

引用格式: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 Y C, YANG T, HU B, A status updating policy based on age of information in wireless sensor network[J], Microelectronics & Computer,2020,37(11):29-34.]

无线传感器网络中基于信息年龄的状态更新策略

赵悦超^{1,2} 杨 涛^{1,2} 胡 波^{1,2}

(1 复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433;

2 复旦大学 信息科学与工程学院 智慧网络与系统研究中心, 上海 200433)

摘 要: 针对具有能量收集的无线传感器网络(WSN)场景,传感器定期向基站发送状态更新信息,但受频谱资源限制,在给定时隙仅允许有限数量传感器进行发送。同时,发射功率受限于剩余能量的约束。围绕上述问题,提出了基于信息年龄(AoI)的马尔可夫决策过程(MDP)来构建状态的更新策略方案。模型刻画了 WSN 中频谱、能量及发送时隙三者之间的内在关系,同时,针对大规模传感网络下高计算复杂度问题,提出了基于 Whittle Index 的调度算法。该算法通过迭代得到了渐近最优性能,计算复杂度较之大规模 MDP 求解显著降低,兼顾了调度的实时性和准确性。

关键词: 无线传感器网络;信息年龄;马尔可夫决策过程;多臂赌博机

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2020)11—0029—06

A status updating policy based on age of information in wireless sensor network

ZHAO Yue-chao^{1,2}, YANG Tao^{1,2}, HU Bo^{1,2}

(1 Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Engineering
Fudan University, Shanghai 200433, China; 2 Research Center of Smart Networks and Systems,
School of Information Science and Engineering Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: For wireless sensor networks (WSN) scenarios with energy harvesting, sensors regularly send status update information to the base station, but limited by spectrum resources, only a small number of sensors are allowed to send in a given time slot. At the same time, the transmission power is limited by the remaining energy. In view of the above problems, we propose a state update strategy scheme based on the Markov Decision Process (MDP) of the Age of Information (AoI). The model depicts the intrinsic relationship between the spectrum, energy, and transmission time slots in the WSN. In order to solve the problem of high computational complexity in large-scale sensor networks, a scheduling algorithm based on Whittle Index is proposed. This algorithm obtains asymptotically optimal performance through iteration, and the computational complexity is significantly reduced compared to large-scale MDP solutions, taking into account the real-time and accuracy of scheduling.

Key words: wireless sensor networks; age of information; markov decision process; multi-armed bandits

1 引言

传感技术、无线通信技术与嵌入式计算技术的不断进步,推动了低功耗、多功能传感器的快速发展,使其能够在单芯片内集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能,由此形成的无线传感器网络已成为物联网(IoT)发展的重要组成部分。

与低功耗传感系统比较,实时信息传感既关注信息的传输的准确性,又关注信息更新的时效性。与之相伴的问题是如何对信息的准确性和时效性量化处理。Kaul 等^[1]提出了信息年龄(Age of Information, AoI)的概念,用于描述在远程系统中接收端信息的新鲜程度,其正式定义为自上一次成功信息更新后经过的时间。在任意时刻 t ,用 $U(t)$ 表示接收端上一次成功接收包的发送时刻,信息年龄 $\Delta(t)$ 可以表示为

$$\Delta(t) = t - U(t) \quad (1)$$

AoI 的成功应用始于车联网中对相邻节点状态信息的时限更新刻画^[2],以此为契机,AoI 受到了学术界的普遍关注。例如在无线网络中为实现链路自适应而研究传感器网络的信息采样策略、排队系统中的调度策略等。Costa, Huang 等^[3-4]考虑单服务器场景(单接收端)并将排队论与 AoI 结合,通过调整服务速率与到达率实现效率最大化。Bedewy 等^[1]研究在多跳网络场景中的信息年龄最小化问题。在考虑能量收集的 WSN 场景中,以 AoI 作为参量即让网络的总体 AoI 最低。这种情况下通常应用马尔可夫决策过程(MDP)建模^[6-7],在求解过程中使用值迭代或策略迭代。MDP 的优势在于针对不同的系统状态求得对应的固定动作,即基站可以获知在任一状态下应当选定哪些传感器进行更新。但 MDP 仅在用户数较少时性能较好,当用户数量较多,状态空间呈指数递增,策略计算的复杂度显著提升。为解决在 MDP 中用户数量较多引起值迭代算法计算成本较大的短板。本文的贡献在于,针对考虑能量收集的无线传感器网络,以传感器的总体 AoI 进行优化问题建模,利用 Whittle Index 方法进行问题解耦,从而给出一种低计算复杂度的传感器解决调度策略。

