

# 强化学习无人机通信系统中的信息年龄优化



李新民\*, 尹宝林, 魏李莉, 张晓强

(西南科技大学信息工程学院 四川 绵阳 621000)

**【摘要】**针对 6G 移动通信系统中信息新鲜度表征和优化问题, 提出基于信息年龄的信息新鲜度表征方法, 并形成无人机能耗约束下的最小化信息年龄优化问题。而离散的信息年龄优化目标和复杂能耗约束使得非凸优化问题难以求解, 因此提出基于强化学习 (RL) 的无人机轨迹方法。该方法构建与信息年龄相关的奖励函数以快速实现智能化的无人机轨迹决策, 从而降低无人机通信系统的信息年龄。仿真结果表明, 相比于基准方案能提高 8.51%~21.82% 的系统信息新鲜度, 同时具有更优的收敛性。

**关键词** 信息年龄; 强化学习; 轨迹优化; 无人机; 无线通信系统  
**中图分类号** TN92 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2021128

## Reinforcement Learning-Based Age of Information Optimization in UAV-Enabled Communication System

LI Xinmin\*, YIN Baolin, WEI Lili, and ZHANG Xiaoqiang

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621000)

**Abstract** Aiming at solving the characterization and optimization of information freshness in the sixth generation (6G) communication system, we firstly model information freshness based on the age of information (AoI) in the unmanned aerial vehicle (UAV) communication system and formulate an AoI minimization problem subjected to the energy consumption. However, the nonconvex problem is difficult to solve due to discreteness of AoI optimization and the complicated energy consumption expression. A reinforcement learning-based scheme is proposed to design the UAV's trajectory, in which the reward function related to AoI is constructed to realize a fast and intelligent UAV trajectory decision, thus reducing the AoI of UAV communication system. The simulation results show that, compared with the benchmark schemes, the proposed trajectory design scheme can improve the information freshness by 8.51%~21.82%. In addition, the proposed scheme has a superior convergence.

**Key words** age of information; reinforcement learning; trajectory optimization; unmanned aerial vehicles; wireless telecommunication system

无人机空中基站具有部署灵活、自主可控和低成本的优势, 能够满足未来 6G 移动通信系统的广覆盖、低时延、大连接和智能化部署的需求<sup>[1]</sup>, 因此无人机通信技术成为构建未来 6G 移动通信系统的关键技术之一。

目前, 无人机通信系统中性能分析和轨迹设计成为研究热点<sup>[2-3]</sup>。无人机轨迹不仅影响通信链路质量, 还影响无人机能耗, 因此针对不同场景和需求设计有效的飞行轨迹成为无人机通信网络中的重要研究工作<sup>[4-5]</sup>。文献 [6] 在单个无人机和两个地面用

户组成的无线能量传输系统中, 通过优化无人机飞行轨迹以提升地面用户接收能量。文献 [7] 考虑了一种圆形飞行轨迹的无人机信息采集系统, 基于二分法和循环迭代法优化无人机飞行轨迹, 分别得到最小化系统能耗和地面用户能耗的飞行方案。然而多无人机集群通信系统中, 多无人机轨迹优化和干扰控制是现有研究的工作难点。文献 [8] 通过联合优化通信链路的带宽和无人机飞行轨迹, 实现最大化地面用户速率性能。文献 [9] 针对上行两用户干扰信道的无人机通信系统, 通过分析无人机位置和

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-09-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB1705100); 国家留学基金委项目 (202008515123)

作者简介: 李新民 (1989-), 男, 博士, 主要从事 5G 通信系统、无人机通信等方面的研究。

\*通信作者: 李新民, E-mail: lixm@swust.edu.cn

地面用户功率对速率性能的影响, 获得发送功率闭式和无人机位置的范围, 实现无人机通信和速率最优。针对通信系统智能化需求, 文献 [10] 提出一种深度强化学习方法优化无人机飞行轨迹以实现最大化传输速率性能。文献 [11] 提出了一种新的基于门控循环单元和自编码器的深度学习算法, 实现无人机轨迹预测和姿态评估, 保证无人机通信系统的可靠性。总体而言, 当前研究主要以提升无人机通信速率、降低能耗和增强可靠性等性能需求为主, 忽略了信息新鲜度的性能需求。

