



无人机通信网络的容量与覆盖性能

贺子健, 艾元, 闫实, 彭木根

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 无人机搭载通信设备升空作为空中基站, 具有灵活机动、部署迅速等特点, 合理地部署无人机基站可以有效提升网络的覆盖与容量。与传统的移动通信网络相比, 无人机通信网络性能不仅受到无人机基站部署密度的影响, 还与无人机的飞行高度有关。通过搭建无人机通信的系统级仿真平台研究了不同场景下无人机通信网络中各参数对网络容量与覆盖能力的影响。仿真结果表明, 无人机密度增加, 会提升网络容量及覆盖; 相同无人机密度下, 网络容量随着无人机飞行高度增加先增后减。

关键词: 无人机网络; 覆盖; 网络容量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017285

Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks

HE Zijian, AI Yuan, YAN Shi, PENG Mugen

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Unmanned aerial vehicle(UAV) equipped with communication equipment, as air base stations, can enhance the coverage and capacity of the communication network effectively, due to the characteristics of flexible and rapid deployment. Compared with the traditional mobile communication network, not only the deployment density, but also the flight height of UAV has an influence on the performance of UAV communication networks. The influence of the parameters of UAV communication networks on capacity and coverage was studied. Through the system level simulation, with the increase of UAV deployment density, the capacity and coverage of the UAV communication network have been significantly improved. With the increase of UAV flying height, the capacity of the network shows a trend of increasing firstly and then decreasing.

Key words: UAV network, coverage, network capacity

1 引言

自然灾害通常很难预测且不可避免, 但人们可以通过有效的手段将损失降到最小。自然灾害发生后, 一方面, 灾区民众的通信需求急剧增长导致原

有通信系统超负荷运行; 另一方面, 由于自然灾害可能导致能源供应短缺、通信基站坍塌, 从而使得通信系统被彻底破坏, 无法提供灾区的通信服务。保持通信畅通是开展救灾工作的前提任务, 但维修或者重建本地通信基础设施耗时且不易操作。因



此,临时组建应急通信系统是最好的选择^[1]。通常,应急通信系统必须满足部署迅速、操作方便、成本较低、容量大和覆盖广等要求。

无人机技术在20世纪末期经历了3次发展浪潮,真正进入了第一个“黄金时代”:1990年后,全球共有30多个国家装备了师级(大型)战术无人机系统,代表机型有美国“猎人”“先驱者”,以色列“侦察兵”“先锋”等;1993年后,中空长航时军用无人机得到迅速发展,以美国“蒂尔”无人机发展计划为代表,在波黑战争中大放异彩;20世纪末,旅团级(中小型)固定翼和旋翼战术无人机系统出现,其体积小、价格更低、机动性好,标志着无人机进入大规模应用时代。

随着无人机相关关键技术的突破,无人机的载荷能力、飞行高度及续航时间都有了很大的提升,利用无人机搭载通信设备升空为地面用户提供服务得以实现。相对于传统地面通信网络,微小型无人机通信网络的主要优势如下^[2]。

- 部署方便,机动灵活。通过搭载通信设备的无人机升空飞行便可迅速建立起通信链路,省去有线通信布线环节;能够随时控制无人机的升降,使覆盖范围和网络容量随着任务地域和需求的变化而变化;微小型无人机的体积小、重量轻、易于携带,单兵即可完成中继无人机的发射和回收工作。人们可以灵活地部署或回收无人机基站,解决业务需求的潮汐效应,降低网络成本以及网络能耗。
- 不受复杂地形的限制。传统无线通信方式由于基站高度的原因,容易受高山、高楼等障碍物影响,通信质量严重下降。微小型无人机升空后,利用了无人机平台的空中优势,可以避开障碍物,建立起可靠的通信链路。
- 通信设备适用性强、信息传输质量高。微小型无人机平台可以轻松实现通信设备的更新换代,提高通信的通信质量。

因此,利用无人机承载通信设备升空提供通信服务成为了近年来通信的研究热点。无人机可以作为一个空中接入点,也可以作为一个中继增加网络的覆盖能力以及增强链路性能^[3]。全球联网计划希望通过部署无人机作为微基站提供无处不在的宽带连接^[4]。与异构网络中布置微基站类似,将无人机作为一个空中基站可以有效地提高网络的覆盖能力以及容量^[5]。为了推动这一计划的实现,谷歌、Facebook 等公司相继提出了利用无人机增加网络覆盖与网络容量的方案,而这也同时进一步推动了无人机的发展。另外,无人机还可以用于应急通信,在突发的公共安全情况下,地面基站无法正常工作,利用无人机快速部署基站提供宽带数据业务^[6]。与传统的基站建设不同,由于无人机的灵活性,人们可以非常容易地通过改变无人机的飞行高度,改变无人机基站的天线高度。而天线高度是影响网络覆盖能力的一个重要参数,但目前的研究中较少有人针对无人机的飞行高度对网络性能影响进行研究。

