

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0136

系留无人机平台搭载的蜂窝通信基站吞吐量优化

罗祎喆¹, 丁文锐^{2,*}, 雷耀麟³, 刘春辉²

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学 无人系统研究院, 北京 100083;

3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘 要: 考虑多架系留无人机(UAV)空中基站为多小区提供空地双向通信服务时, 针对地面用户数目分布不均匀和多机协同服务同频干扰严重的问题, 提出了一种联合优化空中基站高度和链路传输方向的吞吐量优化算法。该方法通过使用最大同频链路准则和就近服务准则确定了同频链路配对和无人机/用户配对, 通过优化空中基站高度和链路传输方向提升了系统平均吞吐量, 并减少了用户间的同频干扰。多种场景下验证结果均显示, 所提方法显著优于其他非联合优化的对比方法, 当拥塞小区用户数目是非拥塞小区用户数目的1~36倍时, 相比于不联合优化链路传输方向和空中基站高度的对比方法, 所提方法可提升系统平均吞吐量8倍左右。

关键词: 空中基站; 系留无人机(UAV); 空地双向通信; 优化方法; 链路传输方向

中图分类号: V279+.2; TB553

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2021)06-1161-12

近年来随着无人机技术的发展, 无人机被广泛地应用在军事和民用领域的各个方面。因其具备部署迅速、成本较小等优势, 将无人机作为空中通信基站提高地面无线通信网络的服务质量和覆盖范围受到了广泛的关注, 并应用于移动通信系统的诸多研究^[1-4]。然而现有4G或者正在部署的5G基站系统复杂度高, 将其部署在无人机平台上将会产生大量的能耗; 另外, 无人机的悬停和机动亦会大量消耗所携带的能源。因此, 考虑将移动通信基站部署在无人机平台上普遍存在因机载能源不足而导致空中基站续航能力差的问题。

在实际工程应用中, 使用系留无人机(Tethered UAV)的一种部署长航时空中基站的方案。系留无人机通过线缆与地面连接, 获取供应电能, 能够实现长时间滞空悬停, 驻留在空中某个固定位置。相比于传统多旋翼无人机系统, 系留无人

机滞空能力更强, 所搭载有效载荷数量更多。系留无人机可采用线缆与对应的核心网接入点(如地面基站或者应急通信车)进行回程链路(Back-haul Link)的信息传输, 相比于依靠无线链路传输的多旋翼无人机其传输速率更高, 抗干扰能力更强^[5]。

2015年以色列航宇工业公司向一家美国政府客户交付首架“悬停灯(HoverLite)”系留无人机, 该无人机采用涵道风扇作为主升力装置, 采用4个外围旋翼作为稳定控制装置, 可在50 m左右高度悬停并长时间工作。由于这一新型无人机系统对于静止、小范围移动、开敞空间跟随状态下的应用具有较大优势, 问世之后开始受到广泛关注。从飞机设计、电力保障、飞控优化、安全管理等各个角度, 系留无人机技术都获得了不断的推动。文献[6]提出了一种四旋翼无人机通过一根

收稿日期: 2020-04-10; 录用日期: 2020-07-03; 网络出版时间: 2020-08-05 16:05

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200805.1132.002.html

基金项目: 国防科技工业发展规划(JCKY2017601C006); 国家重点研发计划(2016YFB0502602)

*通信作者。E-mail: ding@buaa.edu.cn

引用格式: 罗祎喆, 丁文锐, 雷耀麟, 等. 系留无人机平台搭载的蜂窝通信基站吞吐量优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(6): 1161-1172. LUO Y Z, DING W R, LEI Y L, et al. Throughput optimization for cellular communication on tethered unmanned aerial vehicle base station[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(6): 1161-1172 (in Chinese).

系留电缆和传统地面通信基站相连接的方法,该方法中无人机不仅可以通过系留电缆实时供给电能,还可以利用电缆实现无人机和基站间信息无干扰的有线传输。文献[7]研究了当系留空中无人平台作为中继节点辅助地面节点和高空无人平台(High Altitude Platform, HAP)时的相关应用,分析推导了在信道状态未知时的系统吞吐量表达式。作为空中基站,系留无人机可用作蜂窝小区服务器,通过优化其部署位置 and 用户分配,提升地面用户服务质量^[8]。在此基础上,系留无人机可与地面基站配合使用,借助其机动能力,扩展蜂窝小区的覆盖面积,并且辅助地面基站进行信息分流,提升整体处理能力^[9]。

在国内无人机产业当中,系留无人机产业发展基本处于初级阶段,尚未形成规模。但是国内移动通信、公安系统、灾害应急管理部门等已经开始尝试利用系留无人机对一些传统的业务需求进行赋能和提升。2017年中国移动在多地进行了系留式无人机应急高空基站测试,测试中的系留式无人机应急高空基站可在5 min内快速升空至100 m,24 h不间断为测试区域提供VoLTE及数据业务等通信保障^[10]。文献[11-12]提出了系留无人机应用于地震等自然灾害时的应急救援通信方案。在地面基站遭到破坏时,由系留无人机组网与指挥部和应急中心建立通信网络。

尽管国内外对系留无人机进行了学术研究及工程实践方面的初期探索,但是仍有部分问题需要进一步研究:①当前研究多以单无人机为主,缺少对多无人机多小区的进一步分析,特别是当各小区中用户分布不均匀的情况;②通信方式多以单向通信为主,双向通信时的链路传输方向和链路配对需要进一步研究。本文在前述研究工作^[13-14]的基础上进行扩展,在多架系留无人机应用于空地双向通信时,对空中基站高度、链路传输方向、同频链路配对和无人机/用户配对进一步优化,实现了多机系留无人机系统在服务多个用户不均匀分布小区时的系统吞吐量最大化,并有效减少用户间的同频干扰。

1 系留无人机空地双向通信分析

1.1 多机协同空地双向通信

以2架无人机为例,如图1所示, I_{GG} 为地面用户间的干扰, I_{UG} 为无人机和地面用户间的干扰。当不同蜂窝小区含有数量差别较大的地面用户时,如果无人机都被部署于较低的高度,则对应小区用户多的无人机通信负载过重而其他无人机

通信资源被浪费。一种直观的较优的部署方式是将对应小区用户数量少的无人机部署在较高的位置,使其天线的覆盖范围能够覆盖到用户数目多的小区,从而达到多无人机协同服务的目的。但是在升高高度协同服务且多架无人机使用相同的频带进行下行通信服务时,某个链路的接收机将会受到来自其他空地信道的同频干扰,由于空地链路往往是直视链路,这种同频干扰往往严重影响通信质量。在双向通信的场景下,严重的同频干扰可以通过配置链路的传输方向减弱。当2条链路使用不同的传输方向时,同频干扰将会来自空对地信道变为来自地对地和空对空信道,而当无人机装备定向天线且多架无人机都处于其他无人机天线主瓣外时,空对空信道的同频干扰可近似为0,而地对地信道往往是非直视链路。

当不同蜂窝小区含有数量近似相等的地面用户时(见图2),无人机理应部署在较低的位置来服务各自对应的小区以最小化路径损耗。这种情况下当不同链路使用不同传输方向时,地面节点

