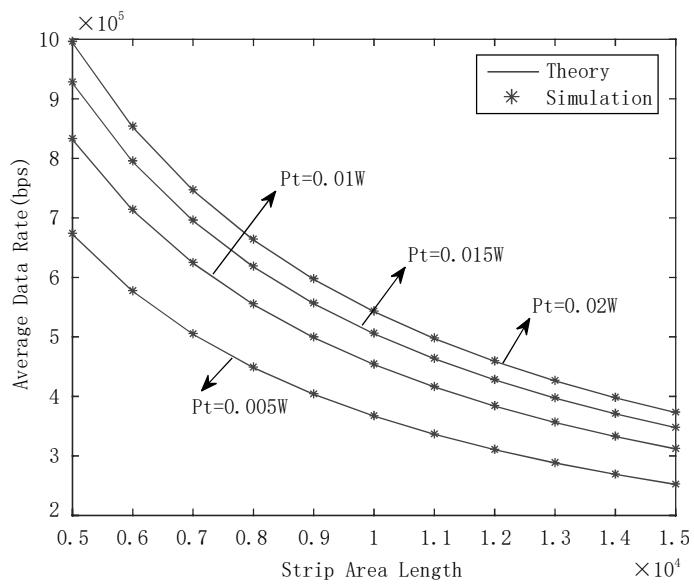


图4 无人机无偏差时的平均速率

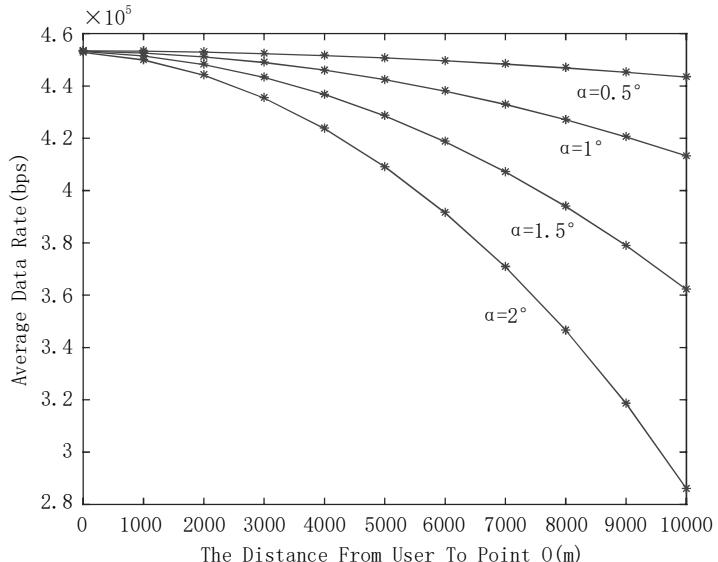


图5 无人机有航向偏差时的平均速率

参考文献:

- [1] Zeng Y , Zhang R , Lim T J . Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(05):36-42.
- [2] Saleem Y , Rehmani M H , Zeadally S . Integration of Cognitive Radio Technology with unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015(50):15-31.
- [3] Shakhatreh H , Sawalmeh A and Al-Fuqaha A , et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges [J]. IEEE Access,

2019(07): 48572-48634.

- [4] Zeng Y , Wu Q , Zhang R . Accessing From The Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12):2327-2375.
- [5] Zeng Y , Lyu J , Zhang R . Cellular-Connected UAV: Potentials, Challenges and Promising Technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019,26(01):120-127.