2 系统模型

假设一个带有能量收集的无线传感器网络,一个中央控制器接收来自多个终端的状态更新信息。如图 1 所示, N 个传感器节点 $s_1, s_2, \dots, s_N$ 向基站(接

收端)发送状态更新信息。时间按等时隙划分,并假定传感器采样并发送一个包到达基站的时间为一个时隙。受频谱资源和电量限制,每个时隙仅允许一个或 M 个传感器发送状态更新信息($M < N$)。在每个时隙开始时,传感器从外界获得能量进行充电,随后基站选定一个或 M 个传感器,被选中的传感器开始采样并传输,其余传感器处于空闲状态,忽略传感器的采样时间消耗。在有噪信道条件下,每个传感器的状态信息传输成功概率为 p_n ($n = 1, \dots, N$)。传感器单次传输会消耗固定电量,外部能量每时隙以到达率 q_n ($n = 1, \dots, N$) 获取,能量的形式为太阳能、风能等。

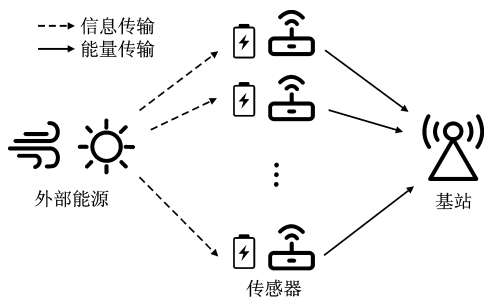


图1 能量收集的无线传感器网络

在本场景中,由于每个包的发送时间为一个时隙,传感器在当前时隙未能实现状态更新时,例如未被基站调度或包传输失败,下一时刻对应的信息年龄为当前时刻的信息年龄加 1,否则为 1。用 $a_n(t)$ 表示传感器 s_n 在时刻 t 的信息年龄,可以写作

$$a_n(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{时隙 } t \text{ 更新状态信息} \\ a_n(t) + 1, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

对于单条链路,衡量 AoI 的代价函数通常为平均 AoI,用 $\bar{\Delta}$ 表示为

$$\bar{\Delta} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \Delta(t) \quad (3)$$

$\bar{\Delta}$ 越低,表示该条链路信息的新鲜程度越高。对于多条链路,平均 AoI 为所有链路平均 AoI 的加权和,本场景中对不同传感器没有偏好设置,因此传感器的权重均为 $1/N$ 。令在任意策略 π 调度下的代价函数为

$$J_\pi \triangleq \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{TN} \mathbb{E}_\pi \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_i(t) \right] \quad (4)$$

希望找到一种稳定的调度策略,使得当时间趋于无穷时,代价函数 J 能够最小。

定义 1(代价最优): 如果存在一个策略 π 使得 J_π

最小,则策略 π 为代价最优的.

多数情况下,本场景可以建模为具有平均代价约束的马尔可夫决策过程(MDP)^[11]. 令 a_n 表示传感器的信息年龄, e_n 表示传感器电量,假设传感器的电量上限为一个电量单位,一次传输消耗一个电量单位,一次能量收集获得一个电量单位. 则系统状态(State)可以写作

$$S(t) = \{(a_1(t), e_1(t)), \dots, (a_N(t), e_N(t))\} \quad (5)$$

每时隙基站选定一个传感器状态更新,动作空间 $U = \{1, \dots, N\}$. 转移概率依传输成功概率 p_n 和能量到达率 q_n 得到,代价函数为当前时隙所有传感器的 AoI 加权和,写作

$$C(S(t), U) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(t) \quad (6)$$

我们希望得到策略 π (与上述定义相同) 使得平均代价 J_π 最小

$$J_\pi = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}_\pi \left[\sum_{t=1}^T C(S(t), U) \right] \quad (7)$$

常见寻找平稳策略 π 的方法是建模为有限时间尺度和可数无穷状态空间的马尔可夫决策过程,利用值迭代或策略迭代方法,迭代求得在每个状态下的最佳动作^[8]. MDP 方法会得到针对所有情况的确定策略,因此在每一轮迭代都会对所有状态值进行更新,随着用户数量 N 的增加,每一轮需要更新的参数量呈指数递增,计算复杂度剧增,MDP 方法并不适用于用户数量较多的场景. 因此针对这种无线通信场景,我们一个低复杂度的调度策略用于多用户的资源调度问题.