在 6G 系统的实时性需求场景下, 系统获取的新鲜信息才能被有效使用<sup>[12-13]</sup>。为满足 6G 通信系统多方位设计需求, 信息新鲜度优化成为移动通信系统中亟需解决的问题。在文献 [14] 中, 信息年龄 (age of information, AoI) 首先被用来表征信息新鲜度, 具体定义为数据包从源节点生成, 并到达目的节点所经历的时间。文献 [15] 在局域网络中基于不同调度策略验证了信息年龄表征的信息新鲜度性能。文献 [16] 在信息年龄约束下优化传感器的动作, 从而最小化传感器网络发射功率。文献 [17] 在单用户衰落信道中, 考虑 AoI 需求提出了基于动态规划的功率优化策略。文献 [18] 提出了有效信息年龄的概念, 分析了系统吞吐量与平均有效信息年龄的关系。然而, 上述所提信息年龄优化方法不适用于能耗约束下的无人机通信系统中的信息年龄优化研究。

本文针对无人机通信系统中信息新鲜度的性能需求, 首先基于信息年龄建模单无人机通信系统的信息新鲜度, 并形成能耗约束下的最小化信息年龄的优化问题。针对复杂的非凸优化问题提出基于强化学习的无人机轨迹优化方法, 该方法将构建与信息年龄相关的奖励函数以实现智能化无人机轨迹决策。

## 1 系统模型和问题形成

### 1.1 无人机能耗建模

本文考虑单个无人机基站和  $N$  个地面用户组成的通信系统, 该系统由单天线的无人机和  $N$  个单天线用户组成, 其中无人机服务半径为  $R_s$ , 飞行高度为  $H$ , 用户与无人机采用时分复用通信。无人机在  $t$  时刻的三维坐标为  $b(t) = (x(t), y(t), H)$ , 第  $n$  个用户的三维坐标为  $q_n = (x_n, y_n, 0)$ , 第  $n$  个用户与无人机的三维距离  $d_n(t) = \sqrt{(x_n - x(t))^2 + (y_n - y(t))^2 + H^2}$ 。为更加准确地刻画无人机通信链路信道信息, 本文

采用概率信道模型<sup>[19]</sup>。为方便描述, 第  $n$  个用户和无人机之间直视径 (line of sight, LoS) 通信链路的概率定义为:

$$\eta_n^{\text{LoS}}(\theta_n^t) = \frac{1}{1 + F \exp(-G[\theta_n^t - F])} \quad (1)$$

式中,  $G$  和  $F$  为信道参数, 值取决于信道环境;  $\theta_n^t$  为第  $n$  个用户在  $t$  时刻的仰角。用户与无人机之间的传输方式为非直视径 (non-line of sight, NLoS) 的概率  $\eta_n^{\text{NLoS}}(\theta_n^t) = 1 - \eta_n^{\text{LoS}}(\theta_n^t)$ 。因此, 第  $n$  个用户与无人机之间平均信道功率增益表示为:

$$h_n^t = \eta_n^{\text{LoS}}(\theta_n^t) \text{PL}_n^{\text{LoS}} + \eta_n^{\text{NLoS}}(\theta_n^t) \text{PL}_n^{\text{NLoS}} \quad (2)$$

式中,  $\text{PL}_n^{\text{LoS}}$  和  $\text{PL}_n^{\text{NLoS}}$  分别表示第  $n$  个用户与无人机通信时 LoS 链路和 NLoS 链路的路径损耗。定义第  $n$  个用户的发射功率为  $p_n$ , 无人机接收端的噪声功率为  $\sigma^2$ , 在无人机接收电路处理后, 第  $n$  个用户在  $t$  时刻的信噪比表示为:

$$\gamma_n^t = \frac{p_n h_n^t}{\sigma^2} \quad (3)$$

定义传输带宽为  $B$ , 因此在  $t$  时刻无人机接收第  $n$  个用户的数据速率为:

