

基于信息年龄的无人机缓存和轨迹优化算法

周晓雅, 朱琦

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 南京 210009)

摘要: 针对无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)辅助的内容分发系统中信息新鲜度的问题, 提出了一种基于信息年龄(Age of information, AoI)的无人机缓存和轨迹优化算法, 缓解了热点区域内用户请求长时间无法应答的问题。在无人机有限的缓存容量和覆盖范围内, 通过优化地面用户成簇, 无人机缓存策略以及轨迹, 建立了所有用户获取请求内容的平均代价最小化问题。以无人机的覆盖半径作为成簇半径, 采用AP(Affinity propagation)聚类算法, 对地面用户进行分簇; 将本文中的无人机缓存问题转化为01背包问题, 采用动态规划(Dynamic programming, DP)算法进行求解; 通过遗传算法(Genetic algorithm, GA)求解无人机的飞行轨迹。仿真结果表明, 本文算法能够有效降低用户获得请求内容的平均代价。

关键词: 无人机; 缓存; 信息年龄; 轨迹; 低空物联网

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

AoI-Based Algorithms for UAV Caching and Trajectory Optimization

ZHOU Xiaoya, ZHU Qi

(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210009, China)

Abstract: Aiming at the problem of information freshness in unmanned aerial vehicle (UAV) assisted content distribution system, a UAV caching and trajectory optimization algorithm based on age of information (AoI) is proposed to alleviate the problem of long time unanswered user requests in hotspot areas. The problem of minimizing the average cost of accessing the requested content for all users is established by optimizing the ground user clustering, the UAV caching policy and the trajectory within the limited cache capacity and coverage of the UAV. The radius of coverage of UAVs is used as the radius of clustering, and the affinity propagation (AP) clustering algorithm is used to cluster the ground users. The UAV caching problem in this paper is transformed into the 01 backpacking problem, which is solved using the dynamic programming (DP) algorithm. UAV flight trajectories are solved by the genetic algorithm (GA). Simulation results show that the algorithm proposed in this paper can effectively reduce the average cost for users to obtain the requested content.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); caching; age of information (AoI); trajectories; low altitude intelligence network

引 言

近年来,低空空域已成为人类经济活动和资源开发利用的重要领域,低空物联网因此得以发展,成为低空经济的重要支撑。低空物联网^[1]是指在低空空域实现“人-机-物”三元融合,通过网络化、数字化和智能化技术构建的智能化数字网络体系。移动数据流量因为无线通信技术和智能设备的发展,成爆炸性增长,发展具有超高数据速率、超低延迟、大规模连接、极低能耗和高质量体验的通信系统成为迫切需求。移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)技术的出现,有效地缓解了上述需求,将云服务器放置在用户附近,为用户提供计算和存储服务。

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)机动灵活,可控制性强,被广泛应用于各种具备缓存使能的通信系统中。文献[2]考虑了有无人机辅助通信的地面网络内容交付和缓存的场景,无人机提供缓存以减少回程拥塞,并且近地轨道卫星支持无人机的回程链路,通过联合优化缓存放置、无人机的资源分配和轨迹,最大化每个地面用户的最小吞吐量。文献[3]研究了具备缓存能力的无人机在蜂窝网络中,网络部署和资源分配对于内容分发应用程序用户体验质量(Quality of experience, QoE)的影响,制定了无人机部署、缓存放置和用户关联的联合优化问题,以最大化用户的体验质量,并通过平均意见得分(Mean opinion score, MOS)进行评估。文献[4]针对无人机辅助网络中内容流行度的时空分布特征、剩余缓存变化以及用户下载体验效果建立数学模型并提出了优化内容放置的方法。文献[5]以最大化网络吞吐量为目标,提出了一个联合优化缓存与轨迹的问题,对内容放置、内容分发和无人机轨迹进行决策。也有学者研究了无人机辅助D2D蜂窝网络中无人机的缓存性能。文献[6]研究了移动网络中无人机缓存和D2D共存时缓存节点放置和选择问题,考虑了无人机轨迹和地面用户的移动性,以最大限度地提高吞吐量。文献[7]考虑了具有D2D和缓存使能的无人机通信网络,通过合作博弈使不同内容提供商(Content providers, CPs)组成联盟,其中所有订阅者可以通过D2D链路交换内容,从而降低内容传输成本和延迟,采用Lyapunov优化运营商动态信道和无人机分配策略,最大化每个CP的预期收益和运营商长期平均收入。上述文献中都为单无人机场景,也有一些场景中引入无人机集群^[8-10]。文献[8]研究了一种支持多无人机的移动边缘缓存系统,考虑了用户位置和内容的动态变化,通过联合优化无人机的部署和内容放置,最小化请求时延。文献[9-10]考虑了能耗约束下,多无人机任务卸载和缓存的优化问题。上述文献都是考虑了缓存使能下无人机对系统吞吐量、时延或者能耗的影响,并未考虑信息年龄。