3 调度策略设计

本节中我们将提出一种基于 restless bandit 的低计算复杂度的调度策略,首先将原问题转化为 restless MAB(RMAB)问题,然后利用 Whittle Index 方法进行求解.

3.1 Restless MAB 建模

RMAB 问题起源于多臂赌博机问题 (Multi-Armed Bandit, MAB)^[9]. 在 MAB 模型中,当玩家在时刻 t 做出选择后从被选中的摇臂获得服从某种分布的奖励,同时被选中的摇臂的状态服从某种马尔可夫规则变化,未被选中的臂不会产生奖励,且状态不会发生变化. 而在 RMAB 模型中,除被选中的摇臂状态发生变化外,未选中的摇臂状态也会服从某种规则进行改变^[10].

无线传感器网络中,每个传感器的状态包括

AoI 和电量,当传感器被选中时,电量降低, AoI 随传输成功与否而发生变化,未被选中的传感器其 AoI 会继续增长,电量会随能量到达率发生变化,符合 RMAB 模型定义. 具体状态转移表示如下:

当玩家选择一个传感器进行更新时,其 AoI 和电量变化为:

$$P(a_n(t) \rightarrow a_n(t) + 1) = 1 - p_n$$

$$P(a_n(t) \rightarrow 1) = p_n \quad (8)$$

$$P(e_n(t) = 1 \rightarrow 1) = q_n$$

$$P(e_n(t) = 1 \rightarrow 0) = 1 - q_n \quad (9)$$

未选中的传感器其 AoI 和电量变化为:

$$a_m(t+1) = a_m(t) + 1 \quad (10)$$

$$P(e_m(t) = 0 \rightarrow 1) = q_m$$

$$P(e_m(t) = 0 \rightarrow 0) = 1 - q_m$$

$$P(e_m(t) = 1 \rightarrow 1) = 1 \quad (11)$$

RMAB 本身是 PSPACE-hard, 无法直接求解. Whittle 将原问题中的约束进行放松,将模型的约束条件由每个时隙调度固定的用户数量修改为每个时隙调度用户数量的期望. 将约束放松的重要性在于对原本的多臂问题解耦,将 1 个 N 维问题转化为 N 个独立的 1- 维问题,同时引入一个额外代价“对消极动作的补偿”^[10],仅在传感器进行状态信息更新时触发. 在解耦后的子问题中,采用任意策略 μ 的目标函数为

$$J_\mu = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}_\mu \left[\sum_{t=1}^T a(t) + Cu(t) \right] \quad (12)$$

式中, $u(t)$ 为指示函数,当传感器进行传输时为 1,其余时刻为 0, C 为额外代价.

定义 2(解耦模型) 一个解耦的子问题由一个传感器和一个基站组成,传感器的状态表示为 $a(t)$. 如果在 t 时隙传感器更新信息,则

$$a(t+1) = \begin{cases} 1, & w.p. p \\ a(t)+1, & w.p. 1-p \end{cases} \quad (13)$$

如果在 t 时隙传感器不更新信息,则

$$a(t+1) = a(t) + 1 \quad (14)$$

引入 Whittle Index 是为了衡量基于对被动的补偿下,在状态 s 时拉动摇臂会得到多大的奖励. 在只有拉动摇臂才会得到奖励的前提下,任一状态 s 的最佳动作都是拉动,因此引入一个常量补偿 $\lambda \in R$,每当玩家选择不拉动时会得到补偿 λ . 如果一个状态 s 并入被动集合需要获得的补偿 λ 越大,说明该状态下拉动摇臂获得的奖励越大,则玩家在该状态应当更优先选择拉动.

定理 1 解耦模型的优化策略是阈值策略,假

设存在阈值 H , 当 $a(t) \geq H$ 时选择更新信息, 当 $a(t) < H$ 时选择空闲, 则 H 满足以下条件

$$\frac{p}{2} H^2 - \frac{p}{2} H \leq C \leq \frac{p}{2} H^2 + \frac{p}{2} H - p + 1 \quad (15)$$

证明:

令 $h(a)$ 为子问题的代价函数, μ^* 为子问题的最优代价, 贝尔曼方程可以表示为

$$h(a) + \mu^* = \min \left\{ h(a+1) + a; (1-p)h(a+1) + a + C \right\} \quad (16)$$