$$\Gamma_n^t = B \log_2(1 + \gamma_n^t) \quad (4)$$

无人机的能耗主要由通信能耗和动力能耗组成。假定无人机具有恒定的接收功率  $p_u$ , 在时间  $t$  内通信产生的能耗为:

$$E_c(t) = p_u t \quad (5)$$

保持无人机处于恒定高度和支持无人机飞行产生的能耗为动力能耗, 对于正常运行的无人机, 所需动力能耗为<sup>[20]</sup>:

$$E_m(t) = \int_0^t [c_1 \|v(t)\|^3 + \frac{c_2}{\|v(t)\|} (1 + (\beta(t)^2 - \frac{(\beta(t)v(t))^2}{\|v(t)\|^2}) / g^2)] dt + \frac{1}{2} m (\|v(t)\|^2 - \|v(0)\|^2) \quad (6)$$

式中,  $v(t) \triangleq \dot{b}_u(t)$  为无人机飞行速度;  $\beta(t) \triangleq \dot{b}_u(t)$  为无人机飞行加速度; 参数  $c_1$  和  $c_2$  的值取决于无人机的重量、机翼面积和空气密度等;  $m$  为无人机的质量;  $g$  为重力加速度。定义无人机总能量为  $E_{\max}$ , 则无人机剩余能量表示为:

$$E_r(t) = E_{\max} - E_{\text{total}}(t) \quad (7)$$

式中, 总能耗  $E_{\text{total}}(t) = E_r(t) + E_m(t)$ 。为满足无人机的正常服务, 无人机剩余能量  $E_r$  应不小于最低工作能量  $E_l = \chi E_{\text{max}}$ , 其中系数  $\chi \in (0, 1)$ 。

## 1.2 AoI 建模

本文采用 AoI 度量信息新鲜度, AoI 越小信息新鲜度越高, 反之, AoI 越大信息越不新鲜。结合 5G 帧结构, 定义  $\tau_n^\mu$  为第  $n$  个用户在第  $\mu$  个子帧时的信息 AoI, 则 AoI 计算表达式为:

$$\tau_n^\mu = \begin{cases} \tau_n^{\mu-1} + 1 & \partial_n = 0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\partial_n$  是一个二进制数, 当  $\partial_n = 1$  时, 表示第  $n$  个地面用户与无人机基站间数据包的传输已经完成,  $\partial_n = 0$  表示还未传输完成。在有限观察时间内, AoI 变化趋势如图 1 所示, 其中  $\tau_1 = 1$ 。在  $\mu_1$  时刻用户开始向无人机发送数据包, 若数据包未发送完成, AoI 会持续增加, 直到  $\mu_2$  时发送完毕, 并在  $\mu_3$  时开始服务下一个用户。

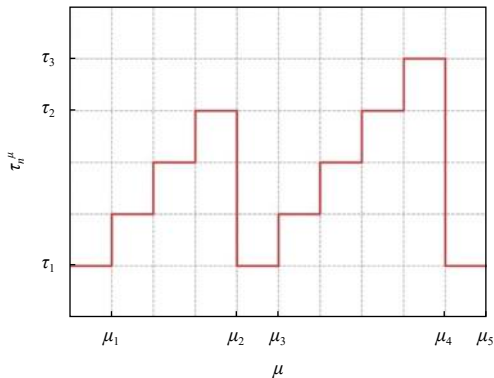


图 1 AoI 的变化趋势

由于用户信息 AoI 于通信信道和数据量直接相关, 给定数据包大小  $R_p$ ,  $\partial_n$  的值取决于在  $\mu$  个子帧传输的数据总量与  $R_p$  的大小, 关系为:

$$\partial_n = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^{\mu} \Gamma_n^i > R_p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