信息年龄(Age of information, AoI)被用来描述信息的新鲜程度,通常是指信息由源端产生至接收端的时间差^[11],常应用在队列问题中。文献[12]研究了由源端和目的地端组成的状态更新通信系统中的信息新鲜度,得到了在离散时间排队系统中AoI的表达形式。文献[13]将多跳卫星网络间的通信过程建模成一个M/M/1队列问题,结果表明当节点的数量增加时,系统的利用率会下降,平均AoI减小。文献[14]提出了一种单服务器双队列的模型,把响应时间作为性能指标,把AoI作为新鲜度指标,设计一个调度策略,以解决性能和新鲜度之间的权衡问题,结果表明基于阈值的策略可以有效地控制性能和新鲜度之间的平衡。也有不少学者将缓存问题和信息年龄相结合,文献[15]考虑了时隙系统中受内容推荐和AoI影响的缓存更新问题,作者证明了该问题是NP-hard问题,然后推导出一个可以在小规模场景下获得最优解的整数线性公式。文献[16]利用随机几何和排队理论建立了一个既能反映交通动态又能反映干扰因素下地理分布的时空模型。在随机缓存框架下,采用用户关联的最大平均接收功率准则实现AoI的封闭表达式。最后,利用KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件构造了一个最小化峰值AoI的凸优化问题,并获得了最优缓存概率。文献[17]为了最大化缓存命中率,利用动态图神经网络共同学习嵌入在二分图中的结构模式和时间模式,同时提出了一种基于信息年龄的注意力机制,以提取有价值的历史信息,避免消息过时的问题。文献[18]提供了一种面向信息年龄和缓存辅助的混合组播/

单播/D2D传输架构,并采用多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)技术,以增大数据传输速率,减轻大数据流量的负担,提高系统效率。上述文献中大多将问题建模成队列问题并未考虑无人机辅助的通信系统中信息年龄和缓存对系统性能的影响。

在具备缓存使能的无人机通信场景中,无人机有着体积小、可移动性强的特点,所以对于基站固定的蜂窝网络来说,无人机通过移动位置为用户提供服务可以提升用户体验。此外,无人机缓存空间有限也是另一特点,缓存满足用户需求的文件内容更能提高无人机的缓存空间利用率。本文根据无人机的这两个特点,提出了一种基于信息年龄的无人机缓存和轨迹的优化算法,用来解决地面基站繁忙时,由缓存空间有限的无人机提供服务的情况下,所有用户获取请求内容平均代价最小化的问题。将所有用户按照无人机的覆盖半径进行分簇,簇首位置即为无人机悬停位置,通过优化无人机的缓存策略和轨迹,使所有用户的请求得到应答。本文的主要贡献总结如下:

(1)构建了以用户平均代价最小化为目标的无人机内容分发模型,采用邻近传播(Affinity propagation, AP)聚类算法将用户分簇,无人机在簇首处悬停时簇内用户与无人机进行通信,按照频分多址(Frequency division multiple access, FDMA)的方式获取请求内容,随后无人机按照轨迹对所有用户请求进行应答。

(2)推导了用户获得请求内容的代价与簇首位置、无人机缓存和轨迹的关系,在无人机覆盖半径和缓存容量等约束下,建立了用户平均代价最小化的优化问题,并将原问题分解为成簇、无人机缓存策略以及轨迹优化3个子问题分别求解。

(3)将无人机覆盖半径作为成簇半径,采用AP聚类算法将所有用户分簇,获得成簇结果;无人机缓存问题转换成01背包问题,采用动态规划算法对缓存策略进行求解;通过遗传算法优化无人机的飞行轨迹。仿真结果表明,与对比算法相比提出的算法能够有效减小用户获取请求内容的平均代价,保障用户获得请求内容的新鲜度。

1 系统模型与问题建立

1.1 系统模型

本文的系统模型如图1所示,由一个地面基站(Ground base station, GBS),坐标为 Z_{GBS} ,一架具有缓存功能的无人机 u 以及 N 个用户组成,图中 ch 表示簇首用户, V 表示无人机轨迹。考虑热点区域,流量高峰时段,地面基站繁忙,无法向基站覆盖范围内的所有用户提供有效服务的情况下,例如足球比赛期间的体育场,开演唱会的大型汇演场地,为了缓解基站压力,派出具备缓存能力的无人机来辅助地面基站,为用户提供服务。

地面基站可以提供全部的内容文件,内容文件表示为 $f \in \mathcal{F} = \{1, 2, \dots, F\}$,每个文件大小是 W_f 。假定内容文件数量 F 和流行度 p_f 在一定时间内不变,内容流行度 p_f 服从Zipf分布,表示为

$$p_f = \frac{f^{-\alpha}}{\sum_{j=1}^F j^{-\alpha}} \quad 0 < \alpha < 1, \forall f \quad (1)$$

式中 α 为偏好因子。每个内容文件都有一定的生命周期 l_f ,内容的信息年龄超过内容的生命周期,意味着该内容失效,为了保障内容有效

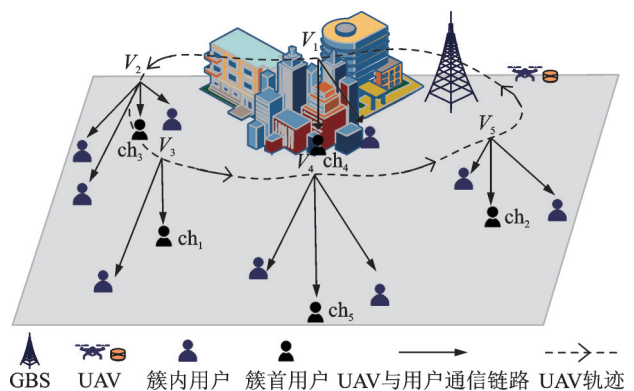


图1 系统模型图

Fig.1 System modeling diagram

性需要从基站处获取。某一时刻,已知用户 $n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 的请求为二元变量 $r_{n,f}, r_{n,f} = 1$ 表明用户 n 请求了内容 $f, r_{n,f} = 0$ 反之,每个用户只产生一个请求,但同一文件可以被重复请求。不考虑用户的移动性,忽略用户高度,用户 n 的坐标 $Z_n = (x_n, y_n)$ 。无人机需要从基站处缓存相关内容为用户提供服务,倘若用户请求的内容无人机并未缓存或缓存的内容文件在到达用户时信息年龄大于该文件的生命周期,则需要无人机向地面基站转发该请求,并由无人机获取后再将内容发送给用户。