假设该模型的优化策略为阈值策略, 则存在阈值 H 使得当 $a \geq H$ 时传感器进行状态更新, 否则不更新. 当 $a \geq H$ 时, bellman 方程可以简化表示为

$$h(a) + \mu^* = (1-p)h(a+1) + a + C \quad (17)$$

迭代 n 次后, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} (1-p)^n h(n) = 0$ 得

$$h(H+k) = \frac{C-\mu^*}{p} + (H+k) \cdot \frac{1}{p} \quad (18)$$

式中, $k \geq 0$, 显然 $h(a)$ 是非减函数. 由 bellman 方程知, 当 $a < H$ 时可以表示为

$$h(a) + \mu^* = h(a+1) + a \quad (19)$$

上式中令 $a = H-1$, 则

$$\begin{aligned} h(H-1) + \mu^* &= h(H) + H - 1 \\ &= \frac{C-\mu^*}{p} + H \cdot \frac{1}{p} + H - 1 \end{aligned} \quad (20)$$

迭代 m 次后, 可得到最优代价 μ^* 与阈值 H 和额外代价 C 的关系

$$\mu^* = \frac{\frac{p}{2} H(H-1) + H + C}{pH - p + 1} \quad (21)$$

假设阈值满足条件(18), 则有

$$h(H) \leq \frac{C}{p} \leq h(H+1) \quad (22)$$

由 $h(a)$ 的单调性知, 当 $a \leq H$ 时, $h(a) + a \leq (1-p)h(a+1) + ph(1) + a + C$, 传感器应当不更新; 当 $a \geq H$ 时, $h(a) + a \leq (1-p)h(a+1) + ph(1) + a + C$, 传感器应当进行更新, 因此存在 H 符合已知条件, 以 H 作为阈值策略满足 bellman 方程且最优. 证毕.

定义 3(可索引性) 对应于解耦后的子问题模型, 当采取更新动作的额外代价 C 由 0 增长至 ∞ 时, 最优策略为更新动作的状态集合由全集单调递减至空集 ϕ .

在可索引的模型中, 给定补偿 C 就可以判断任

一状态的最佳动作, 如果在额外开销为 C 的前提下某一状态最优动作为空闲, 则当 C 继续增长该状态的最佳动作保持不变. 应用 Whittle Index 前需要证明该模型满足可索引性. 如果一个摇臂是可索引的, 则摇臂在任一状态下的 Whittle Index 定义为使摇臂优先选择空闲动作的最小代价 C .

定理 2(Whittle Index 策略) 解耦的子问题满足可索引性, 令 $I(a)$ 表示传感器的 Whittle Index, $I(a)$ 表示为传感器在状态 a 时, 无论选择更新或空闲动作其代价均相同的 C 的下确界. $I(a)$ 可以表示为

$$I(a) = C = \frac{1}{2} (pa + 2)(a - 1) \quad (23)$$

证明:

由公式(21) 得到 μ^* 与 H 和 C 的关系. 由 $h(a)$ 的单调性可知存在 $\gamma \in (0, 1)$ 满足

$$h(H+\gamma) = (H+\gamma) \cdot \frac{1}{p} + \frac{C-\mu^*}{p} = \frac{C}{p} \quad (24)$$

由上式得到 $\mu^* = H + \gamma$, 与公式(22) 整合得到

$$H = (1-\gamma) + \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{2} \right) + \sqrt{\frac{2C}{p} - \gamma(1-\gamma) + \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{2} \right)^2} \quad (25)$$

由于 H 在 $\gamma \in [0, 1]$ 单调递减且 $H(0) - H(1) = 1$, 因此存在 $\gamma^* \in (0, 1)$ 使得 $H(\gamma^*)$ 为整数且

$$H = H(\gamma^*) =$$

$$\left[H(0) = \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{2} \right) + \sqrt{\frac{2C}{p} + \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{2} \right)^2} \right]$$

由此得到 H 是 C 的单调递增函数, 当 C 逐渐增大至 ∞ , H 也逐渐增大至 ∞ , 此时子问题传感器的最优策略为空闲, 最优策略为更新动作的状态集合变为空集. 令 $H = h+1$ 可得到 $I(a)$ 的闭合表达式. 证毕.

由此得到适用于场景的调度策略算法, 如表 1 所示.