本文旨在优化无人机轨迹设计, 从而提升无人机通信系统信息新鲜度。因此, 在  $T$  个观测子帧内, 最小化平均信息年龄优化问题如下:

$$(P1): \min_{v(\mu)} \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^N \sum_{\mu=1}^T \tau_n^\mu \quad (10)$$

s.t.  $E_r(t) \geq E_l$

式中, 能耗约束表示无人机的剩余能量不小于无人机的最低工作能量。由于能耗约束十分复杂, 且离散优化目标与通信速率相关, 因此该非凸优化问题通常难以求得最优解。

## 2 基于 Q-Learning 的 AoI 优化方案

为求解上述复杂 AoI 优化问题, 实现无人机飞行轨迹自主决策, 本文采用 Q-Learning 算法通过奖励策略设计无人机飞行轨迹。Q-Learning 是一个无模型的强化学习算法, 也可以被看作是异步动态规划方法。它为智能体与环境的信息交互提供经验以提升在有限马尔可夫模型  $\langle S, A, P, R, \gamma \rangle$  中获取最佳动作决策的学习能力。该马尔可夫模型具有有限的状态空间  $S$ 、动作空间  $A$ 、状态转移概率  $P$ 、奖励函数  $R$  以及折扣因子  $\gamma$ , 折扣因子用于表征处于当前状态下未来奖励的重要程度。定义  $\alpha$  为学习率, 决定新经验值与历史经验值的利用程度。定义贪婪系数  $\epsilon \in (0, 1)$  以平衡算法探索和利用关系, 无人机将基于  $\epsilon$ -greedy 策略选择动作。

1) 状态空间: 无人机在服务用户过程中, 状态空间仅由无人机位置决定, 无人机的飞行高度恒定为  $H$ , 将无人机在子帧  $u$  的位置坐标  $b(u) = (x(\mu), y(\mu), H)$  作为无人机的状态, 从而构建了无人机的状态空间  $s(\mu) \in S = \{b(\mu)\}$ 。

2) 动作空间: 动作空间为无人机在服务过程中可执行动作的集合, 无人机的飞行高度恒定。受限于无人机的计算能力和能量, 本文考虑在子帧  $\mu$  可执行的动作包括东、南、西、北、东北、东南、西北、西南 8 个典型动作, 从而构成无人机的动作空间,  $a(\mu) \in A = \{ 'E', 'S', 'W', 'N', 'EN', 'ES', 'WN', 'WS' \}$ 。高维动作空间将导致训练次数增加, 也会增加计算时间, 消耗无人机有限能量。而本文所提典型动作空间可为高维动作空间研究提供基础。无人机的动作空间为当无人机在任意状态下, 可通过执行动作空间中的任意动作到达下一个状态。

3) 奖励规则: 为使无人机能够自主求解最佳路径, 将无人机所采集每个用户 AoI 经过一定的运算规则后将计算结果作为奖励反馈给无人机, 无人机可根据该奖励决策是否在该状态下执行该动作。通过多次训练使无人机在每个状态下都能选取长期收益最大的动作, 即获得最佳动作策略。定义  $\phi$  和  $\lambda \in [0, 1]$  为奖励相关的参数, 以保证奖励与 AoI 之间为负相关,  $\omega_n$  表示当前服务用户最后时刻的  $\tau_n$  值, 则无人机服务第  $n$  个用户的奖励  $\Psi_n$  为:

$$\Psi_n = \Phi - \omega_n \lambda \quad (11)$$

无人机与环境交互获得环境反馈的奖励, 借助反馈信息更新  $Q$  表从而收敛到最优行为, 策略为  $\pi$  时  $Q$  表的更新表达式为:

$$Q^\pi(s(\mu), a(\mu)) = Q^\pi(s(\mu), a(\mu)) + \alpha[\Psi + \gamma \max_{\tilde{a} \in A} Q^\pi(s(\mu+1), \tilde{a}) - Q^\pi(s(\mu), a(\mu))] \quad (12)$$

为得到最佳策略, 使无人机在任意状态下都能选择长期收益最大的动作, 所提基于 Q-Learning 的最小化 AoI 算法如下。

初始化参数  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\epsilon$ 、无人机状态  $b_s$ 、训练次数  $N_r$ 、无人机总能量  $E_{\max}$  和最低工作能量  $E_1$  等。