无人机在已知用户请求并缓存相关内容文件后,以恒定速度 v 从基站出发,为所有用户提供服务。无人机的高度 H 恒定,与地面所成俯角为 θ ,则覆盖半径^[19]为 $R_u = H \tan \theta$ 。为了便于规划无人机的飞行轨迹,将 N 个用户按照无人机的覆盖范围进行分簇,所得簇首数目为 M ,簇首用户 $ch_j \in CH = \{ch_1, ch_2, \dots, ch_M\}$ 且 $CH \subseteq \mathcal{N}$, CH 为簇首用户集合。二元变量 γ_{nj} 表示节点 n 归属于以 ch_j 为簇首的簇,否则 $\gamma_{ij} = 0$,与 ch_j 同簇的用户用集合表示为 $C_j = \{n | \gamma_{nj} = 1, n \in \mathcal{N}\}, 1 \leq j \leq M$ 。簇首位置 Z_{ch_j} 即无人机悬停为用户提供服务的位置,如图 1 所示的无人机轨迹 $V = [V_1, V_2, V_3, V_4, V_5]$,无人机从基站花费时间 $t_1^{\text{fly}} = \frac{\|Z_{\text{GBS}} - Z_{ch_4}\|}{v}$ 飞至 V_1 ,即簇首 ch_4 上方,飞行过程中不为用户提供服务,在悬停时间 t_1^{h} 内为 C_4 中的用户提供服务, t_1^{h} 时簇内用户请求被应答花费的时间,然后前往下一悬停位置,无人机最终的飞行轨迹 $V = [ch_4, ch_3, ch_1, ch_5, ch_2]$ 。

1.2 缓存模型

无人机缓存容量有限,只能缓存部分用户的请求内容为用户提供服务以缓解地面基站拥塞。用 $c_{n,f}$ 来表示对于用户 n 请求文件 f 的缓存策略, $c_{n,f} = 1$ 表示缓存, $c_{n,f} = 0$ 反之。由于无人机的缓存容量有限,所以有

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} c_{n,f} W_f \leq S \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (2)$$

式中 S 为无人机的缓存容量。式(2)表示,缓存内容的总和并不大于无人机的缓存容量。

1.3 通信模型

(1) 地面基站与无人机间的通信模型

假设地面基站到无人机的无线回程链路满足视距传输条件,当无人机在簇首 ch_j 悬停时,其传输速率^[20]为

$$R_{b,u}^j = B_b \log_2 \left(1 + \frac{P_b}{P_L N_0 B_b} \right) \quad (3)$$

式中: B_b 为基站带宽; P_b 为基站传输功率; P_L 为视距链接的路径损耗, $P_L = 10^{6.14} d^2$, $d = \sqrt{\|Z_{\text{GBS}} - Z_{ch_j}\|^2 + H^2}$ 为基站到无人机的距离; N_0 为加性高斯白噪声的功率谱密度。内容文件 f 传输到

无人机所消耗的时间 $t_{b,u} = \frac{W_f}{R_{b,u}^j}$ 。

(2) 无人机与用户间的通信模型

假设无人机和用户之间的无线信道以视距链路为主,当无人机到达簇首 ch_j 时,用户 $n \in C_j$ 与无人机间的信道增益为 $\beta_{u,n} = \frac{\beta_0}{\|Z_n - Z_{ch_j}\|^2 + H^2}$,其中 β_0 为参考距离 $d_0 = 1 \text{ m}$ 的信道增益,采用 FDMA,用

户间平分带宽与无人机进行通信,即 $B_n = \frac{B_u}{N_c^j}$, B_n 为分配给用户 n 的带宽, B_u 为无人机通信带宽, N_c^j 为

无人机可以直接提供的文件数目。无人机在簇首 ch_j 处与用户 n 的传输速率^[21]为

$$R_{u,n}^j = B_n \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0 P_u}{\|Z_n - Z_{ch_j}\|^2 + H^2} \right) \quad (4)$$

式中: $\gamma_0 = \frac{\beta_0}{B_n N_0}$ 为参考距离 $d_0 = 1 \text{ m}$ 处的信噪比; P_u 为无人机的传输功率。内容文件 f 传输到用户 n 所消耗的时间 $t_{u,n} = \frac{W_f}{R_{u,n}^j}$ 。

1.4 AoI 模型

信息年龄是用来衡量信息新鲜度的一种指标,指数据从源端产生到接收端接收的时间差。假定从地面基站处获得的内容文件具有最高的新鲜度,并且忽略初始状态下无人机从基站获得内容文件的时间,即无人机完成缓存离开基站时,缓存内容 f 信息年龄 $a_f = 0$ 。既定轨迹为 $V = [V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_M]$, V_j 对应以 ch_j 为簇首的簇,用户 $n \in C_j$, 请求内容文件为 f , 当无人机离开基站,按照轨迹以恒定速度 v 到达簇首 ch_j , 为簇内用户提供服务时,用户 n 获得文件 f 的信息年龄表示为

$$a_{n,f} = \begin{cases} a_f & r_{n,f} c_{n,f} = 1 \text{ 且 } a_f \leq l_f \\ a'_f & r_{n,f} c_{n,f} = 0 \text{ 或 } a_f > l_f \end{cases} \quad (5)$$

