

# 基于无人机辅助的认知无线网络信息年龄研究

曹胜男<sup>1</sup> 贾向东<sup>1,2</sup> 郭艺轩<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学计算机科学与工程学院, 甘肃兰州 730070;  
2. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏南京 210003)

**摘要:** 考虑到信息时效性和数据新鲜度对各类实时状态更新系统带来的挑战,提出了一种无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)中继辅助的认知无线网络(Cognitive Radio Network, CRN)信息年龄(Age of Information, AoI)最小化方案。为了降低CRN中次用户接收机处的AoI,在不影响主用户正常通信的前提下,利用UAV作为移动中继来辅助次用户发射机将数据包传输到对应的接收机。通过联合优化UAV的飞行轨迹和资源分配来确保信息新鲜度。由于联合设计问题是非凸的,故采用连续凸逼近的高效迭代算法得出问题的最优解。仿真结果表明,所提方案可以有效提高信息新鲜度,并获得峰值AoI的最小值。同时,数据包的大小和数量与AoI呈线性关系,对UAV的飞行轨迹也有影响。

**关键词:** 认知无线网络; 无人机; 信息年龄; 连续凸逼近; 联合优化

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.04.021

**引用格式:** 曹胜男,贾向东,郭艺轩. 基于无人机辅助的认知无线网络信息年龄研究[J]. 信号处理, 2022, 38(4): 863-869. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.04.021.

**Reference format:** CAO Shengnan, JIA Xiangdong, GUO Yixuan. Research on age of information in UAV-assisted cognitive radio networks[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(4): 863-869. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.04.021.

## Research on Age of Information in UAV-assisted Cognitive Radio Networks

CAO Shengnan<sup>1</sup> JIA Xiangdong<sup>1,2</sup> GUO Yixuan<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** Considering the challenges of information timeliness and data freshness to various real-time status update systems, an unmanned aerial vehicle (UAV) relay-assisted cognitive radio network (CRN) age of information (AoI) minimization scheme is proposed. To reduce the AoI at the secondary user receiver in CRN, UAV is used as mobile relay to assist the secondary user transmitter to transmit data packets to the corresponding receiver without affecting the normal communication of the primary user. The flight trajectory and resource allocation of UAV are jointly optimized to ensure the freshness of information. Since the joint design problem is nonconvex, an efficient iterative algorithm of successive convex approximation is used to obtain the optimal solution of the problem. Simulation results show that the proposed scheme can effectively improve the information freshness and obtain the minimum value of peak AoI. Meanwhile, the size and number of packets are linearly related to AoI and have an impact on the flight trajectory of UAV.

**Key words:** cognitive radio network; unmanned aerial vehicle; age of information; successive convex approximation; joint optimization

## 1 引言

近年来,随着物联网的快速发展,大量自动化设备需要被提供超可靠低延迟的通信,然而物联网应用设备的迅猛增长使频谱资源变得十分稀缺,无线网络面临着频谱资源短缺的挑战<sup>[1]</sup>。认知无线网络(Cognitive Radio Network, CRN)被认为是实现频谱效率更高的通信网络,CRN利用主通信网络授权的频谱进行能量和信息的传输,提升了现有无线通信网络频谱利用效率<sup>[2]</sup>。此外,能量受限的物联网设备可能导致数据包的丢失,从而影响信息的及时传递,这对于距离较远或是没有直连链路的物联网设备通信带来了挑战。此时需要设计新的网络体系结构,来有效地利用网络设备有限的能量,达到状态更新的及时交付<sup>[3]</sup>。由于无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)灵活易部署,通常可以保证视距(Line of Sight, LoS)链路,被认为是一个最具潜力的候选无线服务提供商,同时UAV辅助的无线中继网络也极具发展前景<sup>[4]</sup>。随着5G/6G网络对数据时延和新鲜度的极高要求,学术界和工业界广泛认为利用UAV辅助信息更新系统可以大幅度减小数据的陈旧程度<sup>[5]</sup>。UAV网络等新型无线网络应用可以在短时间内进行状态更新和频繁的信息交互。