本文针对无人机基站的部署密度以及无人机的飞行高度对网络覆盖与网络容量的影响进行研究,主要贡献包括:通过搭建无人机通信的系统级仿真平台,从系统级的角度考虑对网络覆盖以及容量进行了分析;综合评估了无人机的部署密度与无人机飞行高度对于网络覆盖以及网络容量的影响;给出了在自然灾害发生、基站无法工作的情况下,为了保证用户的正常通信,无人机部署的优化方案。

2 系统模型

将无人机作为基站为地面用户服务,如同在异构网络中布置微基站:可以提升链路的质量和频谱效率,有效解决地面基站覆盖空洞的问题;可以减轻地面基站的负载、提高特定区域的覆盖质量、改善边缘用户性能;还可以有效降低网络开销、减少能量消耗。

另外, 天线高度是影响无线通信覆盖范围的主要因素之一, 将天线升高可以减小地形对电波传播的影响, 甚至可以将非视距通信改变为视距通信, 显著改善通信链路质量^[7]。利用无人机搭载通信载荷升空可以改善受地形、地物和地球曲率影响导致的通信问题。但是, 无人机飞行高度过高, 使得边缘用户的信号强度过低, 甚至会导致无人机的信号覆盖范围与相邻基站的覆盖范围进行重叠, 严重影响小区边缘用户的性能。因此, 选择合适的无人机飞行高度非常重要。

2.1 覆盖扩展场景

在地面基站覆盖能力不足的情况下, 通过增加无人机基站来提升网络的覆盖能力以及用户速率, 无人机覆盖扩展场景如图1所示。利用 OPNET 软件开发出无人机网络的系统级仿真平台, 其中地面基站、无人机基站以及用户的位置使用独立的二维泊松点过程确定。基于泊松点过程确定的基站位置不能非常好地模拟真实的基站分布, 因为会存在两个泊松点的距离非常接近的情况。

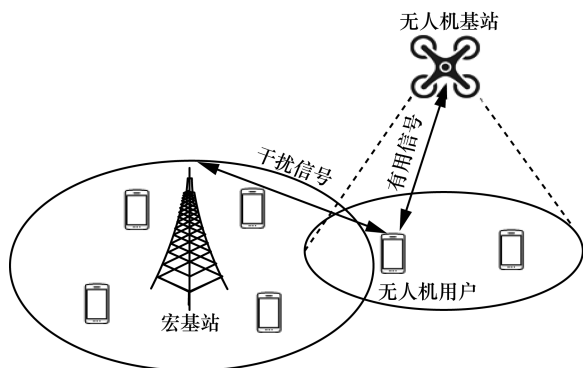


图1 无人机覆盖扩展场景

但是, 由于泊松点过程实现简单等特点已经广泛用于蜂窝网络的性能评估中, 且利用泊松点过程建模得出的网络性能与真实的基站部署性能非常接近^[8], 本文假设所有的地面基站与无人机基站分别使用相同的功率进行工作, 基站天线为全向天线, 天线方向由参考文献^[9]确定。用户选择 SINR 最高的基站接入作为其服务小区。

本文仅考虑信道的大尺度路径损耗, 不考虑

阴影衰落以及小尺度衰落。假设信道模型为空间信道模型, 路径损耗可表示为:

$$L_{fs} = 20 \lg 10 \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10\gamma \lg d \quad (1)$$