表 1 Whittle Index 算法

Algorithm 1 Whittle Index Policy

Input: 目标时隙 T , 传输成功率 p , 能量到达率 $q_i, i = 1, \dots, N$

Output: 平均 AoI J

- 1: 第 t 时隙开始. 传感器依据概率 $q_i, i = 1, \dots, N$ 更新电量
- 2: 根据每个传感器当前的电量划分能够传输的候选传感器集合
- 3: 根据 $I(a)$ 计算候选传感器的 Index
- 4: 选择第 i 个传感器进行传输, 其中 $i = \arg\max_k I(k)$
- 5: 返回步骤 1 直至到达目标时隙 $T, J = \frac{1}{TN} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_i(t)$

4 实验仿真

我们将 Whittle Index 方法与 Age-Optimal 方法进行对比,表现该方法的优越性以及部分局限. Age-Optimal 方法是每个时隙选择当前信息年龄最大的传感器进行传输.

图 2 表示在固定用户数量下两种方法的收敛速度及效果. 在用户数量为 50 时,设定当前能量的到达率为 0.7,每个传感器对应的初始信息年龄为 200,运行时隙总数为 800,设定传感器的传输成功概率在 0.3~0.7 区间不等. 在前 200 时隙内两种方法的平均 AoI 均快速下降并在第 400 时隙后逐渐趋于平稳,使用 Whittle Index 方法比 Age-Optimal 方法实现的平均 AoI 差距约为 30.

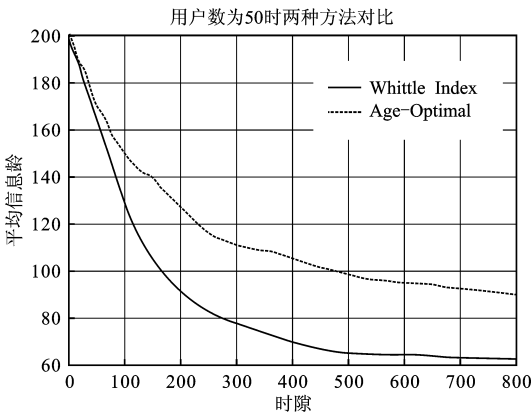


图 2 固定用户数量的两种方法对比

图 3 表示固定电量的到达率为 0.7 时,以用户数量为变量得到的两种方法的平均信息年龄对比. 如果采用值迭代算法会因为状态空间过大而运行缓慢,而 WI 方法较为迅速. 可以看到两种方法分别得到的平均信息年龄随用户数量增加呈线性增长,这是因为每个时隙可以调度的用户数量有限,用户数越多,总体的加权 AoI 就会越大.

图 4 对比了在固定用户数为 10 和 50 时,改变不同电量到达率下两种方法的平均信息年龄,传感器的传输成功概率在 0.3~0.7 区间不等,时隙数设定为 800. 对于两种方法,电量到达率越低,在每个时隙能够传输的候选传感器数量越低,基站能够做出的选择越少. 状态信息更新效率越低,例如信息年龄较高的传感器因为电量不足导致无法进行更新,导致平均信息年龄越高. 当到达率大于 0.5 后,Whittle Index 方法得到的平均信息年龄基本趋于稳定,进一步降低的空间减少.

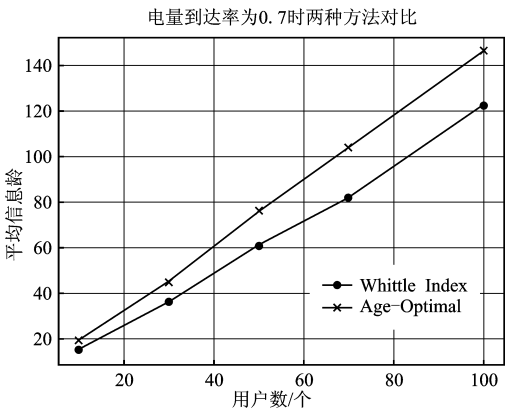


图 3 固定电量到达率的两种方法对比

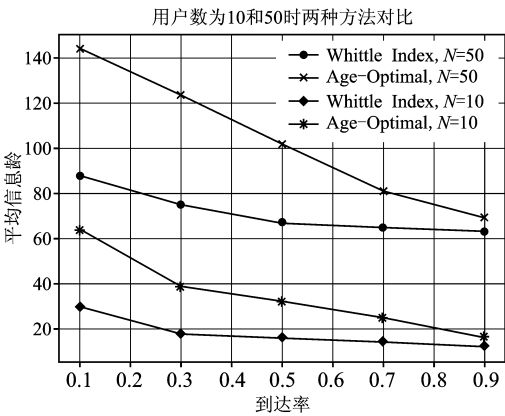


图 4 不同用户数量的两种方法对比

5 结束语

本文将一种常见的无线传感器传输模型建模为 MDP 模型,并运用 WI 方法对原问题进行优化,将包含众多用户的复杂模型解耦为仅包含单一用户的子问题,提出了一种低计算复杂度的阈值策略. 仿真结果表明,随着时隙数增加,该策略下的平均 AoI 逐渐收敛并显著优于贪婪策略;当用户数逐渐增加时,该策略的计算时间并未显著增加.