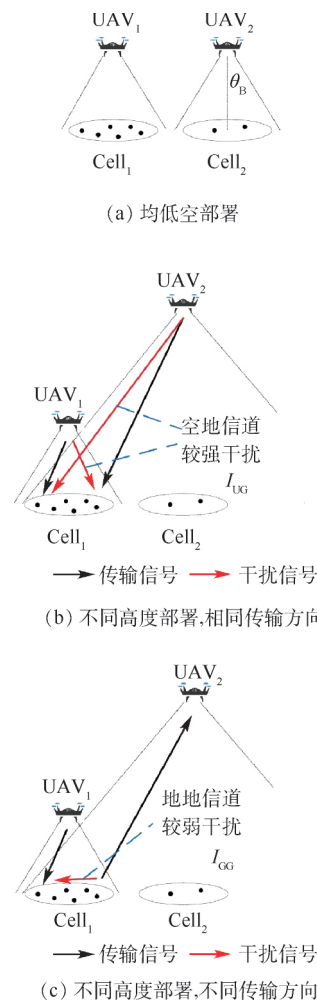


图1 小区地面用户分布不均衡场景的空地通信

Fig. 1 Air-ground communication in the scenario of uneven distribution of ground users in community

依然会受到来自地对地信道的同频干扰,而当不同链路使用相同传输方向时,所受到的干扰近似为0。

因此,在多架系留无人机协同服务多个小区时,无人机高度、链路传输方向可以根据不同小区地面用户拥塞程度进行调整,从而尽可能减小同频干扰进而最大化系统吞吐量。

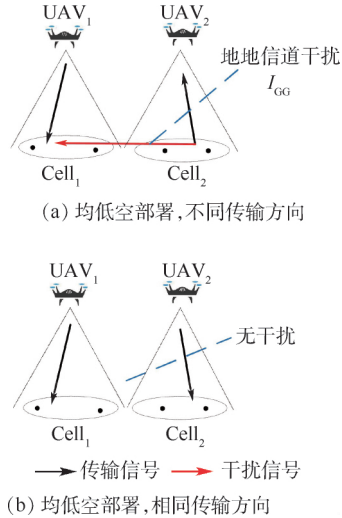


图2 小区地面用户分布均衡场景的空地通信

Fig. 2 Air-ground communication in the scenario of average distribution of ground users in community

1.2 同频服务与单独服务间的均衡

当考虑多架无人机同频服务多个地面节点时,不同的同频服务方式也会影响整个双向通信的系统吞吐量。如图3所示,2条链路在同时同频服务时,整个系统双向通信需要2个时隙;而2条链路单独通信时,如图4所示,整个系统双向通信需要4个时隙。这里存在一种均衡:2条链路同时同频服务需要总时隙少,但是存在同频干扰;2条链路单独服务需要总时隙多,但是每条链路都无干扰。

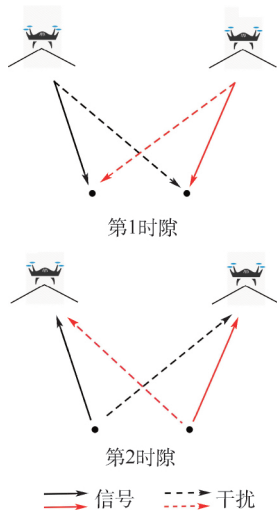


图3 同频链路服务

Fig. 3 Co-channel service

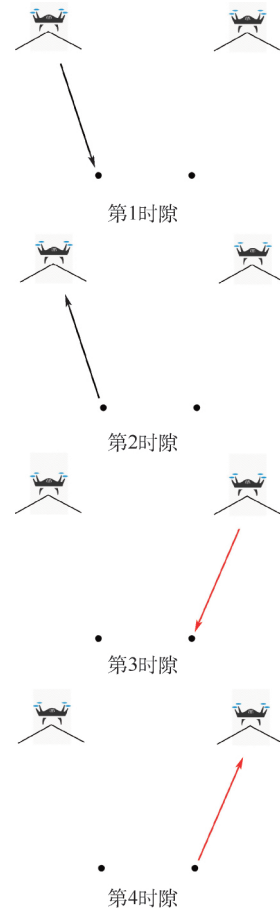


图4 单独链路服务

Fig. 4 Individual channel service

基于以上的研究动机,本文研究在多架系留无人机空地双向通信场景中,通过优化无人机高度、链路传输方向以及确定同频服务方式最大化整个系统的系统吞吐量(即在给定的地面用户业务需求量的情况下,尽可能快地完成服务)。需要说明的是,在传统的蜂窝移动通信系统中,通过使用频谱分配消除小区间干扰受到了广泛的研究并已成为一项成熟的技术,因此直观上在无人机空地通信场景下也可以使用传统的频谱分配消除小区间干扰;但是在多小区同频场景中,研究如何充分地利用频谱资源和优化无人机带来的新自由度,具有更高的价值和意义。

2 相关场景建模

2.1 传输场景和双向通信模式

本文考虑 M 架系留无人机与对应蜂窝小区内 M 个微基站(或地面通信车)连接,向地面的通信用户提供空地双向通信服务。每个小区包含 $N_i, i \in M = \{1, 2, \dots, M\}$ 个均匀分布的地面用户。假设系留无人机高度可调,但在水平面上的位置固定(受系留带约束),且与对应的蜂窝小区基

站水平位置相同。无人机 UAV_i 的三维坐标可以表示为 $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i \ H_i]$ 地面用户 $G_j \ j \in K = \{1 \ 2 \ \dots \}$, $K = \sum_{i=1}^M N_i$ 的三维坐标表示为 $\mathbf{w}_j = [x_j^G \ y_j^G \ \rho]$ 。

所有通信节点采用半双工通信模式,且每架无人机在服务多个地面用户时采用时分复用(TDMA)模式(TDMA可充分利用无人机作为空中基站带来新的自由度,无人机在服务每个用户时可调整自身高度实现通信的最优传输)。假设每个地面节点的业务需求是相等的且每个用户有且仅有一架无人机对其进行双向通信服务,保障了一定程度的公平性。所有的无人机在相同的频段采用时分双工(TDD)模式与每个用户进行双向通信并考虑上下行业务量均衡的双向通信(如应急通信下移动用户的上下行业务量相近):即连续的2个时隙中第1个时隙用于上行(下行)传输,则另外一个时隙用于下行(上行)传输。在本文所提的场景中所有链路是时隙同步的,保证了在给定任意一个时刻可以最多有2条同频链路。整个服务过程可在软件定义网络(Software Defined Network, SDN)架构下完成,系统的全局信息由1个云端控制器(该云端可以为任意一架无人机或者附近的宏基站)统一管理,并在控制器中进行服务策略优化。服务过程中的控制信号获取,同时整个空地通信系统的最优传输策略可由云端优化后通过转发层(空中基站、地面基站)发送给各个传输节点。为了简化系统模型,本文认定在此网络架构中用户可始终接收到转发层的信号。