While  $N_r > 0$  do

If  $E_r \geq E_1$  then

If 未到达目的状态 then

根据  $\epsilon$ -greedy 策略选择动作; 根据式 (11) 计算奖励; 根据式 (12) 更新无人机  $Q$  表; 根据式 (7) 更新无人机剩余能量  $E_r$

Else

根据式 (10) 计算平均 AoI;  $N_r \leftarrow N_r - 1$

End if

Else

无人机停止服务, 飞回初始化状态  $b_s$

End if

End

依据上述算法过程描述可知, 每次训练最大计算量为  $O(L|S| \times |A|)$ , 其中  $|S|$  和  $|A|$  分别表示状态空间和动作空间长度,  $L$  表示无人机从总能量  $E_{\max}$  到  $E_1$  的最大子帧数。因此在  $N_r$  训练次数下所提算法计算复杂度为  $O(8LN_r|S|)$ 。

### 3 仿真结果与分析

为验证本文方案性能的优越性, 将贪婪方案与随机方案作为基准方案, 在不同参数配置下验证所提方案。为减少数据包重传带来额外的能量开销, 考虑无人机飞至用户的正上方才开始数据接收。无人机成功接收所有数据包或者停止服务后, 不再计算 AoI。仿真平台为 Python3.9, CPU 为 Intel i5-5350U@1.80 GHz, 详细仿真参数如表 1 所示。 $\phi_n$  为第  $n$  个用户的其他路损, 则 LoS 路损和 NLoS 路损分别表示为:

$$PL^{\text{LoS}} = 20 \log d_n + 20 \log f_c + 20 \log \left( \frac{4\pi}{c} \right) + \phi_n^{\text{LoS}}$$

$$PL^{\text{NLoS}} = 20 \log d_n + 20 \log f_c + 20 \log \left( \frac{4\pi}{c} \right) + \phi_n^{\text{NLoS}}$$

表 1 仿真参数

符号	参数描述	值
$B$	带宽/KHz	180
$f_c$	载频/GHz	2
$N$	用户数/个	10
$p$	用户发射功率/dBm	20
$\sigma^2$	噪声功率/dBm	-114
$\alpha$	学习率	0.6
$\epsilon$	贪婪系数	0.5
$\gamma$	折扣因子	0.99
$R_s$	无人机服务半径/m	700
$H$	无人机飞行高度/m	100
$E_{\max}$	无人机最大能量/J	$1.5696 \times 10^5$
$R_p$	数据包大小/K	128
$\chi$	最小能量参数	0.1
$F$	信道相关参数	$30^{[19]}$
$G$	信道相关参数	$0.7^{[19]}$

在单个无人机数据收集场景下, 基于 Q-Learning 算法训练无人机多次后的飞行轨迹如图 2 所示。无人机收集每个用户的信息后, 根据设计的奖励机制向无人机反馈奖励, 然后更新剩余能量  $E_r$  和  $Q$  表, 从而自主决策无人机飞行轨迹。

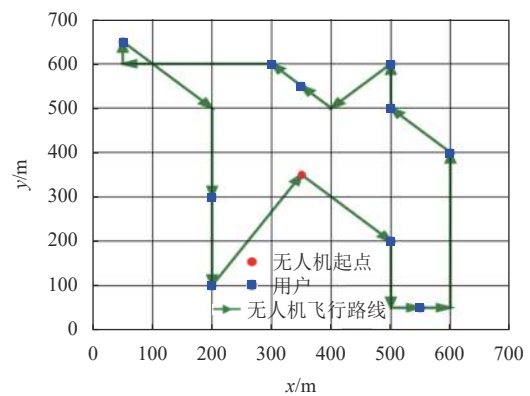


图 2 无人机飞行轨迹

图 3 仿真了用户发射功率与平均 AoI 的关系。仿真表明随着发射功率增加平均 AoI 呈现下降趋势, 意味着平均 AoI 与用户发射功率负相关。当发射功率增大时, 接收端信噪比增大增加了通信速率, 因此传输数据包所占子帧数减少, 从而使得系