其中, λ 为传输信号的波长, γ 为路径损耗因子, d 为基站与用户的距离, 单位为 m。用户的接收信号强度为路径损耗加上发射功率与天线增益。由于基站之间频率完全复用, 用户受到的干扰为其余所有基站的信号强度之和。用户的 SINR 可表示为:

$$SINR = \frac{P_c}{P_i + P_N} \quad (2)$$

其中, P_c 为用户有用信号, P_i 为干扰信号, P_N 为热噪声。

根据信道质量情况变化 (大尺度衰落特性), 灵活地调整到达每个用户数据的调制与编码方式 (MCS), 信道质量由接收机反馈获得^[10]。处于有利位置的用户 (通常是那些距离基站很近的用户), 会被赋予较高的调制与编码方式 (比如 64QAM, 3/4Turbo 码率); 而处于不利位置的用户 (通常是那些处于小区边界的用户), 会被赋予较低的调制与编码方式 (比如 QPSK, 1/2Turbo 码率)。基站给每个用户的发送功率保持不变, 而调制和编码方式根据当前信道条件自适应改变。由于误码率一定的条件下, 高阶调制要求的信噪比比比较高要求的编码速率也高, 一般处于基站附近的用户信道条件较好, 会被赋予更高的调制方式和编码速率 (如 64QAM, 5/6Turbo 码率); 随着用户离基站距离增加信道条件恶化, 会逐渐降低调制方式和编码速率。无人机仿真平台中支持的调制编码方式为 15 种。

2.2 应急通信场景

在发生自然灾害, 地面基站无法正常工作的情况下, 通过布置无人机基站建立应急通信网络, 保证用户正常通信, 应急通信场景如图2所示。自然灾害发生前, 网络中仅存在地面宏基站, 地面宏基站正常为移动用户提供服务。当自然灾害



发生,地面基站受到损坏,无法正常工作。在网络中布置无人机基站为地面用户进行服务,保证网络正常工作,网络中通信模块的相关参数设置与无人机覆盖扩展场景参数设置相同。

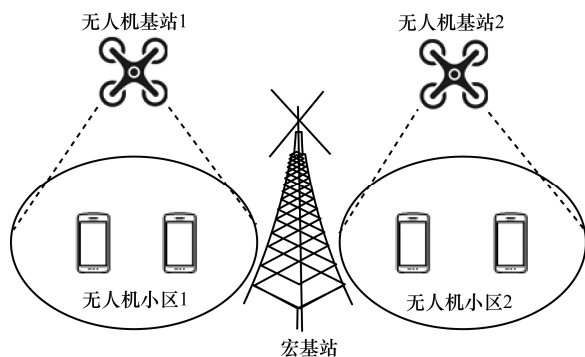


图2 应急通信场景

3 仿真与分析

无人机覆盖扩展场景中,在给定的仿真区域内,通过改变无人机基站的部署密度以及无人机的飞行高度,研究其对网络容量以及网络覆盖的影响。网络中地面基站为 TDD-LTE 基站,无人机的通信制式与地面蜂窝基站相同。无人机通过理想的无线回传接入核心网获取数据为用户服务。对于整个网络的频率划分,无人机与地面 LTE 基站完全复用相同的频率,因此无人机与地面基站之间会存在同频干扰。仿真结果通过用户的平均速率来确定网络的容量。具体的仿真参数配置见表 1。

表 1 仿真参数

仿真参数	参考取值
仿真范围	40 km × 40 km
地面基站和用户数/个	10、4 900
系统带宽/MHz	20
TDD 帧结构配比	2:2
地面基站发射功率/dBm	46
无人机基站发射功率/dBm	35
天线增益/dBi	5
地面基站到用户路径损耗	3.3
无人机到用户路径损耗	2.6
载波频率/GHz	2.1

3.1 覆盖扩展

图 3 给出了不同的无人机基站部署密度以及不同的无人机飞行高度情况下,用户的平均速率的变化趋势。

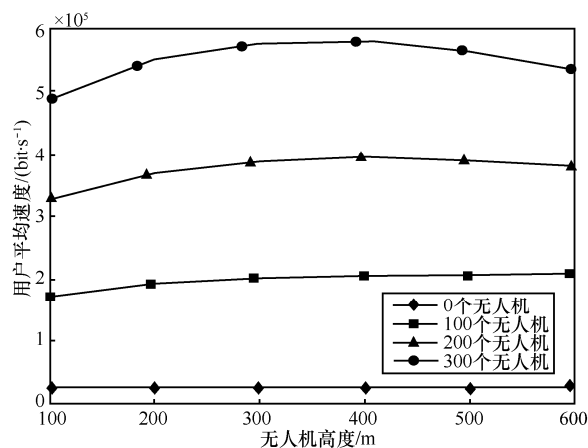


图3 用户平均速率的变化趋势

在不同无人机基站部署密度以及不同无人机飞行高度情况下,网络中覆盖盲区的用户占总用户的百分比曲线如图 4 所示。随着无人机基站的数量增加,每个基站的负载降低,用户可以使用的资源增加;另外,随着无人机基站数量的增加,用户与其服务基站的距离拉近,提升了链路性能。随着无人机飞行高度增加,天线高度增加,无人机基站的覆盖面积增加,使得无人机基站能够服务更多的用户。但是,若无人机飞行高度过高,相邻无人机基站或无人机与地面基站之间的覆盖范围重合,使得干扰强度增加,影响网络容量。