2.2 信道模型和链路接收功率

本文中涉及到的无线信道有空对空、空对地和地对地信道。空对空信道建模为直视(Line-of-Sight, LoS)链路而地对地信道建模为非直视(Non-Line-of-Sight, NLoS)链路。空地信道建模为概率型直视/非直视链路^[15]。为简化计算,所有类型的信道考虑路径损耗和大尺度衰落。

考虑每架无人机配备定向天线,而定向天线的增益可以表示为

$$g(d) = \begin{cases} \frac{g_0}{\Phi_B^2} & d \leq h_i / \cos \Phi_B \\ g_s & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g_0 \approx 2.284 \ 6$; $\Phi_B \in (0, \pi/2)$ 为天线的半波数宽度; d 为 UAV_i 和接收端的距离; h_i 为无人机 i 的飞行高度; g_s 满足 $0 \leq g_s \leq g_0 / \Phi_B^2$, 本文将其简化为 $g_s = 0$, 每个地面用户考虑装备增益为 g_0 的全向天线^[16]。

假设信道对称,上行链路(G_j -to- UAV_i)和下行链路(UAV_i -to- G_j)的接收端功率分别为

$$P_{gu}(\mathbf{p}_i, \mathbf{w}_j) = \frac{P_g g_0}{(\kappa_0 d_{ji})^n (p_{\text{LoS}} \psi_{\text{LoS}} + p_{\text{NLoS}} \psi_{\text{NLoS}})} \quad (2)$$

$$P_{ug}(\mathbf{p}_i, \mathbf{w}_j) = \frac{P_u g(d_{ij})}{(\kappa_0 d_{ji})^n (p_{\text{LoS}} \psi_{\text{LoS}} + p_{\text{NLoS}} \psi_{\text{NLoS}})} \quad (3)$$

式中: P_g 和 P_u 分别为地面节点和无人机的发射功率; $\kappa_0 = 4\pi f_c / c$, f_c 为载频, c 为光速; $d_{ij} = d_{ji} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{w}_j\|$; n 为路损指数; $g(d_{ij})$ 为定向天线增益; $\psi_{\text{LoS}} \sim N(\mu_{\text{LoS}}, \sigma_{\text{LoS}}^2)$ 和 $\psi_{\text{NLoS}} \sim N(\mu_{\text{NLoS}}, \sigma_{\text{NLoS}}^2)$ 分别为直视链路和非直视链路呈对数正太分布的阴影衰落均值和方差^[15]; 直视链路的概率为 $p_{\text{LoS}} = \alpha(180\theta/\pi - 15)^\gamma$, $\theta = \arcsin(h_i/d_{ij})$ 为 UAV_i 和 G_j 的仰角, α 和 γ 为与环境有关的参数^[15]; 非直视链路的概率为 $p_{\text{NLoS}} = 1 - p_{\text{LoS}}$ 。

空对空(UAV_i - UAV_p)和地对地(G_j - G_q)链路中的接收端功率可以分别表示为

$$P_{uu}(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_p) = \frac{P_u g(d_{ip})}{(\kappa_0 d_{ip})^n \psi_{\text{LoS}}} \quad (4)$$

$$P_{gg}(\mathbf{w}_j, \mathbf{w}_q) = \frac{P_g g_0}{(\kappa_0 d_{jq})^n \psi_{\text{NLoS}}} \quad (5)$$

式中: 下标 $p \in M$ 且 $p \neq i$; 下标 $q \in K$ 且 $q \neq j$; $d_{ip} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_p\|$; $d_{jq} = \|\mathbf{w}_j - \mathbf{w}_q\|$; \mathbf{w}_q 代表节点为 q 的地面用户三维位置坐标; \mathbf{p}_p 代表节点为 p 的无人机三维位置坐标。

2.3 同频干扰、同频链路配对和无人机/用户配对

多条链路在同一个频带进行双向通信时,链路传输方向不同,干扰的来源和方向也不同,即干扰经历的信道不同。在本文研究的空地双向通信场景中,空对空、空对地和地对地信道有着不同的衰落情况。一般而言,地对地非直视链路衰落最严重,空对地次之,而空对空链路衰落程度最小,因此,不同来源和方向的干扰强度不同。

为了在更一般的场景(即任意条链路)下对多链路同频干扰进行数学描述,文献[17]定义了干扰转动(Interference Spin)的概念:对于上下行业务量均衡的双向通信链路 L_{ij} (UAV_i - G_j),若下行通信发生在奇数时隙(即上行通信发生在偶数时隙),则定义链路 L_{ij} 的干扰转动值 $s_{ij} = 0$; 若上行通信发生在奇数时隙(即下行通信发生在偶数时隙),则定义链路 L_{ij} 的干扰转动值 $s_{ij} = 1$ 。基于干扰转动的定义,多条链路的相对干扰转动值可以由所有链路的干扰转动值经过异或得到,比如:

链路 L_{ij} 和链路 L_{pq} ($\text{UAV}_p \rightarrow G_q$) 的相对干扰转动值 $r_{ij\ pq} = s_{ij} - s_{pq}$ 。相对干扰转动值可以描述多条链路的相对传输方向,比如当链路 L_{ij} 和 L_{pq} 使用相同的传输方向时 $r_{ij\ pq} = 0$;反之当他们使用不同的传输方向时 $r_{ij\ pq} = 1$ 。

同频链路配对是指对同时同频工作链路数量和配对方式的描述。同频链路配对方式决定着整个空地双向通信系统总的服务时间:同频链路配对数越多,所有的地面节点就可以越快地被服务完。图3和图4在最简单的场景下说明了2架无人机服务2个地面节点时的同频链路配对方式。同频链路配对的可能性随着无人机和地面节点数量的增加而大幅度增加。比如当无人机数量 $M = 2$ 且地面节点数 $K = 4$ (即 $G_1; G_2; G_3; G_4$) 时,共有10种链路配对方案: $\{(G_1 G_2) (G_3 G_4)\}$, $\{(G_1 G_3) (G_2 G_4)\}$, $\{(G_1 G_2) (G_3 G_4)\}$, $\{(G_1) (G_2) (G_3 G_4)\}$, $\{(G_1) (G_3) (G_2 G_4)\}$, $\{(G_1) (G_4) (G_2 G_3)\}$, $\{(G_1 G_2) (G_3) (G_4)\}$, $\{(G_1 G_3) (G_2) (G_4)\}$, $\{(G_1 G_4) (G_2) (G_3)\}$, $\{(G_1) (G_2) (G_3) (G_4)\}$ 。

其中,第1种链路配对方案为 $\{(G_1 G_2) (G_3 G_4)\}$ 表示整个系统完成双向通信2次:第1次同频服务 G_1 和 G_2 ,第2次同频服务 G_3 和 G_4 ;而第10种链路配对方案为 $\{(G_1) (G_2) (G_3) (G_4)\}$ 表示整个系统完成双向通信4次,每一次只有1个地面节点被服务。