作为衡量系统性能指标的吞吐量和时延并不能有效地测量信息新鲜度。近年来引入信息年龄(Age of Information, AoI)作为新的性能指标来量化状态更新的新鲜度<sup>[6-7]</sup>。AoI用于测量数据到达目的节点时的新鲜度,从目的节点的角度观测接收信息的时效性。文献[8]在AoI的初步研究中考虑流量突发问题,并从排队论的角度最小化了不同服务策略下的AoI。文献[9]和文献[10]分别介绍了先到先服务(First Come and First Served, FCFS)和后到先服务(Last Come and First Served, LCFS)队列的排队理论,并分析了其AoI特征。文献[11]研究了UAV辅助无线传感器网络中最优信息年龄的问题,其中UAV从地面传感器节点收集数据。文献[12]研究了以最小化峰值AoI为目标的零等待策略的最优性。文献[13]研究了在CRN中主用户的AoI和次用户的吞吐量问题。文献[14]研究了CRN能量收集通信中的平均AoI最小化问题,但没有考虑UAV通信。文献[15]研究了基于AoI的马尔可夫决策过程来构

建状态的更新策略方案。文献[16]研究了低密度奇偶校验编码状态更新系统的平均AoI和能量消耗。

目前大多数研究主要集中在能量采集、复杂的网络结构和传统的性能指标上<sup>[17]</sup>,而信息的新鲜度和数据传输的及时性对于无线通信也至关重要。此外,频谱资源短缺是一个亟待解决的现实问题,结合UAV辅助CRN的AoI研究相对较少。因此本文考虑了UAV辅助中继网络来研究CRN下的峰值AoI。通过联合优化UAV的飞行轨迹、能量和服务时间分配来最小化峰值AoI。为了求解这一非凸问题,采用了一种有效的迭代算法,并得到了该算法下的近似最优解。

## 2 系统模型

为了实现及时的信息交付和高效的频谱利用,本文考虑了一种基于UAV辅助解码转发(Decode and Forward, DF)中继的CRN中AoI最小化问题。如图1所示,该系统包括一个次用户发射机(Secondary Transmitter, ST)、一个次用户接收机(Secondary Receiver, SR)、一个DF中继器(DF Relay, R)、一个主用户发射机(Primary Transmitter, PT)和一个主用户接收机(Primary Receiver, PR)。系统在半双工模式下运行,除R外所有节点均配备一个天线。本文假设在Underlay模式下工作,若PT所受的干扰小于给定的阈值范围,则次用户(Secondary User, SU)可与主用户(Primary User, PU)进行数据的并发传输,其中PT始终保持通信工作状态,可在授权频谱中为PR服务,并在给定的干扰功率约束下与SU共享频谱资源。假设所有的地面节点的位置是固定已知的,在从系统中,SU源与目的节点之间的直接链路是弱的,为了数据传输的可靠性,利用UAV辅助ST向SR发送数据包,UAV作为移动中继采用时分双

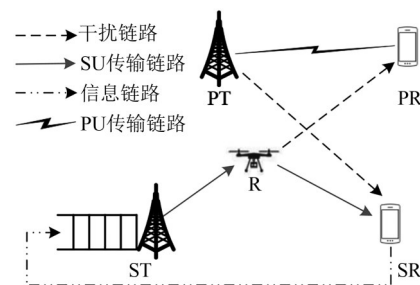


图1 系统模型

Fig. 1 System model

工 (Time Division Duplexing, TDD) 模式进行上下行链路传输。假设采用实时传输策略, 即在 SU 目的节点接收到数据包之后, SU 源节点会立即接收到来自对应目的节点的 ACK/NACK 信令。此时, SU 源节点将再生成一个新数据包并开始其服务时间。

本文使用 AoI 来度量 SU 目的节点的信息新鲜度。在  $t$  时刻的 AoI 定义为随机过程:

$$a(t) = t - u(t) \quad (1)$$

其中  $t$  指当前时间,  $u(t)$  为 SU 目的节点最近接收到的源节点产生的数据包时间。

如图 2 所示,  $t = 0$  时刻, 队列是空的, 此时目的节点的 AoI 为  $a(0) = 0$ ,  $T_n$  为第  $n$  个数据包的服务时间, 用于上行链路和下行链路的传输时间,  $N$  表示 UAV 从源节点传输到目的节点的数据包总数。则第  $n$  个数据包到达目的节点的时间为  $t_n = \sum_{j=1}^n T_j, n \in \{1, \dots, N\}$ 。  $t_n$  时刻的峰值 AoI 表示为:

