



# 大规模能量收集物联网基于信息年龄的自适应接入

朱奕雯<sup>1</sup>, 张葳<sup>1</sup>, 林艳<sup>1</sup>, 罗元勋<sup>2</sup>, 张一晋<sup>1\*</sup>

1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094

2. 屏东大学应用数学系, 屏东 900391

\* 通信作者. E-mail: yijin.zhang@njust.edu.cn

收稿日期: 2022-07-02; 修回日期: 2022-09-01; 接受日期: 2022-10-24; 网络出版日期: 2023-06-13

国家自然科学基金 (批准号: 62071236, 62001225) 资助项目

**摘要** 信息年龄是衡量通信系统传输时效性的重要性能指标, 其优化对于实时检测监控和精准决策控制至关重要. 尽管如此, 针对多源多宿大规模物联网, 现有研究缺乏考虑能量收集动态性、互干扰时空差异性以及接入参数时变性对信息年龄的综合影响. 鉴于此, 本文首次面向此类物联网提出一种允许发送节点在能量充足时根据对应实时信息年龄采用不同发送概率的自适应接入协议, 并且联合运用空间点过程、马尔可夫 (Markov) 过程以及不动点理论推导了信息年龄空间分布和系统平均信息年龄, 最后提出一种低复杂度获取次优自适应接入参数的方法. 仿真结果验证了理论分析的准确性, 并表明了所提自适应策略的信息年龄性能明显优于已有策略.

**关键词** 物联网, 信息年龄, 随机接入, 点过程, 马尔可夫过程

## 1 引言

随着无线通信与能量收集技术的快速发展, 通信行业正步入“万物互联”的大规模物联网时代<sup>[1]</sup>, 涉及智慧交通、智能农业、智慧工厂等众多“新基建”应用领域. 全球移动通信系统协会预测全球物联网设备将于 2025 年达到 250 亿个. 在大规模物联网中, 数据传输的时效性对于接收端的实时检测监控和精准决策控制至关重要, 因此需要从接收端角度对数据新鲜度进行准确衡量. 鉴于此, 信息年龄 (age of information, AoI) 最近被提出, 其定义为接收端最新成功接收到的数据自生成以来所经历的时间<sup>[2]</sup>, 相较于时延、吞吐率等传统通信性能指标能够更加有效地刻画数据新鲜度.

显而易见, 相比于单源系统的 AoI 研究<sup>[2~4]</sup>, 大规模物联网各节点的 AoI 不可避免地会受到节点之间的互干扰制约, 并且各节点受互干扰影响程度由于地理位置不同可能具有差异性, 因此需要考虑如何设计随机接入机制以使得各节点在各自合适时机以合适的概率发送数据, 从而有效降低各自 AoI

**引用格式:** 朱奕雯, 张葳, 林艳, 等. 大规模能量收集物联网基于信息年龄的自适应接入. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 1181–1196, doi: 10.1360/SSI-2022-0265  
Zhu Y W, Zhang W, Lin Y, et al. Age-of-information dependent adaptive access for large-scale energy harvesting Internet of Things (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 1181–1196, doi: 10.1360/SSI-2022-0265

和系统平均 AoI. 另外, 能量收集过程会动态地限制各节点的发送数据能力, 从而对互干扰程度造成错综复杂的影响, 亦进一步给大规模物联网 AoI 的建模和优化带来了挑战.

针对多源单宿的大规模物联网已有一系列 AoI 研究工作. 文献 [5] 考虑各节点始终采用相同固定发送概率的 ALOHA 协议, 推导了实时更新下的个体和系统平均 AoI 性能, 并提出了最优发送概率的估计方法. 文献 [6] 同样考虑此类 ALOHA 协议, 分别针对先到先服务和后到先服务机制推导了伯努利 (Bernoulli) 数据流下的个体和系统平均 AoI 性能. 进一步, 文献 [7,8] 提出各发送节点仅在实时 AoI 超出给定门限时方可以固定概率发送数据的自适应接入协议, 并对此门限值和发送概率进行了优化, 验证了相较于 ALOHA 协议的 AoI 性能优势. 尽管如此, 以上工作均未考虑大规模物联网中常见的能量收集因素以及通信距离远近造成的互干扰时空差异性.