更为一般地,定义 $\lambda \in \Lambda$ 为 M 架无人机服务 K 个地面节点时的某个同频链路配对方案,而 Π 为所有链路配对方案的集合。

定理1 M 架无人机使用相同频带服务 K 个地面用户时,同频链路调度方式总数为

$$|\Lambda| = \sum_{m=\lfloor K/M \rfloor}^K S(K, m) \quad (6)$$

式中: $S(K, m) = \binom{K}{m} = \frac{1}{m!} \sum_{i=0}^m (-1)^i \binom{m}{i} (m-i)^K$

为二阶斯特林数,表示将 K 个元素分组为 m 个子集的方式总数。

证明 $S(K, m) = \binom{K}{m}$ 表示将 K 个地面用户分成 m 个子集的方式数目,即每一个子集代表整个系统的一次双向通信,因此 m 为整个系统服务完所有用户的双向通信次数。证毕

理论上在每一次双向通信中:最小同频链路数为1,即该次只有一条链路在进行双向通信;最大的同频链路数等于无人机的数量 M 。

对于每次只有一条链路进行双向通信时的情

况,服务方案总数为 $S(K, m) = \binom{K}{m}$ 。此时,整个系统服务完所有用户的双向通信次数为 K 次。

当每次服务有多条同频链路时,系统所使用的总的时隙数减小,考虑系统完成服务所使用的时隙数最小的情况:此时,每次双向通信系统都选择尽可能多的用户进行服务,即每个子集中都含有最大的元素数目 M ,而设系统最快完成服务时所使用的双向通信次数为 X ,则 $X = \lceil K/M \rceil$ 。

对于某一种同频链路配对方案, $|\lambda|$ 表示某个同频链路配对方案中的双向通信次数或者 $2|\lambda|$ 为整个双向通信系统的服务总时长,例如 $\{(G_1) (G_2) (G_3 G_4)\}$ 代表整个系统完成双向通信 $|\lambda| = 2$ 次,一共消耗 $2|\lambda| = 4$ 次时隙。

在本文所研究的多架无人机同时同频服务多个地面节点的场景中,因地面节点位置各异,因此无人机/用户配对方式影响每条链路的接收功率和同频干扰。为了对无人机/用户配对进行数学描述,定义无人机/用户配对因子 $A_{vw} \in \{0, 1\}$, $v \in M$, $w \in K$: $A_{vw} = 1$ 表示 G_w 由 UAV_v 提供双向通信服务; $A_{vw} = 0$ 表示 G_w 不由 UAV_v 提供服务。因每个用户有且仅有1架无人机对其进行服务,则有

$$\sum_{v \in M} A_{vw} = 1, \forall w.$$

2.4 信噪比和系统吞吐量

基于以上对链路干扰转动、同频链路配对和无人机/用户配对的数学描述,同频链路配对方案 λ 中的某次同频服务 $\lambda(t)$, $t \in (1, |\lambda|)$ 的链路 L_{ij} , 即 $G_j \in \lambda(t)$ 的上行传输 ($\text{UAV}_i \rightarrow G_j$) 和下行传输 ($G_j \rightarrow \text{UAV}_i$) 的接收信噪比可以表示为

$$\text{SINR}_{ij} = A_{ij} P_{ug}(p_i, w_j) / \left[\sum_{m \in M} \sum_{\substack{n \in \lambda(t) \\ m \neq i, n \neq j}} A_{pq} r_{ij\ pq} P_{gg}(w_j, w_n) + \sum_{m \in M} \sum_{\substack{n \in \lambda(t) \\ m \neq i, n \neq j}} A_{pq} (1 - r_{ij\ pq}) P_{ug}(p_m, w_j) + \sigma^2 \right] \quad (7)$$

$$\text{SINR}_{ji} = A_{ij} P_{gu}(p_i, w_j) / \left[\sum_{m \in M} \sum_{\substack{n \in \lambda(t) \\ m \neq i, n \neq j}} A_{pq} r_{ij\ pq} P_{uu}(p_i, p_m) + \sum_{m \in M} \sum_{\substack{n \in \lambda(t) \\ m \neq i, n \neq j}} A_{pq} (1 - r_{ij\ pq}) P_{gu}(w_n, w_j) + \sigma^2 \right] \quad (8)$$

因此,链路 L_{ij} 双向传输速率可以表示为

$$R_{ij} = \frac{1}{2} W (\log_2(1 + \text{SINR}_{ij}) + \log_2(1 + \text{SINR}_{ji})) \quad (9)$$

式中:因每条链路都使用同样的带宽,为简化表

达,将带宽归一化为 $W = 1$ Hz; 因子 $1/2$ 是因为双向通信使用了 2 个时隙; SINR 为信号与干扰加噪声比; SINR_{ij} 为无人机 i 与地面用户 j 间的信号与干扰加噪声比; σ 为噪声方差。

2.5 系统优化问题模型

本文的优化目标定义为最大化整个空地双向通信的系统吞吐量。吞吐量是指系统单位时间内成功地传送数据的数量。从网络层面讲,吞吐量用每秒传输的字节数表示。本文在此基础上进一步考虑链路同频干扰的影响,强调系统吞吐量为每秒有效传输的数据量,因此将系统吞吐量定义为所有链路的双向传输速率与整个系统进行双向通信服务所消耗总时间的比值。其中双向服务消耗总时间包含通信传输时间、无人机机动和控制信息传输时长,考虑到后者相对于前者时长较少,这里做近似化处理忽略不计。综合以上描述,该系统吞吐量与空中基站高度、链路传输方向、无人机/用户配对和同频链路配对密切相关。

定义所有空中基站高度的集合为 $H = \{H_1, H_2, \dots, H_M\}$; 链路相对干扰转动值的集合为 $R = \{r_{ijpq} \mid i, p \in M; j, q \in K\}$; 无人机/用户配对因子的集合为 $A = \{A_{vw} \mid v \in M, w \in K\}$ 。

因此,最大化系统吞吐量的数学描述可以表示为

$$\max_{A, R, H, \lambda} \frac{\sum_{i=1}^{|\lambda|} \sum_{j \in \lambda(i)} \sum_{i=1}^M R_{ij}}{2|\lambda|} \quad (10a)$$

$$A_{vw} = \{0, 1\} \quad (10b)$$

$$r_{ijpq} = \{0, 1\} \quad \lambda \in \Lambda \quad (10c)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{v \in M} A_{vw} = 1 \quad \forall w \quad (10d)$$

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (10e)$$

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (10f)$$

式中: r_{ijpq} 为链路 L_{ij} 和链路 L_{pq} 的相对干扰转动值。

其中,约束式(10d)和(10e)保证每个地面用户只被服务一次。系留无人机的最大和最小可调高度为 H_{\max} 和 H_{\min} 。

优化问题式(10)的优化变量中 H 中的元素为连续变量 R 和 A 中的元素为二元离散变量 λ 是一个组合中的元素。因此,该问题为混合整数规划和组合优化结合的优化问题。