式中:若文件 f 被缓存且信息年龄 $a_f = \sum_{i=1}^j t_i^{\text{fly}} + \sum_{i=1}^{j-1} t_i^{\text{h}}$, 不大于文件的生命周期 l_f , 则的用户 n 获得文件 f 的信息年龄 $a_{n,f} = a_f$; 若文件 f 未被缓存,或被缓存但文件信息年龄 a_f 大于 l_f , 则无人机需要将用户的请求转发到基站,从基站获取后发送给用户,用户 n 获得文件 f 的信息年龄被表示为 $a_{n,f} = a'_f$, 其中 $a'_f = t_{b,u} + t_{u,n}$ 为文件 f 从基站获取文件的信息年龄。

1.5 问题建立

某一时刻地面基站由于负载过大,收集到用户请求后未能及时应答,基站派出具备缓存能力的无人机缓存部分用户的请求内容,为用户提供服务。定义用户 n 获得请求文件 f 的代价为 E_n , 表达式为

$$E_n = \begin{cases} a_f & r_{n,f} c_{n,f} = 1 \text{ 且 } a_f \leq l_f \\ a'_f + \omega W_f & r_{n,f} c_{n,f} = 0 \text{ 或 } a_f > l_f \end{cases} \quad (6)$$

式中:当文件 f 被无人机缓存且在到达用户时内容有效,即 $a_f \leq l_f$, 用户直接从无人机处获得文件,用户代价 $E_n = a_f$; 当文件 f 未被无人机缓存或在到达用户时内容无效,即 $a_f > l_f$, 由于基站繁忙,从基站获得文件 f 需要的代价与文件大小有关,用户代价 $E_n = a'_f + \omega W_f$, ω 为惩罚因子。通过优化用户成簇结果 M , 无人机的缓存内容 c 以及飞行轨迹 V , 让所有用户获得文件的平均代价最小,即优化问题 P 表示为

$$\begin{cases} \text{P: } \min_{M,c,V} \frac{1}{N} \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{n \in \mathcal{N}} E_n \\ \text{s.t. (C1)} \sum_{f \in \mathcal{F}} c_{n,f} W_f \leq S & \forall n \in \mathcal{N} \\ \text{(C2)} a_{n,f} \leq l_f & \forall n, f \\ \text{(C3)} R_u \geq R_{u,u'} & \forall u, u' \in C_j, 1 \leq j \leq M \\ \text{(C4)} r_{n,f}, c_{n,f} \in \{0, 1\} & \forall n, f \end{cases} \quad (7)$$

式中:约束(C1)表示缓存内容文件的总和不大于无人机的缓存容量;约束(C2)表示用户所获文件的信

息年龄小于请求文件的生命周期;约束(C3)表示同一簇内的用户 u, u' 间的距离 $R_{u, u'}$ 不大于无人机的覆盖半径 R_u , 以保证用户的服务质量;约束(C4)表示 $r_{n, f}, c_{n, f}$ 为二元变量。

2 算法设计

结合式(5~7)中可知,用户获得请求文件的代价 E_n 会受到用户位置、无人机缓存决策以及飞行轨迹的影响,而缓存决策和轨迹之间耦合紧密且都依赖于用户的位置,无法直接进行求解,所以将问题P分成3个子问题。子问题1用于解决用户的成簇问题,通过AP聚类算法进行求解。AP算法根据用户之间的距离进行成簇,不需要预设成簇的数量,不会产生新的数据作为簇首,并且对于初始值并不敏感,因此成簇结果更稳定,成簇效果更好。子问题2为无人机缓存决策问题,通过动态规划(Dynamic programming, DP)算法进行求解。动态规划算法能够为01背包问题提供结构化的方案,通过自低向上的方式构建方案,避免了大量的重复计算,具备更高的效率。子问题3是无人机轨迹的优化问题,采用遗传算法(Genetic algorithm, GA)进行求解。遗传算法借鉴了生物学中遗传和进化的思想,将优化问题的解看作是进化过程中的个体,通过基因重组、突变和选择等完成逐代的进化,最终找到最优解。子问题1的求解是无人机的缓存和轨迹优化的基础,而无人机的轨迹依赖于缓存决策,同样缓存决策也会影响无人机的轨迹。所以在用户成簇后,本文采用迭代的方法优化无人机的缓存决策和轨迹,算法流程图如图2所示。

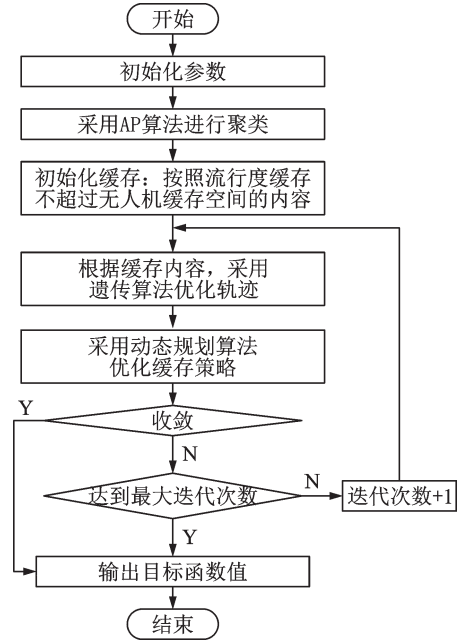


图2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flowchart

2.1 基于AP的成簇算法

用户分布在热点区域内,流量高峰时段用户无法得到有效的应答,为了给用户提供良好的通信效果,降低用户获得请求内容的代价,就要节省无人机花费在飞行和悬停上的时间,即在保证被无人机有效覆盖的情况下,减小用户的成簇数目,子问题1(P1)可以表示为

$$\begin{cases} \text{P1: } \min_M C_j \\ \text{s.t. (C3) } R_u \geq R_{u, u'} \quad \forall u, u' \in C_j, 1 \leq j \leq M \end{cases} \quad (8)$$