统 AoI 减小。与基准方案相比, 在相同发射功率下, 本文无人机轨迹设计方案能够降低信息平均 AoI, 具体地, 发射功率  $p = 20$  dBm 时, 相较于随机方案和贪婪方案, 本文方案平均 AoI 减少 16.13% 以上。

图 4 仿真了无人机服务半径与 AoI 之间关系, 不难发现无人机服务半径增加, 飞行时间变长, 系统 AoI 快速增加。通过与基准方案对比发现: 在相同服务半径情况下, 所提无人机轨迹设计方案能够有效降低系统 AoI。特别地, 在  $R_u = 300$  m 时, 相较于随机方案, 本文方案的平均 AoI 降低 20.40%, 相较于贪婪方案, 本文方案的平均 AoI 降低 15.26%。

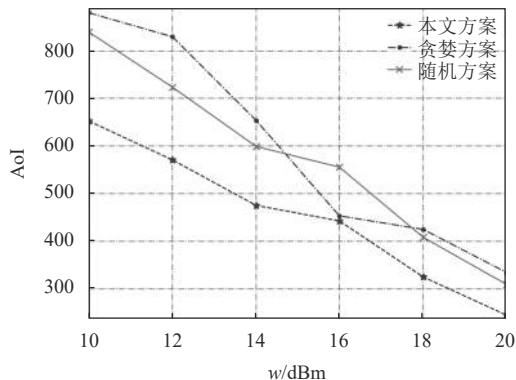


图 3 发射功率与 AoI 的关系

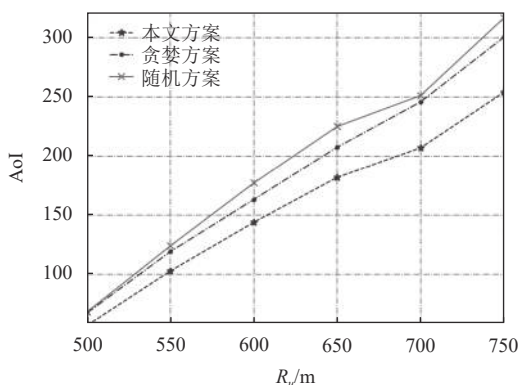


图 4 无人机服务半径与 AoI 的关系

图 5 仿真了 3 种方案下信息年龄与训练次数的关系。在固定信道下训练无人机  $N_r$  次, 本文方案 AoI 结果随着训练轮次增加而逐渐降低, 表明此方案能够实现无人机自主决策飞行轨迹, 提高信息新鲜度。与基准方案相比, 此方案具有更优的收敛性: 相比于随机方案, 能提升无人机通信系统 21.82% 的信息新鲜度性能, 相比于贪婪方案, 提高了 8.51% 的信息新鲜度性能。

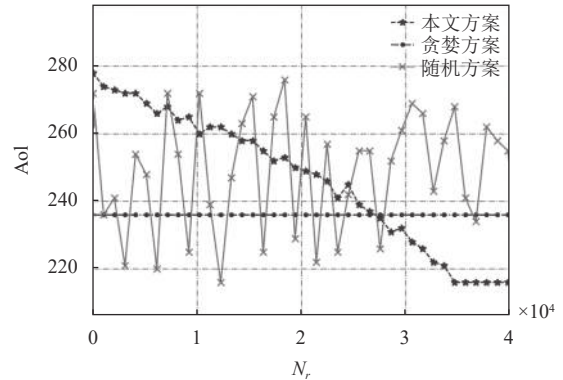


图 5 信息年龄与训练次数的关系

## 4 结束语

本文基于信息年龄建模无人机通信系统的信息新鲜度并形成能耗约束下的最小化信息年龄的优化问题, 提出了基于强化学习的无人机轨迹优化方法, 构建与信息年龄相关的奖励函数, 使无人机自适应地改进飞行轨迹设计策略。仿真结果表明, 此方案与基准方案相比, 能有效提高系统的信息新鲜度, 同时, 所提无人机轨迹设计方案具有更优的收敛性。此研究作为无人机集群通信系统中增强信息新鲜度提供了优化方法。

本文的研究得到了西南科技大学博士基金 (18zx7142, 19zx7123) 的支持, 在此表示感谢!