3 基于最大同频链路和就近服务准则的优化算法

3.1 算法设计理念

优化问题式(10)中同频链路配对方案数量

$|\Lambda|$ 随着无人机数量 M 和地面节点数目 K 的增加而急剧增加。依据定理 1 可以计算出,当 $M=2$ 且 $K=2, 4, 6, 8, 16$ 时,同频链路配对方案数量为 $|\Lambda|=2, 10, 76, 764, 46\,206, 736$, 遍历每一种同频配对方案在本文优化问题的实际应用中不可取; 同时由于信噪比表达式复杂,组合优化中常用的匈牙利方法等算法也无法求解出最优的同频链路配对方案。

根据作者之前工作的结论^[13-14]: 在 2 架系留无人机空地双向通信的场景下,同频链路数越多,系统的吞吐量越大。该结论可以解释为: 同频链路数目的增多可以减小整个系统的通信服务总时长,尽管同频链路之间存在干扰,但是通过优化高度和链路传输方向可以尽可能地减少其同频干扰,从而可以使此情况下的系统吞吐量优于同频链路数较少的系统吞吐量。因此,在更为一般的多无人机场景下,提出一种基于最大同频服务准则的传输策略,即在每时隙的双向通信服务时, M 架无人机选择尽可能多的地面节点进行同频服务。

对于无人机/用户配对而言,直观上无人机应选择离其最近的地面节点进行服务,同时在实际应用中就近服务准则也广泛应用在传统的移动通信中并被证明是一种较优的服务方式。

因此,本文提出一种面向实际应用的优化问题求解算法,该算法通过使用最大同频服务准则和最邻近服务准则快速确定问题式(10)优化变量中同频服务方式 λ 和空中基站/用户连接因子 A ,从而降低了原问题优化求解复杂度。求解算法具体描述如算法 1 所示。

算法 1 面向实际应用的优化问题求解算法。

1. 初始化: 给定 K 个地面节点坐标和 M 架空中基站标。
2. while $K_t \neq \emptyset$ do
3. 给定当前待服务地面节点集合 K_t , 该集合包含 k_t 个地面节点 t 表示这是第 t 次双向通信服务过程。
4. if $k_t \geq M$
5. (子问题 1) 使 M 架空中基站与离各自最近的用户完成连接。经过此步骤,第 t 次双向通信服务的 M 条同频链路(集合 L_t 表示)已被确定: 包括 M 个地面用户(集合 G_t 表示)和对应 M 架空中基站(集合 U_t 表示)。
6. (子问题 2) 对于此 M 条同频链路,求解其链路传输方向和空中基站高度的联合优化子问题。
7. else

8. (子问题3) 使 k_t 个地面用户节点与离各自最近的空中基站连接。经过此步骤,第 t 次双向通信服务的 k_t 条同频链路(集合 L_t 表示)已被确定:包括 k_t 个地面用户(集合 G_t 表示)和对应的 k_t 架空中基站(集合 U_t 表示)。

9. (子问题2) 对于此 k_t 条同频链路,求解其链路传输方向和空中基站高度的联合优化子问题。

10. end if

11. 从待服务地面节点集合 K_t 中删除本次已被服务节点集合 G_t 。

12. end while

对于子问题1,每架无人机选择距离自己最近的节点(即最临近搜索),然后多架无人机进行迭代从而可求解,子问题3类似。

3.2 基于序列凸规划和分枝定界法的链路传输方向和空中基站高度优化

用 H_t 来表示无人机集合 U_t 中的空中基站高度组成的向量,用 R_t 来表示同频链路集合 L_t 中链路传播方向组成的向量;且定义 L_t 中的元素个数为 N_t 。则空中基站高度和链路传输方向的联合优化子问题2可以被数学描述为

$$\max_{H_t, R_t} \sum_{i \in U_t, j \in G_t} R_{ij} \quad (11a)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} r_{ij, pq} \in \{0, 1\} & r_{ij, pq} \in R_t \end{cases} \quad (11b)$$

$$\begin{cases} H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} & H_i \in H_t \end{cases} \quad (11c)$$

式中:优化变量 H_t 为连续变量,而 R_t 为二元离散变量,因此子问题2为混合整形规划问题。该问题的解决思路为:①将二元离散变量放松为0~1之间的连续变量;②使用凸/凸近似优化理论求解放松问题;③使用分枝定界法确定原问题中二元离散变量的取值。

对二元离散变量 R_t 放松为连续变量 \bar{R}_t 的问题可以被数学描述为

$$\max_{H_t, \bar{R}_t} \sum_{i \in U_t, j \in G_t} R_{ij} \quad (12a)$$

$$\text{s. t. } r_{ij, pq} \in \{0, 1\} \quad r_{ij, pq} \in \bar{R}_t \quad (12b)$$

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad H_i \in H_t \quad (12c)$$

其中,约束条件均为凸集,而目标函数为多个双向传输速率的仿射集合,而每一个双向传输速率 R_{ij} 是对数函数和信噪比的复合函数。考虑优化变量为 H 和 R 中的元素时,经过二阶求导验证 R_{ij} 中的信噪比(7)和(8)是非凸函数;而 R_{ij} 中的对数函数为凹函数。因此,序列凸近似方法结合凸函数复合法可以用来解决优化问题(12)。具体求解过程描述如下。

首先,序列凸近似方法涉及到对函数的求导运算,只适用于目标函数与约束条件均为连续函数的优化问题求解。而在以上对于优化问题的数学描述中,定向天线增益(1)为分段函数,相对干扰转动 $r_{ij, pq}$ 为异或函数,两者均为非连续函数,无法直接应用序列凸近似方法进行求解。因此先将分段函数(1)近似为逻辑斯蒂函数:

$$\bar{g} \approx \frac{g_0 / \Phi_B^2}{1 + e^{-100(-\arccos^{-1}(h_i/d) + \Phi_B)}} \quad (13)$$

对于相对干扰转动 $r_{ij, pq}$,将异或函数先近似为分段函数,再将分段函数近似为逻辑斯蒂函数:

$$r_{ij, pq} = s_{ij} \quad s_{ji} \approx \begin{cases} 1 & |s_{ij} - s_{pq}| \geq 0.5 \\ 0 & |s_{ij} - s_{pq}| < 0.5 \end{cases} \approx \frac{1}{1 + e^{-100(\sqrt{(s_{ij} - s_{pq})^2 - 0.5})}} \quad (14)$$

式中: s_{ij} 为链路 L_{ij} 的链路转动干扰值; s_{pq} 为链路 L_{pq} 的链路转动干扰值。若链路 L_{ij} 双向通信过程中下行通信发生在第1时隙且上行通信发生在第2时隙,则 $s_{ij} = 0$, 否则 $s_{ij} = 1$ 。

其次,对信噪比表达式进行凸近似:定义 $U(H_t, \bar{R}_t)$ 为信噪比的统一表达式,且 (H_t^*, \bar{R}_t^*) 为优化问题的一个可行解,则分别以空中基站高度和链路传输方向为变量的信噪比一阶泰勒近似 \bar{U}_h 和 \bar{U}_r 可以表示为

$$\bar{U}_h(H_t | \bar{R}_t^*) = \bar{U}_h(H_t, \bar{R}_t^*) + (H_t - H_t^*) \frac{\partial U(H_t | \bar{R}_t^*)}{\partial H_t} \Big|_{H_t = H_t^*} \quad (15)$$

$$\bar{U}_r(\bar{R}_t | H_t^*) = \bar{U}_r(H_t^*, \bar{R}_t^*) + (\bar{R}_t - \bar{R}_t^*) \frac{\partial U(H_t^* | \bar{R}_t^*)}{\partial \bar{R}_t} \Big|_{\bar{R}_t = \bar{R}_t^*} \quad (16)$$