$$a_n = T_n + T_{n+1}, n \in \{1, \dots, N-1\} \quad (2)$$

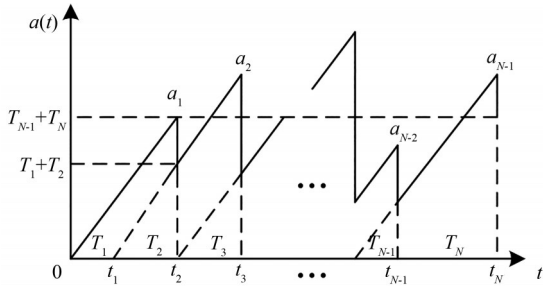


图 2  $N$  个数据包的 AoI 的演化  
Fig. 2 AoI evolution for  $N$  packets

由于 UAV 中继采用 TDD 模式, 因此服务时间  $T_n$  包括上行传输服务时间  $T_{n,u}$  和下行传输服务时间  $T_{n,d}$ 。此外,  $q(t) \in \mathbb{R}^2$  为 UAV 在  $t, t \in [0, t_N]$  时的飞行轨迹, 对于第  $n$  个数据包,  $q_{n,u}$  表示从 ST 到 UAV 的上行链路传输的路径点,  $q_{n,d}$  表示 UAV 到 SR 的下行链路传输的路径点。将 UAV 从初始位置  $q_0$  到终止位置  $q_F$  的飞行轨迹进行离散, 近似为路径点序列  $\mathbf{Q} = \{q_0, q_{1,u}, q_{1,d}, \dots, q_{N,u}, q_{N,d}, q_F\}$ , 同时 UAV 满足以下移动性限制:

$$\begin{aligned} \|q_{n,d} - q_{n,u}\| &\leq (T_{n,u} + T_{n,d})V_{\max}, n=1, \dots, N \\ \|q_{n+1,u} - q_{n,d}\| &\leq (T_{n+1,u} + T_{n,d})V_{\max}, n=1, \dots, N-1 \\ \|q_{1,u} - q_0\| &\leq T_{1,u}V_{\max}, \|q_{N,d} - q_F\| \leq T_{N,d}V_{\max} \\ q_{1,u} &= q_0, q_{N,d} = q_F \end{aligned} \quad (3)$$

考虑到在带有一个 PU 传输对和一个 SU 传输对的网络模型有以下几种情况: (1) PT-PR 的 PU 数据传输链路; (2) ST-SR 的 SU 数据传输链路; (3) UAV-PR、PT-SR 的干扰链路。假设 UAV 与地面节点之间空对地信道为 LoS 链路通信。本文所有的地面节点 (ST、SR、PT 和 PR) 的位置信息都是先验的, 分别为  $q_s, q_d, q_b, q_p$ 。 UAV 与地面用户之间的距离表示为  $d_{rk}(t) = \sqrt{\|q(t) - q_k\|^2 + H^2}, k \in \{s, d, p\}$ , 信道功率增益为  $h_{rk}(t) = \rho_0 d_{rk}^{-2}(t)$ ,  $\rho_0$  是参考距离为  $d = 1$  m 时的信道功率增益。假设地面信道链路为独立的 Rayleigh 衰落, 则 PT 到 SR 的干扰链路的信道功率增益为  $g_{bd}(t) = \rho_0 d_{bd}^{-\varphi}(t)\psi$ , 其中  $\varphi$  表示路径损耗指数,  $\psi$  是指数分布的单位均值随机变量。

根据香农公式, 可以得到上行链路和下行链路的可达率, 分别如下式所示:

$$R_u(t) = B \log_2 \left( 1 + \frac{p_u(t)h_{rk}(t)}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

$$R_d(t) = B \log_2 \left( 1 + \frac{p_d(t)h_{rk}(t)}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

其中  $B$  是传输带宽,  $\sigma^2$  是所有接收机的加性高斯白噪声功率,  $p_u(t)$  和  $p_d(t)$  分别是 ST 和 UAV 的发射功率。