本文采用AP聚类算法^[22]对问题P1进行求解。相邻用户之间传递的信息有两种:(1) $R(i, j)$,由用户 i 发送给相邻用户 j ,表示用户 j 适合作为其簇首的程度;(2) $A(i, j)$,由用户 j 发送给相邻用户 i ,表示用户 i 选择用户 j 作为其数据点的合适程度。相似度矩阵 $Q(i, j)$,表示用户 j 作为用户 i 的聚类中心的能力,用负欧氏距离来表示。信息迭代的更新方程为

$$A(i, j) = \begin{cases} \sum_{k \neq j} \max \{ R(k, j), 0 \} & i = j \\ \min \left\{ 0, R(j, j) + \sum_{k \neq i, j} \max \{ R(k, j), 0 \} \right\} & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

$$R(i, j) = Q(i, j) - \max_{k \neq j} \{ S(i, k) + A(i, k) \} \quad (10)$$

收敛后用户 j 的置信值 $R(j,j)+A(j,j)$ 大于零,用户 j 被认为是簇首,因此获得簇首用户的集合为

$$CH = \{j | R(j,j) + A(j,j) > 0\} \quad (11)$$

有 $M = |CH|$ 簇,基于此成簇结果,无人机就有 M 个悬停点,为簇内用户提供服务。具体算法步骤如算法 1 所示。

算法 1 基于 AP 的成簇算法

输入:用户坐标,无人机最大覆盖半径 R_u , iter_max;

输出:成簇数目 M ,簇首集合 CH ,每个簇的规模 C_size ;

- (1) 初始化矩阵 $Q(i,j), R(i,j)=0, A(i,j)=0$;
- (2) 按照式(8)更新矩阵 $A(i,j)$;
- (3) 按照式(9)更新矩阵 $R(i,j)$;
- (4) 重复步骤 2、3 直至矩阵 $E(i,j)=R(i,j)+A(i,j)$ 稳定,或达到最大的迭代次数;
- (5) 按照式(10)获得最终的成簇结果,包括成簇数目 M ,簇首集合 CH ,每个簇的规模 C_size 。

2.2 基于动态规划的缓存决策

用户成簇后,假定无人机轨迹 V 已知,子问题 2(P2)就可以表述成如何缓存用户请求的文件,能够满足无人机缓存容量的同时,令缓存内容带来的价值最大,内容价值可以理解为能够节省的用户代价,由此子问题 2 可以等效成 01 背包问题。01 背包问题是指,背包容积有限,有若千的物品具有不同的体积和价值,每个物品只取一次,如何选取物品,能够不超过背包容积的同时,价值最大。这与子问题 2 是一致的,因此将子问题 2 建模成 01 背包问题,将无人机的缓存容量视为背包的体积,文件的大小视为物品的体积,文件的价值视为物品的价值,文件 f 的价值

$$Val_{n,f} = \sum_n a'_f + \omega W_f - a_f \quad (12)$$

式中 $Val_{n,f}$ 为所有请求文件 f 的用户所带来的价值。经过转化和整理,子问题 2 表示为

$$\begin{cases} \text{P2: } \max_c Val_{n,f} \\ \text{s.t. (C1) } \sum_{f \in \mathcal{F}} c_{n,f} W_f \leq S \quad \forall n \in \mathcal{N} \\ \text{(C4) } r_{n,f}, c_{n,f} \in \{0, 1\} \quad \forall n, f \end{cases} \quad (13)$$

背包问题是一种组合优化的 NP-complete 问题,本文采用动态规划来解决。通过状态转移方程(14)建立状态转移表格,并通过回溯的方法,确定缓存结果。

$$dp(i,j) = \max \{ dp(i-1,j), dp(i-1,j - \text{weight}(i)) + \text{value}(i) \} \quad j \geq \text{weight}(i) \quad (14)$$

式中: $dp(i,j)$ 表示表示在前 i 件文件中选择若干件放在承重为 j 的背包中,可以取得的最大价值; $\text{weight}(i)$ 为文件 i 的大小; $\text{value}(i)$ 为文件 i 的价值。具体的算法步骤如算法 2 所示。

算法 2 基于动态规划的缓存策略

输入:成簇数量 M ,无人机轨迹 V ,请求文件列表 r ,文件大小 weight ,文件价值 value ,背包容积 S ;

输出:缓存结果 c ;

- (1) for $i = 1 : \text{size}(r) + 1$ do
- (2) for $j = 1 : S + 1$ do
- (3) 按照式(12)建立状态转移表 dp
- (4) end for

- (5) end for
- (6) Val = $dp(\text{size}(r)+1, C_K+1)$
- (7) for $i = \text{size}(r)+1 : -1 : 2$ do
- (8) 回溯确定每个文件的缓存决策
- (9) end for

2.3 基于遗传算法的轨迹优化

用户成簇后,假定无人机缓存 c 已知,解决由 M 个簇首和一个地面基站 GBS 组成的无人机轨迹问题,子问题 3(P3)可以表示为

$$\begin{cases} \text{P3: } \min_V \frac{1}{N} \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{n \in \mathcal{N}} E_n \\ \text{s.t. (C2) } a_{n,f} \leq l_f \quad \forall n, f \end{cases} \quad (15)$$