$\bar{U}_h(H_t | \bar{R}_t^*)$ 和 $\bar{U}_r(\bar{R}_t | H_t^*)$ 分别代入式(9),可以分别得到以空中基站高度和链路传输方向为变量的近似双向传输速率 $\bar{R}_{ij}^h(H_t | \bar{R}_t^*)$ 和 $\bar{R}_{ij}^r(\bar{R}_t | H_t^*)$ 。经过泰勒一阶近似后 $\bar{R}_{ij}^h(H_t | \bar{R}_t^*)$ 和 $\bar{R}_{ij}^r(\bar{R}_t | H_t^*)$ 均为凸函数,即对 $\bar{R}_{ij}^h(H_t | \bar{R}_t^*)$ 和 $\bar{R}_{ij}^r(\bar{R}_t | H_t^*)$ 分别进行空中基站高度和链路传输方向的优化时均为凸优化过程。

基于以上描述并结合分支定界法思想,链路传输方向和空中基站高度联合优化算法见算法2。

算法2 基于分枝定界法的传输方向和空中基站高度联合优化算法。

1. 初始化:给定一个满足约束条件(12b)和(12c)的可行解 (H_t^*, \bar{R}_t^*) 。

2. while 遍历每条链路干扰转动值 do

3. 通过解高度凸优化问题,更新 \bar{H}_i^* 。
4. for $k = 1: N_t$
5. $\bar{R}_i(k) = 0$
6. 通过解链路传输方向凸优化问题,更新 \bar{R}_i^* 且此时目标函数 $\text{Obj}_0 = \sum R_{ij}$ 。
7. $\bar{R}_i(k) = 1$
8. 通过解链路传输方向凸优化问题,更新 \bar{R}_i^* 且此时目标函数 $\text{Obj}_1 = \sum R_{ij}$ 。
9. 计算 $\bar{R}_i^*(k) = \arg\max\{\text{Obj}_0, \text{Obj}_1\}$ 。
10. end for
11. 从待服务地面节点集合 K_t 中删除本次已被服务节点集合 G_t 。
12. end while

空中基站高度凸优化问题可以被数学描述为

$$\max_{H_i} \sum_{i \in \bar{U}_t, j \in G_t} R_{ij} \quad (17a)$$

$$\text{s. t.} \quad H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad H_i \in \mathbf{H}_t \quad (17b)$$

链路传输方向凸优化问题可以被数学描述为

$$\max_{R_i} \sum_{i \in \bar{U}_t, j \in G_t} R_{ij} \quad (18a)$$

$$\text{s. t.} \quad r_{ijpq} \in \{0, 1\} \quad r_{ijpq} \in \bar{R}_i \quad (18b)$$

凸优化问题 (17) 和 (18) 可以用 CVX 等凸优化工具进行快速得到其最优解。

4 验证与结果分析

4.1 验证场景选取和参数设置

本节验证场景中共有 5 个小区 $\text{Cell}_1 \sim \text{Cell}_5$, 即 $M=5$ 。每个小区中心上空有一架无人机空中基站, 其中位于正中间的小区 Cell_3 为用户拥塞小区, 如图 5 所示。即该小区拥有比其他小区更多用户数量; 相应地其他 4 个小区为非拥塞小区。具体仿真参数如表 1 所示。

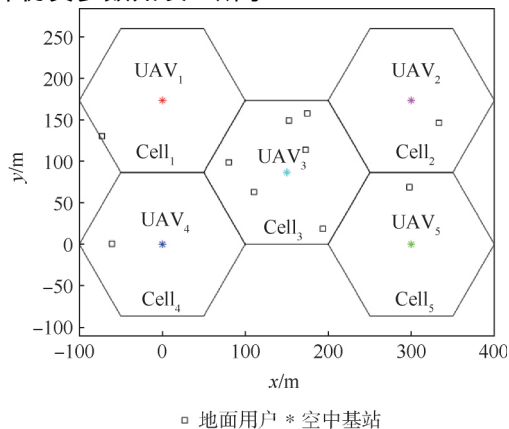


图 5 吞吐量优化方法仿真验证场景

Fig. 5 Simulation and verification scenario for throughput optimization method

表 1 多机场吞吐量优化方法验证的参数设置
Table 1 Parameter setting for throughput optimization method verification in multi-UAV scenarios

参数	取值
地面用户最大发射功率 $P_{gmax}/(\text{dB} \cdot \text{m})$	20
空中基站最大发射功率 $P_{umax}/(\text{dB} \cdot \text{m})$	30
定向天线半波数宽度 Φ_B	$\pi/3$
单位天线增益 g_0	2.286×10^4 [18]
载频 f_c/GHz	2
路损指数 n	2.5
空中基站最大高度 H_{max}/m	400
空中基站最小高度 H_{min}/m	50
空地信道参数 α	0.6 [15]
空地信道参数 γ	0.11 [15]
噪声功率 $\sigma_{NLoS}^2/(\text{dB} \cdot \text{m})$	-120
噪声功率 $\sigma_{LoS}^2/(\text{dB} \cdot \text{m})$	-120
直视链路阴影衰落均值 ψ_{LoS}/dB	2 [15-16]
非直视链路阴影衰落均值 ψ_{NLoS}/dB	20 [15-16]

当拥塞小区 Cell_3 用户数量为 6 而非拥塞小区用户数量均为 1 时(见图 5), 图 6 和图 7 分别给出了使用本文所提吞吐量优化方法第 1 次服务和第 2 次服务中, 链路传输方向和空中基站高度的可视化表示。图 5 ~ 图 7 均绘制在水平面二维笛卡尔坐标系上, 来表示小区、空中基站和地面用户在水平面上的分布情况。图 6 和图 7 中空中基站水平面位置处 \triangle 和 ∇ 分别代表该条链路传输方向(链路干扰转动值), 即 \triangle 代表链路干扰转动值为 0(下行通信发生在奇数时隙, 上行通信发生在偶数时隙); 而 ∇ 代表链路干扰转动值为 1(下行通信发生在偶数时隙, 上行通信发生在奇数时隙)。