### 3 AoI 分析

本文的目标是最小化 CRN 的峰值 AoI, 通过联合优化 UAV 的服务时间  $T_n$ 、功率分配  $p = \{p_{n,u}, p_{n,d}\}$  和飞行轨迹  $q = \{q_{n,u}, q_{n,d}\}$ , 使 CRN 系统  $N$  个数据包的峰值 AoI 最小, 需要满足 PU 的平均干扰功率约束、UAV 的移动性约束、各源节点与 UAV 的总可用能量约束。将优化问题表述为:

$$P1 \min_{p, q, T} \max_{n=1, \dots, N-1} (T_n + T_{n+1}) \quad (6)$$

$$\text{s.t. (3)}, \quad (7)$$

$$R_u(t) \geq S_n, R_d(t) \geq S_n \quad (8)$$

$$p_{n,m} \geq 0, \sum_{n=1}^N p_{n,m} T_{n,m} \leq E_m, m \in \{u, d\} \quad (9)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n \in N} \left( \mathbb{E} \{ p_{n,d} h_{rp}(t) \} + p_{n,b} g_{bp}(t) \right) \leq \varepsilon \quad (10)$$

其中  $S_n$  为第  $n$  个数据包的大小,  $E_u$  和  $E_d$  分别为 ST 和 UAV 发送更新包的总可用能量。由于 P1 是关于  $p, q$  和  $T$  的非凸性目标函数, 因此 P1 仍难以解决。为了简化问题, 应用 Jensen 不等式, 得到一个可达的式(4)和式(5)的上界, 然后近似代替。

$$R_u(t) = B \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 p_u(t)}{d_{rk}^2(t)} \right) \text{ 为上行链路的可达$$

率, 其中  $\gamma_0 \triangleq \frac{\rho_0}{\sigma^2}$ , 为了得到一个闭式表达式, 进一步用  $t_{n-1} + \frac{1}{2} T_{n,u}$  的瞬时速率近似  $R_{n,u}$ :

$$R_{n,u} \approx BT_{n,u} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 p_u(t)}{d_{rk}^2(t)} \right) \Bigg|_{t=t_{n-1} + \frac{1}{2} T_{n,u}} = BT_{n,u} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 p_{n,u}}{\|q_{n,u} - q_s\|^2 + H^2} \right) \quad (11)$$

其中  $p_{n,u}$  表示 ST 在  $t_{n-1} + \frac{1}{2} T_{n,u}$  时刻的传输功率, 那么同理下行链路的可达率  $R_{n,d}$  可以近似为:

$$R_{n,d} \approx BT_{n,d} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 p_d(t) d_{rk}^{-2}(t)}{\gamma_0 p_b(t) d_{bd}^{-\varphi}(t) + 1} \right) \Bigg|_{t=t_{n-1} + T_{n,u} + \frac{1}{2} T_{n,d}} = BT_{n,d} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 p_{n,d}}{\left( \|q_{n,d} - q_d\|^2 + H^2 \right) \left( \gamma_0 p_{n,b} d_{bd}^{-\varphi}(t) + 1 \right)} \right) \quad (12)$$

其中  $p_{n,d}$  表示 UAV 在  $t_{n-1} + T_{n,u} + \frac{1}{2} T_{n,d}$  时刻的传输功率,  $p_{n,b}$  为 PT 的发射功率。

#### 4 联合优化方案

这一节中, 提出了一个基于较低复杂度的迭代算法, 即连续凸逼近的求解算法来解决问题 P1, 引入一个松弛变量  $E$  来代替式(8)中的  $p$ , 对于每一个数据包, 都有  $E \triangleq pT$ , 那么问题 P1 可以等价的表示为下式:

$$P2 \quad \min_{E, q, T} \max_{n=1, \dots, N-1} (T_n + T_{n+1}) \quad (13)$$

$$T_{n,u} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 E_{n,u}}{T_{n,u} \left( \|q_{n,u} - q_s\|^2 + H^2 \right)} \right) \geq S'_n \quad (14)$$

$$T_{n,d} \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0 E_{n,d}}{T_{n,d} \left( \|q_{n,d} - q_d\|^2 + H^2 \right)} \times \frac{1}{\left( \gamma_0 p_{n,b} d_{bd}^{-\varphi}(t) + 1 \right)} \right) \geq S'_n \quad (15)$$

$$E_{n,m} \geq 0, \sum_{n=1}^N E_{n,m} \leq E_m, m \in \{u, d\} \quad (16)$$

由于可用能量有限等因素限制, 可能造成联合设计方案不可行。因此我们对所提方案进行可行性检查, 可行性检查可用于快速决定是否接收或丢弃数据包以最小化峰值 AoI。要使问题 P2 可行, 需要同时满足轨迹约束、能量分配约束和服务时间约束条件。