由式(5)可知,无人机的飞行时间和悬停时间依赖于无人机的轨迹,所以 P3 可以理解为,求解以 GBS 为起点,遍历簇首,为所有用户提供服务的最短飞行时间,此过程中无人机的飞行速度不变,最短时长问题等同于最短路径问题。如文献[23],倘若可以将某一典型 NP-hard 问题化简成 P3,那么就能够说明 P3 同为 NP-hard 问题。而 P3 的描述与典型的旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP)基本相似。TSP 是在已知城市坐标的前提下,寻取一条路径,这条路径能够让旅行商每个城市访问一次,且路径总长度最短。经过整理和简化,把每个城市映射成具有悬停时间 t^h 和飞行时间 t^{fl} 的簇首,那么 P3 可以基本等同于一个 TSP 问题,所以 P3 也是一个 NP-hard 问题。

NP-hard 问题一般无法用使用求解凸优化问题的方法解决,所以本文采用遗传算法进行求解。遗传算法^[22]具体过程包括如下步骤:

步骤 1 创建 K 条染色体为初始种群,每条染色体代表一个个体,也是无人机的一条可行轨迹。

步骤 2 根据式(6)和式(15)计算染色体 k 的适应度 $\text{fit}(k)$ 。

步骤 3 对初始种群中的个体进行逐代演化,按照一定概率对个体进行选择、交叉和变异,并更新演化后新一代个体的适应度。

步骤 4 不断迭代步骤 3,直至达到最大迭代次数。计算最后一代中各个体的适应度,将适应度最小的作为无人机飞行轨迹。具体的算法步骤如算法 3 所示。

算法 3 基于遗传算法的轨迹优化

输入:无人机缓存 c ,请求文件列表 r , M 个簇首坐标,地面基站 GBS 的坐标,最大演化代数 gen_max 及其他相关参数;

输出:无人机轨迹 V ;

(1) 初始化相关参数,创建 K 条染色体为初始种群,并设置 $\text{gen} = 0$;

(2) 根据式(6,15)计算染色体 k 的适应度 $\text{fit}(k)$;

(3) 由初始种群的适应度,按照比例进行选择、交叉和变异产生下一代, $\text{gen} = \text{gen} + 1$;

(4) if $\text{gen} \leq \text{gen_max}$

(6) 执行步骤 2;

(7) else 迭代终止

(8) end if

(9) 在最终子代中,求得最优轨迹。

3 仿真结果与分析

采用 Matlab 对提出的算法进行仿真,仿真场景如图 1 所示, N 个用户随机分布在以坐标 $(0, 0)$, $(0, 300)$, $(300, 0)$ 以及 $(300, 300)$ 为顶点的矩形区域内,地面基站 GBS 的坐标为 $(0, 0)$,其他相关参数如表 1 所示。

从算法时间复杂度上来看,AP 聚类算法的时间复杂度 $O_{AP}(N^2 \cdot \text{iter_max})$,动态规划算法的时间复杂度 $O_{DP}(N \cdot S)$,遗传算法的时间复杂度 $O_{AG}(K \cdot \text{gen_max})$,按照图 2 所示,本文提出算法的整体复杂度为 $O(K^2 \cdot \text{gen_max}^2)$ 。用户成簇后,由式(5, 12, 15)可知,无人机的飞行轨迹会受到缓存策略的影响,通过算法 3 搜索无人机轨迹时,缓存策略是重要依据,会影响无人机向着减少目标函数值的方向飞行,算法的收敛条件是目标函数值连续 M_l 次不变化或达到最大迭代次数,设定最大迭代次数为 $M_k, M_l < M_k$,其收敛情况如图 3 所示。

图 4 给出了用户请求不同时无人机的飞行轨迹图。无人机按照轨迹飞行,其中起始点 1 为基站,坐标为 $(0, 0)$ 。当用户的分布情况不变时,无人机轨迹会随着用户请求发生变化,通过优化轨迹来降低用户的平均代价。

为了评估本文提出的算法性能,将本文的算法与两种算法进行比较。对比算法 1:无人机缓存按照本文的缓存策略进行优化,轨迹不做优化,无人机按照就近转移的方法飞行。对比算法 2:无人机轨迹按照本文的优化算法进行优化,缓存不优化,按照文件流行度进行缓存。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
用户数目 N	20
文件数目 F	100
基站带宽 B_b/MHz	10
基站发射功率 P_b/dBm	40
功率谱密度 $N_0/(\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-174
基准距离为 1 m 的信道增益 β_0/dB	-60
无人机带宽 B_u/MHz	10
无人机发射功率 P_u/dBm	27
无人机飞行高度 H/m	100
无人机飞行速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	30