图 6 中结果表示, 使用吞吐量优化方法后, 第 1 次服务 5 架空中基站 $\text{UAV}_1 \sim \text{UAV}_5$ 通过调整高

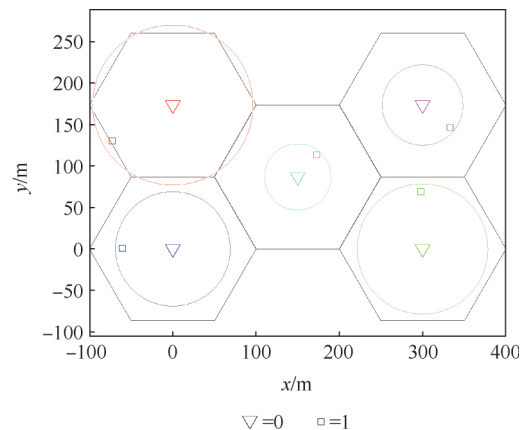


图 6 使用所提吞吐量优化方法第 1 次服务

Fig. 6 First service using proposed throughput optimization method

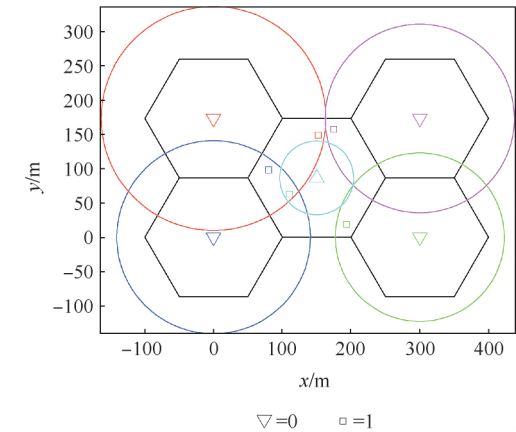


图 7 使用所提吞吐量优化方法的第 2 次服务
Fig. 7 Second service using proposed throughput optimization method

度覆盖了距离各自最近地面用户。同时,这 5 条链路的干扰转动值均为 1,即第 1 次通信服务 5 条链路使用相同传输方向。以上结果说明吞吐量优化方法可以使空中基站在无覆盖范围重叠服务时使用相同传输方向。在经过第 1 次服务后,所有未服务 5 个地面节点均存在于拥塞小区 Cell₃ 中。

而图 7 中结果显示,第 2 次通信服务中,UAV₁、UAV₂、UAV₄ 和 UAV₅ 将升高高度从而使其定向天线覆盖范围能够覆盖 Cell₃ 中距离各自最近节点。对于链路传输方向,图 7 中显示 UAV₃ 对应链路的干扰转动值为 0,而其他 4 架空中基站对应链路的干扰转动值为 1。结果说明,使用所提吞吐量优化算法可以使非拥塞小区中空中基站通过升高高度来覆盖拥塞小区从而提供增强覆盖服务,此时空中基站覆盖范围有重叠,且重叠范围内链路使用不同传输方向。

4.2 链路传输方向和空中基站高度联合优化方法与对比方法系统平均吞吐量比较

4.2.1 不同拥塞小区用户数目情况下系统平均吞吐量比较

不同拥塞小区用户数目下,链路传输方向和空中基站高度联合优化方法与对比方法平均吞吐量情况,如图 8 所示。图中,本文方法高度优化,链路传输方向优化;对比方法 1 高度固定,链路传输方向优化;对比方法 2 高度优化,链路传输方向随机;对比方法 3 高度固定,链路传输方向随机。图 8 中横坐标表示拥塞小区 Cell₃ 中用户数目变化范围,纵坐标表示使用本文方法和对比方法的系统平均吞吐量,即式(10a)。

对比方法使用最大同频服务和最临近服务准则,链路传输方向随机是指每条链路传输方向随

机使用 1 或 0 的干扰转动值,固定高度指空中基站高度均为 $(H_{\max} + H_{\min})/2$ 。结果显示,随着拥塞小区 Cell₃ 用户数目增多,系统平均吞吐量性能均呈现下降趋势,这是因为随着拥塞小区中用户数目增多,空中基站需要使用更多时间来服务所有地面用户,因此系统平均吞吐量随之下降。但是同时可以观察到,相比于使用 3 种对比方法,使用本文联合优化链路传输方向和空中基站高度的吞吐量优化方法可以显著提升系统平均吞吐量,验证了本文吞吐量优化方法的有效性。表 2 总结计算了本文方法和对比算法(高度固定,链路传输方向随机)在不同拥塞小区用户数目时的吞吐量及其提升倍数情况,从表中可观察到,当拥塞小区用户数目是非拥塞小区用户数目的 1~36 倍时,相比于不联合优化链路传输方向和空中基站高度的对比方法,本文方法可提升系统平均吞吐量 8 倍左右。

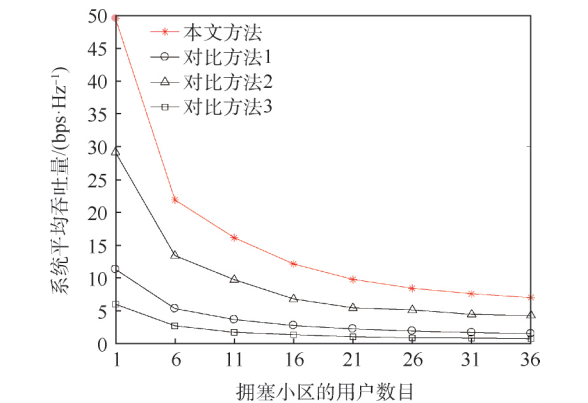


图 8 不同拥塞小区用户数目下系统平均吞吐量比较
Fig. 8 Comparison of system average throughput under different ground user numbers of congested communities

表 2 不同方法的吞吐量比较
Table 2 Throughput comparison of different methods

拥塞小区用户数	本文方法	对比方法	吞吐量提升/倍
1	49.5	6	8.25
6	21.9	2.7	8.1
11	16.15	1.8	9.0
16	12.15	1.4	8.7
21	9.8	1.1	8.9
26	8.5	0.9	9.4
31	7.6	0.9	8.4
36	7.1	0.8	8.9

4.2.2 不同空中基站最低高度情况下系统平均吞吐量比较

空中基站最低高度 H_{\min} 取值 50~400 m 时,使用链路传输方向和空中基站高度联合优化方法

与不优化空中基站高度对比方法的系统平均吞吐量情况,如图9所示。图中,本文方法高度优化,链路传输方向优化;对比方法高度固定,链路传输方向优化。其中,对比方法中高度固定为空中基站最低高度,同时图9中2种方法均使用分枝定界法来优化链路传输方向。结果显示,空中基站可调高度范围越大,使用本文方法系统平均吞吐量提升越大。

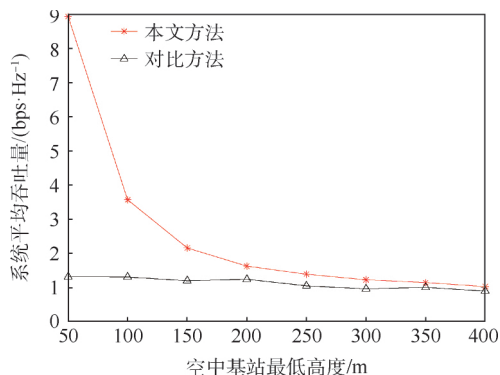


图9 不同空中基站最低高度情况下系统平均吞吐量比较

Fig. 9 Comparison of average throughput at different UAV minimum altitudes

4.2.3 不同阴影衰落情况下系统平均吞吐量比较

非直视链路阴影衰落均值不同时使用链路传输方向和空中基站高度联合优化方法和不优化链路传输方向的对比方法的系统平均吞吐量情况,如图10所示。图中,对比方法链路传输方向随机,高度优化;本文方法链路传输方向优化,高度优化。其中,对比方法使用了序列凸规划对空中基站高度进行了优化。图10中结果显示,非直视链路阴影衰落越严重,使用此2种方法的系统平均吞吐量均升高,此结果可以解释为:非直视链路阴