为了使问题更容易解决, 引入新变量  $T_{\max}$  来表示目标函数。因此 P2 可重写为:

$$P3 \quad \min_{E, q, T_{\max}, T} T_{\max} \quad (17)$$

$$\text{s.t. } T_n + T_{n+1} \leq T_{\max} \quad \forall n = 1, \dots, N-1 \quad (18)$$

$$(3), (14), (15), (16) \quad (19)$$

解决问题 P3 主要处理式(14)、式(15)的优化变量  $E, T, q$  之间的耦合。故引入一对新的松弛变量  $\{x_{n,u}, x_{n,d}\}$  来等价的替换非凸约束条件(14)和(15):

$$T_{n,u} \log_2 \left( 1 + \frac{x_{n,u}}{T_{n,u}} \right) \geq S'_n \quad (20)$$

$$\frac{\left( \|q_{n,u} - q_s\|^2 + H^2 \right)}{\gamma_0 E_{n,u}} \leq \frac{1}{x_{n,u}} \quad (21)$$

$$\frac{\left( \|q_{n,d} - q_d\|^2 + H^2 \right) \left( \gamma_0 p_{n,b} d_{bd}^{-\varphi}(t) + 1 \right)}{\gamma_0 E_{n,d}} \leq \frac{1}{x_{n,d}} \quad (22)$$

显然, 式(20)是一个凸约束条件, 式(21)为典型的凸差形式。因此, 采用了连续凸逼近的迭代算法来解决这一形式。可以用局部紧但全局下界来近似凸函数  $\frac{1}{x_{n,u}}, \frac{1}{x_{n,d}}$ 。在点  $x'_{n,m} \in \mathbb{R}^+, m \in \{u, d\}$  附近的一阶泰勒近似:

$$\frac{1}{x_{n,m}} \geq \frac{2}{x'_{n,m}} - \frac{x_{n,m}}{x'^2_{n,m}} \quad (23)$$

将式(23)代入式(21)、(22)中, 得到以下不等式:

$$\frac{\left( \|q_{n,u} - q_s\|^2 + H^2 \right)}{\gamma_0 E_{n,u}} \leq \frac{2}{x'_{n,u}} - \frac{x_{n,u}}{x'^2_{n,u}} \quad (24)$$

$$\frac{\left(\|q_{n,d} - q_d\|^2 + H^2\right)\left(\gamma_0 P_{n,b} d_{bd}^{-\varphi}(t) + 1\right)}{\gamma_0 E_{n,d}} \leq \frac{2}{x'_{n,d}} - \frac{x_{n,d}}{x'_{n,d}{}^2} \quad (25)$$

综上,可以得到凸规划问题 P4:

$$P4 \quad \min_{E, q, T_{\max}, T} T_{\max} \quad (26)$$

$$\text{s.t. } T_{n,u} + T_{n,d} + T_{(n+1),u} + T_{(n+1),d} \leq T_{\max} \quad (27)$$

$$(3), (14), (15), (16), (24), (25) \quad (28)$$

本文基于一个较低计算复杂度的高效迭代的连续凸逼近算法,虽然该算法不是最优的,但是一种更容易解决问题的方式,至少能得到局部最优解。当算法满足条件  $\frac{|T_{\max}^i - T_{\max}^{i-1}|}{T_{\max}^{i-1}} \leq \varepsilon, \varepsilon = 10^{-3}$  时停止迭代。

### 5 仿真及数值结果分析

本节将用数值结果来验证所提问题的可行性和有效性。地面节点的三维坐标分别为 PT(0, 500, 0), PR(1000, 500, 0), ST(-1000, 1000, 0), SR(1000, 1000, 0)。UAV 以飞行高度  $H = 100$  m 和最大速度  $V_{\max} = 30$  m/s 从  $q_0(-1000, 0, 100)$  单向飞行到  $q_r(1000, 0, 100)$ 。其他参数在表 1 的描述中给出。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	取值
数据包个数 $N$ /个	10~100
数据包大小 $S$ /Mbits	1
ST 总能效 $E_u$ /Joule	1
UAV 总能效 $E_d$ /Joule	1
路径损耗指数 $\varphi$	3
信道功率增益 $\rho_0$ /dB	10
噪声功率 $\sigma^2$ /dBm	-100
系统带宽 $B$ /MHz	1