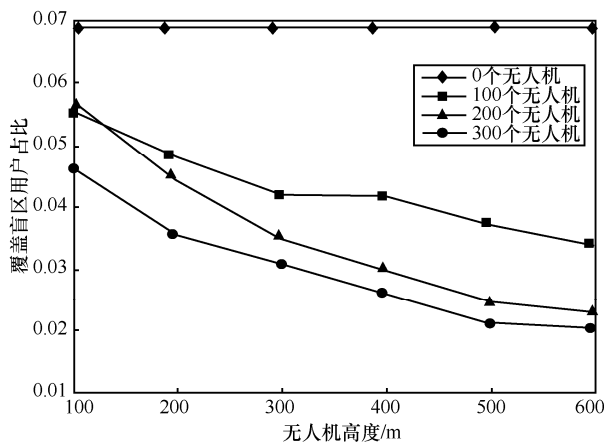


图4 网络的覆盖变化趋势

3.2 应急通信

当自然灾害发生后地面基站无法正常工作，布置若干无人机基站组成应急通信网，为地面用户服务。通过改变无人机基站的数量与高度，给出确定的无人机部署方案保证地面用户的通信不受影响。具体的仿真参数配置见表2。

表2 仿真参数

仿真参数	参考取值
仿真范围	10 km × 10 km
地面基站和用户数/个	20、1 000
系统带宽/MHz	20
TDD 帧结构配比	2:2
地面基站发射功率/dBm	46
无人机基站发射功率/dBm	35
天线增益/dBi	5
地面基站到用户路径损耗	3.3
无人机到用户路径损耗	2.6
载波频率/GHz	2.1

图5中20个基站的情况为自然灾害发生前用户的平均速率，作为对比，另外给出了15、20、25个无人机基站在不同无人机飞行高度的情况下，用户的平均速率。通过第2.1节的仿真结果可知，随着无人机基站的部署密度增加，用户的平均速率明显增加。无人机基站密度相同时，用户平均速率随着无人机飞行高度的增加呈先增后减的趋势。图5中显示的结果与第2.1节的结论相符。另外，通过图5可知，在发生自然灾害之后，布置20个无人机基站，使得无人机处于100~200 m之间可以保证地面的用户的通信不受到影响。