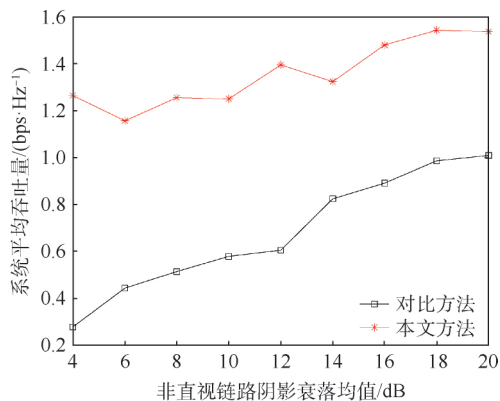


图10 不同非直视链路阴影衰落均值情况下系统平均吞吐量比较

Fig. 10 Comparison of average throughput under different non-direct-looking shadow fading averages

影衰落越严重,通过非直视链路的同频干扰就越小,无论是本文方法还是不优化链路传输方向的对比方法,均存在非直视链路的同频干扰,因此系统平均吞吐量均升高。结果还显示,本文联合优化链路传输方向和空中基站高度固定的吞吐量优化方法相比于不优化链路传输方向的对比方法,可以较大程度提升系统平均吞吐量,验证了所提方法的有效性。

5 结束语

本文研究了联合优化链路传输方向和系统空中基站高度的空地双向通信吞吐量优化方法,面向实际应用提出了最大同频链路准则、就近服务准则从而简化多机场景中同频链路调度和空中基站/用户连接问题,应用序列凸规划、分枝定界法计算出了最优链路传输方向和空中基站高度。多种场景下验证结果均显示,本文联合优化链路传输方向和空中基站高度的吞吐量优化方法,显著优于其他非联合优化的对比方法,其中,当拥塞小区用户数目是非拥塞小区用户数目的1~36倍时,相比于不联合优化链路传输方向和空中基站高度的对比方法,所提方法可提升系统平均吞吐量8倍左右。

参考文献 (References)

- [1] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360.
- [2] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [3] SELECKY M, FAIGL J, ROLLO M. Communication architecture in mixed-reality simulations of unmanned systems[J]. Sensors, 2018, 18(3): 853.
- [4] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [5] KHAMSEH H B, JANABI-SHARIFI F, ABDESSAMEUD A. Aerial manipulation—A literature survey[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 107: 221-235.
- [6] PRIEST L, TERRY C, ERICKSON R. Tethered unmanned aerial vehicle-based systems and methods associated with cell sites and cell towers: USA 9669945[P]. 2017-06-06.
- [7] SUDHSEEH P G, MOZAFFARI M, MAGARINI M, et al. Sum-rate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1240-1243.

- [8] BUSHNAQ O M ,KISHK M A ,CELIK A ,et al. Cellular traffic offloading through tethered-UAV deployment and user association [EB/OL]. (2020-03-02) [2020-03-28]. <https://arxiv.org/abs/2003.00713v1>.
- [9] KISHK M A ,BADER A ,ALOUINI M S. Capacity and coverage enhancement using long-endurance tethered airborne base stations [EB/OL]. (2019-06-27) [2020-03-28]. <https://arxiv.org/pdf/1906.11559.pdf>.
- [10] 李威,李跃军.利用无人机搭建高空基站的研究[J]. 通讯世界 2017 9: 12-13.
LI W ,LI Y J. The research on building high-altitude communication base station by using UAV [J]. Telecom World 2017 9: 12-13 (in Chinese).
- [11] 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 Communication 2016 40(15) : 68-71 (in Chinese).
- [12] 徐秀杰,贾荣光,杨玉永,等.系留式无人机中继通信系统在地震应急现场的应用试验研究[J]. 震灾防御技术, 2018 13(3) : 718-726.
XU X J ,JIA R G ,YANG Y Y ,et al. Technical application of the tethered UAV relay system in earthquake emergency site [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention ,2018 ,13 (3) : 718-726 (in Chinese).
- [13] HUANG W ,KIM D M ,DING W ,et al. Joint configuration of transmission direction and altitude in uav-based two-way communication [EB/OL]. [2020-03-28]. <https://arxiv.org/pdf/1805.08635.pdf> 2018.
- [14] HUANG W ,KIM D M ,DING W ,et al. Joint optimization of altitude and transmission direction in UAV-based two-way communication [J]. IEEE Wireless Communications Letters ,2019 ,8 (4) : 984-987.
- [15] AL-HOURANI A ,KANDEEPAN S ,JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments [C] // Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press 2014: 2898-2904.
- [16] MOZAFARRI M ,SAAD W ,BENNIS M ,et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage [J]. IEEE Communications Letters ,2016 ,20 (8) : 1647-1650.
- [17] POPOVSKI P ,SIMEONE O ,NIELSEN J J ,et al. Interference spins: Scheduling of multiple interfering two-way wireless links [J]. IEEE Communications Letters 2015 ,19(3) : 387-390.
- [18] HE H ,ZHANG S ,ZENG Y ,et al. Joint altitude and beamwidth optimization for UAV-enabled multiuser communications [J]. IEEE Communications Letters 2018 22(2) : 344-347.

Throughput optimization for cellular communication on tethered unmanned aerial vehicle base station

LUO Yizhe¹, DING Wenrui^{2,*}, LEI Yaolin³, LIU Chunhui²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Unmanned System, Beihang University, Beijing 100083, China;

3. China Electronics Technology Group Corporation 54th Research Institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Considering the problems of uneven distribution of the number of ground users and serious co-channel interference of multi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) cooperative services when multiple tethered UAV aerial base stations are used to provide air-ground two-way communication services to multiple communities, this paper proposes a throughput optimization method with both aerial base station height and link transmission direction optimized. This method determines the co-frequency link pairing and drone/user pairing by using the maximum co-frequency link criterion and the nearest service criterion. By optimizing the drone height and link transmission direction, the average throughput of the system is improved and the co-frequency interference between users is reduced. The verification results in various scenarios show that the proposed method is significantly better than non-joint-optimization comparative methods that do not jointly optimize the link transmission direction and the height of aerial base station. When the number of users in a congested community is 1 – 36 times the number of users in a non-congested community, compared with the comparative methods, the proposed method can improve the average throughput of the system by about 8 times.

Keywords: aerial base station; tethered Unmanned Aerial Vehicle (UAV); air-ground two-way communication; optimization methodology; link transmission direction

Received: 2020-04-10; **Accepted:** 2020-07-03; **Published online:** 2020-08-05 16:05

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200805.1132.002.html

Foundation items: Defense Industrial Technology Development Program (JCKY2017601C006); National Key R & D Program of China (2016YFB0502602)

* **Corresponding author.** E-mail: ding@buaa.edu.cn