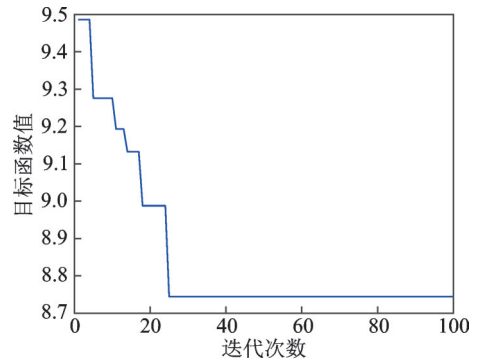


图 3 算法收敛情况

Fig.3 Convergence of the algorithm

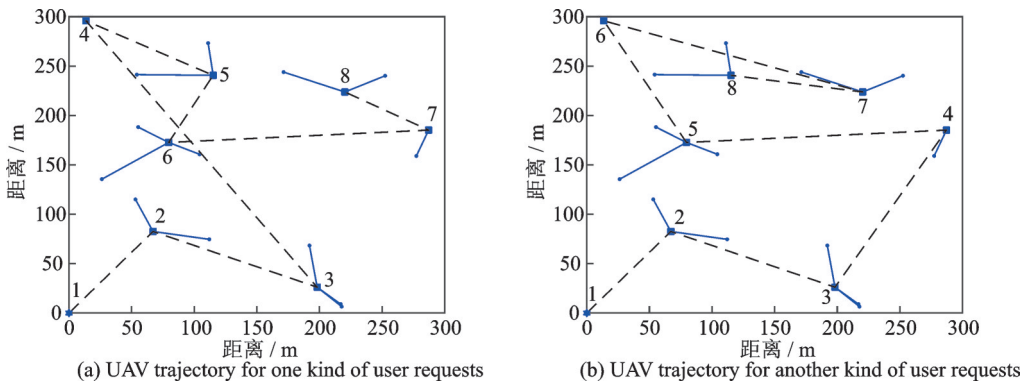


图 4 用户请求不同时无人机的飞行轨迹

Fig.4 Flight trajectory of the UAV when user requests are different

图 5 给出了用户平均代价与区域内用户数目之间的关系。当用户数目增加时,3 种算法用户平均代价都会随之增加。对于本文而言,用户数目增加,一方面,意味着同一簇内用户的数量也会增多,无人

机向用户传输文件时每个用户分到的通信带宽会减少,传输相同大小的文件花费的时间会增加,也就意味着无人机在每个簇首上方悬停的时间会增加,因此用户获得请求内容的代价增加,信息新鲜度降低。另一方面,由于无人机的缓存空间有限,当用户数量增加时,请求内容未被缓存的用户数量也会增加,会有更多的用户请求需要无人机从基站处获得后再传输给用户,从式(6)中可以得知,虽然这种获取请求内容的途径可以降低内容本身的信息年龄,但是用户获取该请求内容的代价会被增加,因此用户的平均代价会呈上升趋势。

图6是不同飞行速度 v 下,用户平均代价随着用户数目增加时的变化情况。从图中可以看出,用户数目相同时,随着无人机飞行速度的增加,平均代价会减少。这是因为,其他参数不变时,当无人机的飞行速度越大,无人机在悬停点之间转移花费的飞行时间越小,由式(5)可知,越小的飞行时间有利于保持无人机中缓存内容的新鲜程度,从而减少用户的平均代价。

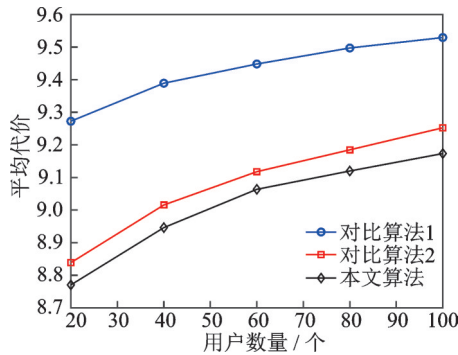


图5 本文算法与对比算法下用户平均代价随用户数量的变化

Fig.5 Variation of average user cost with the number of users under the proposed algorithm and the comparison algorithms

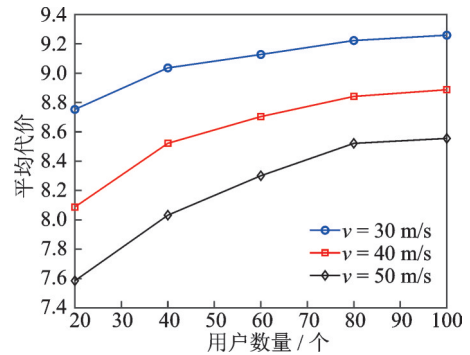


图6 不同飞行速度下用户平均代价随用户数量的变化

Fig.6 Variation of average user cost with the number of users at different flight speeds

图7是不同缓存空间 S 下,用户平均代价随着用户数目增加时的变化情况。图8是不同偏好因子 α 下,用户平均代价随用户数目增加时变化情况。从图7中可以看出,用户数目相同时,随着无人机缓存

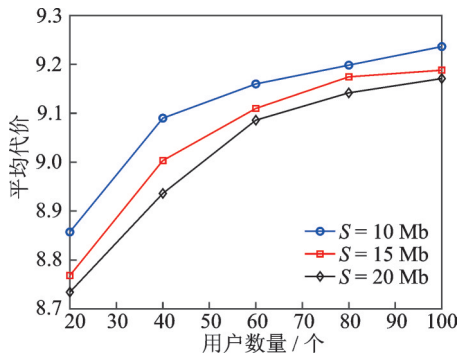


图7 不同缓存空间下用户平均代价随用户数量的变化

Fig.7 Variation of average user cost with the number of users for different cache spaces

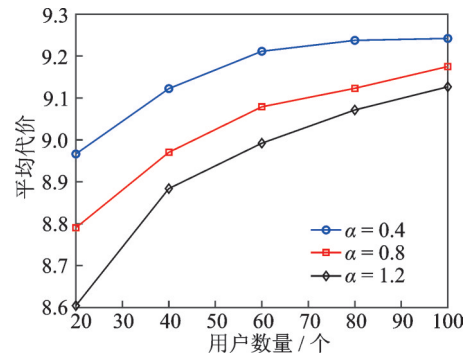


图8 不同下偏好因子下用户平均代价随用户数量的变化

Fig.8 Variation of average user cost with the number of users for different lower preference factors