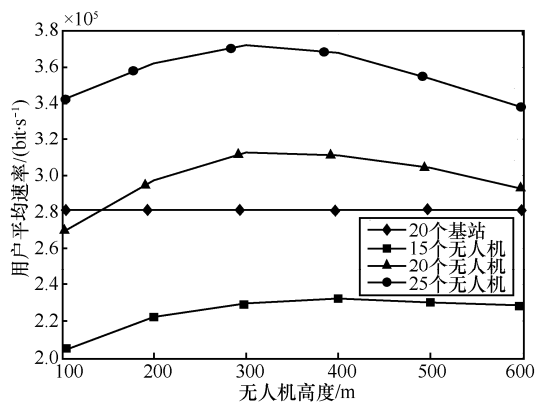


图5 用户平均速率变化曲线

图6和图7分别给出了自然灾害发生、部署20个无人机基站飞行100 m、部署20个无人机基站飞行200 m情况下，网络中用户的SINR与速率的CDF分布。

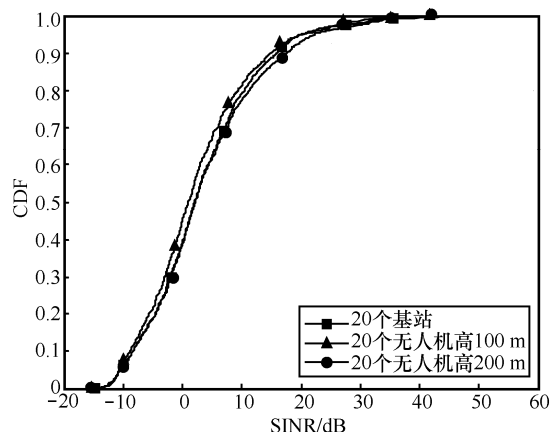


图6 用户SINR的CDF分布

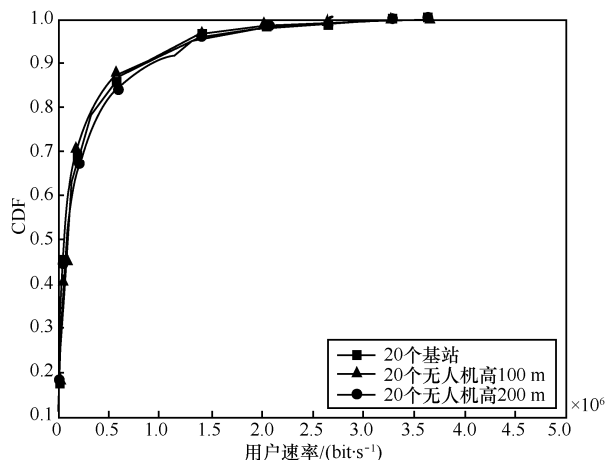


图7 用户速率的CDF分布

4 结束语

本文研究了无人机通信网络中无人机部署密度以及飞行高度对网络容量与覆盖能力的影响。通过系统级仿真得出，在地面基站密度较低的情况下，通过部署无人机可以显著提升网络的容量以及覆盖能力，且随着无人机部署密度的增加网络容量与网络覆盖能力都明显增强。另一方面，在无人机部署密度相同的情况下，随着无人机飞行高度的增加，网络容量呈现先增后减的趋势，



而网络的覆盖能力会获得增强。因此,在自然灾害发生致使地面通信无法正常工作时,可以通过部署无人机基站的方式来保证用户的正常通信。

参考文献:

- [1] 朱又敏, 郑凛, 刘为. 空天一体化应急通信系统的现状与展望[J]. 移动通信, 2016, 40(11): 45-50.
ZHU Y M, ZHENG L, LIU W. Status quo and forecast for integrated aerospace emergency communication system[J]. Mobile Communications, 2016, 40(11): 45-50.
- [2] 袁征, 武毅. 微小型无人机应急通信系统设计[J]. 电子世界, 2015(20): 80-81.
YUAN Z, WU Y. Design of micro UAV emergency communication system[J]. Electronics World, 2015(20): 80-81.
- [3] GUO W, DEVINE C, WANG S. Performance analysis of micro unmanned airborne communication relays for cellular networks[C]//2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), July 23-24, 2014, Manchester, UK. New Jersey: IEEE Press, 2014: 658-663.
- [4] JOHNSON N B. Are drones and robots the future of public safety? StateTech[Z/OL]. [2017-07-25]. <http://www.statetecmagazine.com/article/2014/06/are-drones-and-robots-future-public-safety>.
- [5] SHARMA V, BENNIS M, KUMAR R. UAV-assisted heterogeneous networks for capacity enhancement[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 1207-1210.
- [6] MERWADAY A, TUNCER A, KUMBHAR A, et al. Improved throughput coverage in natural disasters: unmanned aerial base stations for public-safety communications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(4): 53-60.
- [7] 吴挺. 系留多旋翼无人机通信系统在应急救援通信中的应用[J]. 移动通信, 2016, 40(15): 68-71.
WU T. The Application of captive multi-rotor UAV telecommunication system in emergency rescue communication[J]. Mobile Communications, 2016, 40(15): 68-71.
- [8] MERWADAY A, MUKHERJEE S, GÜVEN I. Capacity analysis of LTE-Advanced HetNets with reduced power sub frames and range expansion[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014(1): 1-19.

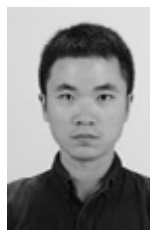
[9] 3GPP. Study on new radio access technology physical layer aspects: TR 38.802 V14.0.0[S]. 2016.

[10] LIU Q, ZHOU S, GIANNAKIS G B. Cross 2 layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links[J]. IEEE Transactions Wireless Communications 2004,3 (5) :174621755.

[作者简介]



贺子健(1992-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



艾元(1993-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为未来无线网络、协同通信理论。



闫实(1988-), 男, 北京邮电大学在站博士后, 主要研究方向为未来无线网络、协同通信理论。



彭木根(1978-), 男, 北京邮电大学教师发展中心主任、教授, 主要研究方向为未来无线网络、雾计算网络、协同通信理论。