如图 3 所示,描述了  $N = 10$  时能量和数据包大小对于峰值 AoI 的影响。峰值 AoI 随着能量的增大而减小,即能量  $E$  越大,峰值 AoI 越小。同样,当数据包为 1 Mbits 时,比在 2 Mbits 的峰值 AoI 小。在能量  $E$  取中间值 0.5 J 时,两不同的数据包大小之间峰值 AoI 时隙为 40 s 左右,而在能量  $E = 0.1$  J 和  $E = 1.0$  J 时峰值 AoI 时隙明显缩小很多。这是因为峰值 AoI 主要影响因素还有 UAV 的飞行轨迹。

如图 4 所示,是能量  $E$  对于 UAV 飞行轨迹的影

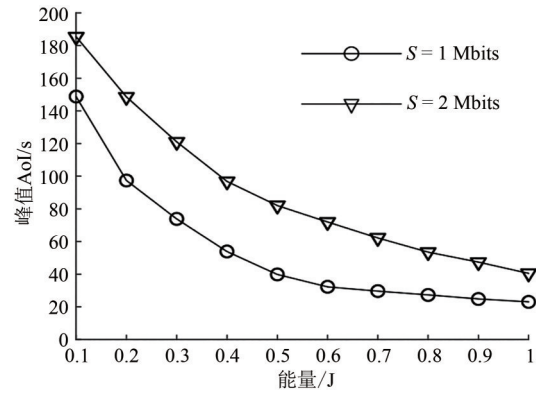


图 3 不同能量和数据包大小对峰值 AoI 的影响

Fig. 3 Influence of energy and packet size on peak AoI

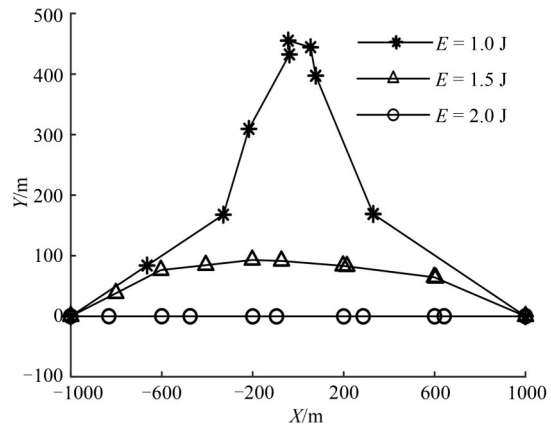


图 4 能量对 UAV 飞行轨迹的影响

Fig. 4 Influence of energy on UAV flight trajectory

响。当  $E = 1.0$  J 时,UAV 飞行倾向于悬停在地面节点上方;当  $E = 1.5$  J,UAV 就可以相较于地面节点更远的地方传输信息;当  $E = 2.0$  J 时,UAV 就会以最大飞行速度从初始位置直线飞到最终位置,来提升 SU 之间的高效通信质量并获得较小峰值 AoI。

如图 5 所示,比较了三种不同服务时间状态下的峰值 AoI,分别是在每个服务时间  $T_n$  的开始、中间和结束时刻的峰值 AoI。开始和中间时刻两曲线很接近,几近重合,虽然服务时间结束时刻的峰值 AoI 曲线较远,但在能量  $E = 0.4$  J 后,三种情况的峰值 AoI 曲线近似拟合。故不同的近似方案也会对峰值 AoI 结果产生影响,但随着能量的增大,峰值 AoI 值基本相等。

如图 6 所示,描述了  $E = 1$  J,  $S = 1$  Mbits、 $E = 1$  J,  $S = 2$  Mbits 和  $E = 2$  J,  $S = 1$  Mbits 不同情况下的  $N = 10 \sim 100$  个数据包特征对峰值 AoI 影响。与