针对多源多宿的大规模物联网亦已有一系列 AoI 研究工作. 文献 [9] 在射频能量收集模型中分别用泊松点过程 (Poisson point process, PPP) 和二项点过程模拟主次发送节点的分布, 假设次发送节点从主发送节点处收集能量, 并在贪婪接入策略下推导了次网络平均 AoI 的上下界. 文献 [10] 假设服从 PPP 的节点自功率信标处收集能量, 提出当节点收集到足够能量时以固定概率发送数据的接入策略, 并对发送概率进行了优化. 但文献 [9,10] 缺乏对互干扰时空差异性的考虑, 以系统的平均成功传输概率代替其分布, 从而导致所推导 AoI 性能存在较大误差. 为此, 文献 [11] 在泊松双极网络中采用信干比 (signal to interference ratio, SIR) 的 meta 分布准确刻画了系统成功传输概率空间分布, 并分别在先到先服务和带抢占的后到先服务机制下推导了系统平均 AoI. 文献 [12] 同样基于系统成功传输概率分布分别推导了时间触发和事件触发数据流下的峰值 AoI. 然而, 文献 [9~12] 均规定各发送节点使用相同的固定发送概率, 对于空间上处于干扰源密集位置或者实时 AoI 较大的接收节点并不公平, 会导致该类接收节点的峰值 AoI 过高, 从而影响系统整体 AoI 性能. 鉴于此, 文献 [13] 在先到先服务机制下提出了本地自适应 ALOHA 协议, 允许各发送节点根据一定感知范围内其他节点的位置信息采用相应的固定发送概率, 并基于 meta 分布推导了此自适应协议下的峰值 AoI. 文献 [14] 则进一步将此自适应协议拓展至后到先服务机制, 并额外基于周边节点的队列信息动态决定发送概率, 但受限与发送概率的时变性未对所提自适应协议的 AoI 性能进行理论分析. 需要指出, 此类自适应协议依赖于对周围节点信息的了解, 故将造成额外控制开销, 给物联网节点特别是依赖于能量收集的节点带来较大的能量消耗负担, 因此具有一定的应用局限性. 另外, 文献 [11~14] 均未考虑能量收集因素.

针对上述问题, 本文将综合考虑能量收集动态性和互干扰差异性对 AoI 的影响, 面向多源多宿大规模物联网开展以下三方面工作: (1) 受文献 [7,8] 启发, 首次针对此种物联网提出一种仅依赖于自身信息的低开销分布式自适应接入协议, 即规定各发送节点仅在对应接收节点实时 AoI 达到某一设定门限值并且能量充足时方可以固定概率发送数据; (2) 基于空间点过程、马尔可夫过程以及不动点理论的联合运用, 推导此自适应协议下的 AoI 空间分布以及系统平均 AoI, 并设计低复杂度次优自适应接入参数; (3) 在一系列网络参数下仿真验证理论建模的准确性, 并验证所提出自适应接入相较于其他接入的性能优势.

需要指出, 对本文所提自适应接入的建模需要综合考虑能量收集动态性、互干扰时空差异性、接入参数时变性三者之间的相互耦合, 从而相较于文献 [7,8,14] 的自适应接入建模面临更大的技术挑战. 例如, 本文相较于文献 [7,8] 的难点在于需要在能量收集因素下使用 meta 分布刻画采用动态发送概率的节点之间的互干扰时空差异性, 而相较于文献 [14] 的难点在于需要使用马尔可夫过程刻画受干扰程度不同的节点的状态变化. 另外, 本文所提协议相较于文献 [13,14] 无须额外控制开销即可获得优异性能.