空间的增加,平均代价会减少。这是因为,其他参数不变时,当无人机的缓存空间越大,可缓存的用户请求内容就越多,能够有效减少从基站处获取用户请求内容的数量,所以用户的平均代价会随之下降。从图8中可以看出,用户数目相同时,随着偏好因子的增加,平均代价会减少。这是因为,其他参数不变时,由式(1)可知,偏好因子越大,文件的流行度越集中,也就意味着用户的请求越集中,对于无人机的缓存来说,缓存的内容可以提供给更多的用户,减少从基站获取请求内容,所以用户的平均代价会随之下降。

4 结束语

本文在具有无人机辅助的内容分发网络中,提出了一个基于用户请求内容新鲜度的问题,通过优化用户成簇,无人机缓存策略和飞行轨迹,最小化所有用户的平均代价。提出了一个有效的优化算法,应用AP聚类算法,优化用户成簇,为无人机选定合适的悬停位置,并通过动态规划和遗传算法优化无人机的缓存和飞行轨迹,最大程度上保障用户请求内容的新鲜度,分析仿真结果可以发现本文提出的算法能够有效减小用户平均代价,提高信息新鲜度。未来可以加入无人机能耗以及用户移动性的研究,无人机为用户提供服务时,可以考虑能耗和移动性对用户请求内容新鲜度的影响,使场景更加具体和细化。

参考文献:

- [1] 董超, 经宇骞, 屈毓铤, 等. 面向低空智联网频谱认知与决策的云边端融合体系架构[J]. 通信学报, 2023, 44 (11): 1-12.
DONG Chao, JING Yuqian, QU Yuben, et al. Cloud-edge-device fusion architecture oriented to spectrum cognition and decision in low altitude intelligence network[J]. Journal of Communications, 2023, 44 (11): 1-12.
- [2] TRAN D H, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Satellite- and cache-assisted UAV: A joint cache placement, resource allocation, and trajectory optimization for 6G aerial networks[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2022, 3: 40-54.
- [3] ZHANG T, WANG Y, LIU Y, et al. Cache-enabling UAV communications: Network deployment and resource allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7470-7483.
- [4] WANG E, DONG Q, LI Y, et al. Content placement considering the temporal and spatial attributes of content popularity in cache-enabled UAV networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(2): 250-253.
- [5] WU H, LYU F, ZHOU C, et al. Optimal UAV Caching and trajectory in aerial-assisted vehicular networks: A learning-based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(12): 2783-2797.
- [6] CHEN Y J, LIAO K M, KU M L, et al. Mobility-aware probabilistic caching in UAV-assisted wireless D2D networks[C]// Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [7] ASHERALIEVA A, NIYATO D. Game theory and Lyapunov optimization for cloud-based content delivery networks with device-to-device and UAV-enabled caching[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10094-10110.
- [8] LUO J, SONG J, ZHENG F C, et al. User-centric UAV deployment and content placement in cache-enabled multi-UAV networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 5656-5660.
- [9] 王心一, 陈志江, 雷磊, 等. 多无人机网络边缘智能计算卸载算法[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(6): 1286-1298.
WANG Xinyi, CHEN Zhijiang, LEI Lei, et al. Computation offloading algorithm for multi-UAV network based on edge intelligence[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2023, 38(6): 1286-1298.
- [10] CHAI S, LAU V K N. Multi-UAV trajectory and power optimization for cached UAV wireless networks with energy and content recharging-demand driven deep learning approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39 (10): 3208-3224.
- [11] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: How often should one update? [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 2731-2735.
- [12] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. The age of information in a discrete time queue: Stationary distribution and non-linear age mean analysis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(5): 1352-1364.

- [13] SORET B, RAVIKANTI S, POPOVSKI P. Latency and timeliness in multi-hop satellite networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Dublin, Ireland: IEEE, 2020: 1-6.
- [14] LIU Z, JI B. Towards the tradeoff between service performance and information freshness[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications. Shanghai, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [15] AHANI G, YUAN D, SUN S. Optimal scheduling of age-centric caching: Tractability and computation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(8): 2939-2954.
- [16] YANG L, ZHENG F C, JIN S. Edge caching with real-time guarantees[C]//Proceedings of the 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). USA: IEEE, 2022: 1-6.
- [17] ZHU J, LI R, ZHAO Z, et al. AoI-based temporal attention graph neural network for popularity prediction and content caching [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(2): 345-358.
- [18] XIE M, YANG L. An architecture for AoI and cache hybrid multicast/unicast/D2D with cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Access, 2023, 11: 43080-43088.
- [19] LYU J, ZENG Y, ZHANG R. UAV-aided offloading for cellular hotspot[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 3988-4001.
- [20] KALANTARI E, YANIKOMEROGLU H, YONGACOGU A. Wireless networks with cache-enabled and backhaul-limited aerial base stations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7363-7376.
- [21] ZHANG T, WANG Y, YI W, et al. Joint optimization of caching placement and trajectory for UAV-D2D networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(8): 5514-5527.
- [22] LIU J, TONG P, WANG X, et al. UAV-aided data collection for information freshness in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(4): 2368-2382.
- [23] NGUYEN N T, LIU B H. The mobile sensor deployment problem and the target coverage problem in mobile wireless sensor networks are NP-hard[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1312-1315.

作者简介:



周晓雅(1998-),女,硕士研究生,研究方向:移动边缘缓存、内容推荐,E-mail: 1021010227@njupt.edu.cn。



朱琦(1965-),通信作者,女,教授,博士生导师,研究方向:移动通信与无线技术,E-mail:zhuqi@njupt.edu.cn。

(编辑:张黄群)