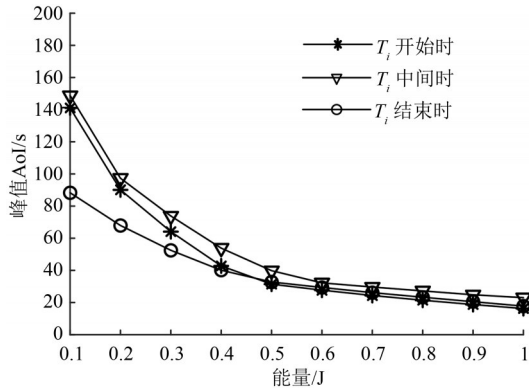


图5 不同服务时间的峰值AoI

Fig. 5 Peak AoI of different service time

我们设想一致,数据包  $S$  减小和能量  $E$  增加,峰值AoI 的值将减小。通过三个方案的对比,当  $E$  值相同  $S$  不同时,显然  $S$  越小,峰值AoI 越小。同理,当  $S$  相同  $E$  不同时, $E$  越大,峰值AoI 越小。即数据包特征与峰值AoI 值成反比。

如图7所示,比较了数据包  $N = 10$  时,所提联合优化方案与UAV 直线轨迹的峰值AoI。联合优化

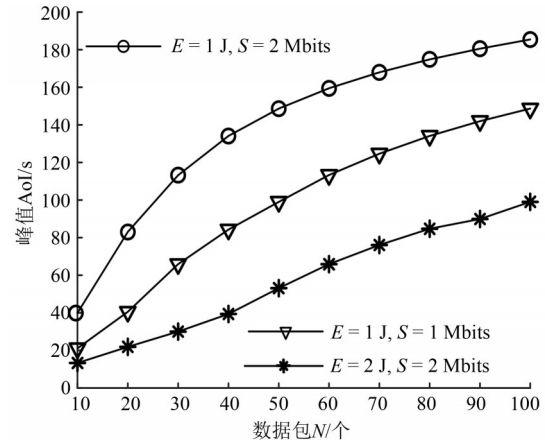


图6  $N$  个数据包的峰值AoI

Fig. 6 Peak AoI of  $N$  packets

方案明显优于直线轨迹,特别是源节点的可用能量较小(7a)或数据包较大(7b)时,相应的峰值AoI 也较大。其中当  $E = 1.0$  J 和  $S = 2$  Mbits 时,所提优化方案比直线轨迹峰值AoI 分别降低了大约58%和12.5%。同时图(7a)和图(7b)的曲线趋势也验证了图3、图4的仿真结论。

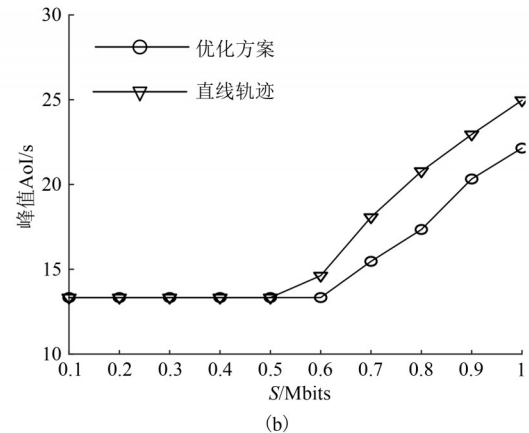
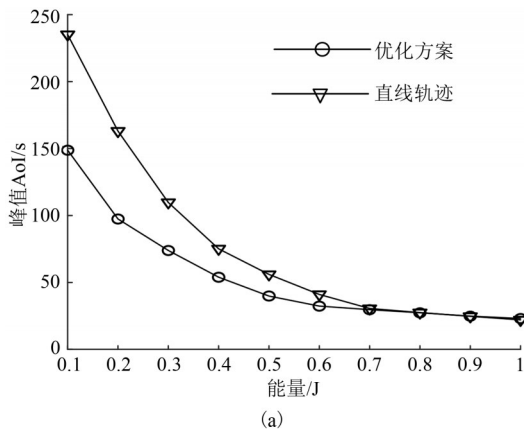