本文算法部分综合考虑了传感器的信息年龄和传输成功率,受 WI 方法的局限性并未进一步挖掘电量到达与传感器索引之间的关系. 未来可以进一步考虑将两者联合建模,应用强化学习算法,无需预先更新传感器的电量信息即可做出预测,在继承 WI 方法低计算复杂度的同时进一步提升算法性能,反映为更低的平均加权 AoI 和更快的收敛速度.

参考文献:

[1] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time sta-

- tus; how often should one update? [C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Orlando: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/INFOCOM.2012.6195689.
- [2] KAUL S, GRUTESER M, RAI V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks[C]//2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Salt Lake City, IEEE, 2011. DOI: 10.1109/SAHCN.2011.5984917.
- [3] COSTA M, CODREANU M, EPHREMIDES A. On the age of information in status update systems with packet management[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(4): 1897-1910. DOI: 10.1109/TIT.2016.2533395.
- [4] HUANGL B, MODIANO E. Optimizing age-of-information in a multi-class queueing system [C]//2015 IEEE International Symposium on Information Theory. Hong Kong, China: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ISIT.2015.7282742.
- [5] TALAK R, KARAMAN S, MODIANO E. Minimizing age-of-information in multi-hop wireless networks [C]//2017 55th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). Monticello: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ALLERTON.2017.8262777.
- [6] LENG S Y, 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. DOI: 10.1109/TCN.2019.2916097.
- [7] HSUY P, MODIANO E, DUAN L J. Age of information: design and analysis of optimal scheduling algorithms[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory. Aachen, IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ISIT.2017.8006590.
- [8] HSU Y P, MODIANO E, DUAN L J. Scheduling algorithms for minimizing age of information in wireless broadcast networks with random arrivals [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019. DOI: 10.1109/TMC.2019.2936199.
- [9] LIU K Q, ZHAO Q. Indexability of restless bandit problems and optimality of whittle index for dynamic multichannel access[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(11): 5547-5567. DOI: 10.1109/TIT.2010.2068950.
- [10] LIU Y, LIU K Q, ZHAO Q. Learning and sharing in a changing world: non-Bayesian restless bandit with multiple players [C]//2011 Information Theory and Applications Workshop. La Jolla, IEEE, 2011. DOI: 10.1109/ITA.2011.5743588.
- [11] WHITTLEP. Restless bandits: activity allocation in a changing world[J]. Journal of Applied Probability, 1988, 25(A): 287-298. DOI: 10.2307/3214163.
- 作者简介:**
赵悦超 男, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为 5G、无线通信、高可靠低时延通信.
杨 涛(通讯作者) 男, (1970-), 博士后, 副教授. 研究方向为无线通信信号处理. E-mail: taoyang@fudan. edu. cn.
胡 波 男, (1968-), 博士, 博士生导师. 研究方向为天线通信.
-
- (上接第 28 页)
- [9] OUADDAH A, ELKALAM A A, OUAHMAN A A. Towards a novel privacy-preserving access control model based on Blockchain technology in IoT[M]//ROCHA, SERRHINI M, FELGUEIRAS C. Europe and MENA Cooperation Advances in Information and Communication Technologies. Cham: Springer, 2017: 523-533. DOI: 10.1007/978-3-319-46568-5_53.
- [10] DAGHER GG, MOHLER J, MILOJKOVIC M, et al. Ancile: privacy-preserving framework for access control and interoperability of electronic health records using blockchain technology[J]. Sustainable Cities and Society, 2018(39): 283-297. DOI: 10.1016/j. scs. 2018.02.014.
- 作者简介:**
石乐义 男, (1975-), 博士, 教授. 研究方向为信息安全、博弈论. E-mail: shileyi@upc. edu. cn.
刘 娜 女, (1992-), 硕士. 研究方向为工控安全、区块链.
崔雯迪 女, (1995-), 硕士. 研究方向为工控安全、风险评估.
李晓雨 女, (1995-), 硕士. 研究方向为区块链、共享计算.
朱红强 男, (1993-), 硕士. 研究方向为工控安全、深度学习.