## 参考文献

- [1] 6G FLAGSHIP. 6G white paper: Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[EB/OL]. [2021-01-20]. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf>.
- [2] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. LEO satellite-assisted UAV: Joint trajectory and data collection for internet of remote things in 6G aerial access networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(12): 9814-9826.
- [3] AGGARWAL S, KUMAR N, TANWAR S. Blockchain-envisioned UAV communication using 6G networks: Open issues, use cases, and future directions[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5416-5441.
- [4] JIANG X, YANG Z, ZHAO N, et al. Resource allocation and trajectory optimization for UAV-enabled multi-user covert communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 69(7): 7634-7647.
- [5] ZENG Y, XU X, JIN S, et al. Simultaneous navigation and radio mapping for cellular-connected UAV with deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4205-4220.
- [6] XU J, ZENG Y, ZHANG R. UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy region

- characterization[C]//IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2017: 1-7.
- [7] 万俊, 肖霖, 杨鼎成, 等. 无人机空对地通信中的联合轨迹优化和功率控制[J]. 现代电子技术, 2020, 43(17): 6-10.  
WANG J, XIAO L, YANG D C, et al. Joint trajectory optimization and power control in UAV-to-ground communication[J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(17): 6-10.
- [8] 黄颖茜, 崔苗, 张广驰. 具有回程约束的多无人机基地站的带宽功率与轨迹优化[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(3): 831-840.  
HUANG Y Q, CUI M, ZHANG G C. Bandwidth, power and trajectory optimization for multiple UAV base stations with backhaul constraint[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(3): 831-840.
- [9] LI X M, XU J. Positioning optimization for sum-rate maximization in UAV-enabled interference channel[J]. [IEEE Signal Processing Letters](#), 2019, 26(10): 1466-1470.
- [10] BAYERLEIN H, KERRET P D, GESBERT D. Trajectory optimization for autonomous flying base station via reinforcement learning[C]//IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Kalamata: IEEE, 2018: 1-5.
- [11] ZHU X, QI F, FENG Y. Deep-learning-based multiple beamforming for 5G UAV IoT networks[J]. [IEEE Network](#), 2020, 34(5): 32-38.
- [12] SUN Y, KADOTA I, TALAK R, et al. Age of information: A new metric for information freshness[J]. [Synthesis Lectures on Communication Networks](#), 2019, 12(2): 1-224.
- [13] GOWRISANKAR C, HEMALATHA R. Reliable transmission mechanism for real-time traffic information in high-speed vehicles using vehicular wireless networks[J]. [Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering](#), 2012, 2: 514-517.
- [14] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: How often should one update?[C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Orlando: IEEE, 2012: 2731-2735.
- [15] KADOTA I, RAHMAN M S, MODIANO E. WiFresh: Age-of-information from theory to implementation[C]//International Conference on Mobile Computing and Networking. Athens: IEEE, 2021, DOI: 10.1109/ICCCN 52240.2021.9522228.
- [16] MOLTAFET M, LEINONEN M, CODREANU M, et al. Power minimization in wireless sensor networks with constrained AOI using stochastic optimization[C]//IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific: IEEE, 2019, DOI: 10.1109/IEEECONF44664. 2019.9048692.
- [17] BHAT R V, VAZE R, MOTANI M. Throughput maximization with an average age of information constraint in fading channels[J]. [IEEE Transactions on Wireless Communications](#), 2021, 20(1): 481-494.
- [18] CHANG B, KIZILKAYA B, Li L, et al. Effective age of information in real-time wireless feedback control systems[J]. [Science China Information Sciences](#), 2021, 64(2): 1-14.
- [19] HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. [IEEE Wireless Communication Letters](#), 2014, 3(6): 569-572.
- [20] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. [IEEE Transactions on Wireless Communications](#), 2017, 16(6): 3747-3760.

编辑 税红