图7 与其他方案的峰值AoI比较

Fig. 7 Comparison with other scheme on the peak AoI

## 6 结论

本文考虑了一个主用户存在的情况下,次用户通过UAV 辅助中继来收集数据并将数据包传输到相应的次用户终端的问题,提出了一个联合优化方案来优化UAV 的飞行轨迹以及数据传输的能量和服务时间分配。该方案的目标是在满足主接收机平均干扰功率约束的同时,最小化从系统的峰值AoI。由于设计问题是非凸的,通过使用一种较低

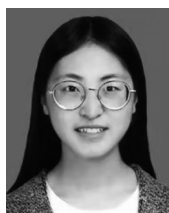
复杂度的连续凸逼近的迭代算法,在满足可行性条件的同时,得到局部最优解。数值结果证明了该算法的有效性。这项研究工作还可以扩展到传感器网络、随机混合模型中。

## 参考文献

[1] JIA Xiangdong, YANG Longxiang, ZHU Hongbo. Cognitive opportunistic relaying systems with mobile nodes: Average outage rates and outage durations [J]. IET Communications,

- 2014, 8(6): 789-799.
- [2] PARK S, KIM H, HONG D. Cognitive radio networks with energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(3): 1386-1397.
- [3] ABD-ELMAGID M A, DHILLON H S. Average peak age-of-information minimization in UAV-assisted IoT networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 2003-2008.
- [4] ZENG Yong, ZHANG Rui, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 4983-4996.
- [5] 熊轲, 胡慧敏, 艾渤, 等. 6G时代信息新鲜度优先的无线网络设计[J]. *物联网学报*, 2020, 4(1): 80-91.  
XIONG Ke, HU Huimin, AI Bo, et al. Information freshness orientated wireless network design for 6G[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(1): 80-91.(in Chinese)
- [6] KOSTA A, PAPPAS N, ANGELAKIS V. Age of information: A new concept, metric, and tool [J]. *Foundations and Trends® in Networking*, 2017, 12(3): 162-259.
- [7] CHEN Kun, HUANG Longbo. Age-of-information in the presence of error [C]//2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Barcelona, Spain. IEEE, 2016: 2579-2583.
- [8] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: How often should one update? [C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Orlando, FL, USA. IEEE, 2012: 2731-2735.
- [9] INOUE Y, MASUYAMA H, TAKINE T, et al. The stationary distribution of the age of information in FCFS single-server queues [C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Aachen, Germany. IEEE, 2017: 571-575.
- [10] KAUL S K, YATES R D, GRUTESER M. Status updates through queues [C]//2012 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Princeton, NJ, USA. IEEE, 2012: 1-6.
- [11] LIU Juan, WANG Xijun, BAI Bo, et al. Age-optimal trajectory planning for UAV-assisted data collection [C]// IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Honolulu, HI, USA. IEEE, 2018: 553-558.
- [12] BARAKAT B, KEATES S, WASELLI, et al. Is the zero-wait policy always optimum for information freshness (peak age) or throughput? [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(6): 987-990.
- [13] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. Age of information and throughput in a shared access network with heterogeneous traffic [C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2018: 1-6.
- [14] LENG Shiyang, YENER A. Age of information minimization for an energy harvesting cognitive radio [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(2): 427-439.
- [15] 赵悦超, 杨涛, 胡波. 无线传感器网络中基于信息年龄的状态更新策略 [J]. *微电子学与计算机*, 2020, 37(11): 29-34.  
ZHAO Yuechao, YANG Tao, HU Bo. A status updating policy based on age of information in wireless sensor network [J]. *Microelectronics & Computer*, 2020, 37(11): 29-34.
- [16] XIE Mangang, WANG Qianfan, GONG Jie, et al. Age and energy analysis for LDPC coded status update with and without ARQ [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10388-10400.
- [17] KRIKIDIS I. Average age of information in wireless powered sensor networks [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 628-631.

#### 作者简介



**曹胜男** 女, 1996年生, 甘肃定西人。西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生。研究方向为无人机通信、认知无线网络、信息年龄等。  
E-mail: 1625657505@qq.com



**贾向东** 男, 1971年生, 甘肃渭源人。西北师范大学计算机科学与工程学院教授, 南京邮电大学博士、博士后。研究方向为移动与无线通信关键理论与技术。  
E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn



**郭艺轩** 男, 1996年生, 山西临汾人。西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生。研究方向为无人机通信、无人机网络建模与分析、异构网络技术等。  
E-mail: 458234505@qq.com