除特定标识习惯 (如  $\pi$  表示圆周率,  $\text{sinc}(\cdot)$  表示 sinc 函数,  $\bar{F}(\cdot)$  表示互补累积分布函数,  $f(\cdot)$  表

表 1 本文涉及主要符号及其含义

Table 1 Main notations and their meanings involved in this paper

Notation	Meaning
$R, \lambda$	Radius of the 2D circular area, spatial density of transmitters/receivers
$\phi^{\text{TX}}$	One realization of the locations of transmitters obeying the PPP
$\phi^{\text{RX}}$	One realization of the locations of receivers obeying the PPP
$N, D$	Number of transmitters/receivers in the 2D circular area, transmitter-receiver distance
$\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k$	Coordinate of the $k$ th transmitter, coordinate of the $k$ th receiver
$\alpha, \mu, E, W$	Path loss factor, energy arrival probability, battery capacity, transmission power
$\Xi_{o,t}$	Energy of transmitter $o$ at the beginning of slot $t$
$\mathbb{1}_{o,t}^{\text{A}}$	Indicator function with value 1 if the event “transmitter $o$ is active at slot $t$ ” happens
$\mathbb{1}_{o,t}^{\text{H}}$	Indicator function with value 1 if the event “transmitter $o$ harvests energy at slot $t$ ” happens
$\text{SIR}_{o,t}, \theta$	SIR of transmitter $o$ at slot $t$ , SIR threshold
$\Delta_{o,t}, \bar{\Delta}_o, \bar{\Delta}$	Instantaneous AoI of transmitter $o$ at slot $t$ , time-average AoI of transmitter $o$ , network average AoI
$p, h$	Transmission probability adopted under the adaptive access protocol, instantaneous AoI threshold
$\Omega$	Successful update probability of an arbitrary transmitter in the network (random variable)
$\omega_o$	Successful update probability of transmitter $o$ (one specific value of $\Omega$ )
$\beta_o$	One-step transition probability of the Markov chain $\{(\Xi_{o,t}, \Delta_{o,t}), t = 1, 2, \dots\}$
$\eta_o(\xi, \delta)$	Steady-state probability of the Markov chain $\{(\Xi_{o,t}, \Delta_{o,t}), t = 1, 2, \dots\}$ being the state $(\xi, \delta)$
$\tau_o$	Steady-state probability that transmitter $o$ is energy-sufficient and receiver $o$ achieves the AoI threshold
$\tau$	Probability that an arbitrary transmitter is energy-sufficient and its receiver achieves the AoI threshold
$\bar{F}_\Omega(\cdot), f_\Omega(\cdot)$	Complementary cumulative distribution function of $\Omega$ , probability density function (PDF) of $\Omega$
$\zeta_o(\delta)$	Steady-state probability of the instantaneous AoI of receiver $o$ being $\delta$
$\zeta(\delta)$	Steady-state probability of the instantaneous AoI of an arbitrary receiver in the network being $\delta$
$p^*$	Optimal transmission probability under the static access protocol
$(p^\circ, h^\circ)$	Suboptimal access parameters under the adaptive access protocol

示概率密度函数,  $B(\cdot, \cdot)$  表示 beta 函数,  $M_1, M_2$  分别表示第一、二阶矩), 本文的符号命名规则如下: (1) 大写英文字母表示可直接测量固定物理参数 (粗体表示二维参数), 小写英文字母表示可调整的设置参数或推导过程所用中间变量; (2) 大写希腊字母表示随机变量, 小写希腊字母表示随机变量的某一次实现 (样本) 结果、统计学方法得到的固定物理参数、转移概率函数、稳态概率函数或某事件发生的概率; (3) 上标使用正体大写字母区分物理意义, 具体而言 “TX/RX” 用于区分 “发送节点” 和 “接收节点”, “A” 表示 “活跃状态”, “H” 表示 “收集能量”; (4) 下标使用斜体小写字母依次表示节点标识号以及时隙序号, 根据各符号物理意义的不同下标可有缺省 (为了简化符号表示, 其他参数不在下标体现); (5) 其他符号,  $|\cdot|$  表示求取欧氏距离,  $\mathbb{R}^2$  表示二维实数空间,  $\mathbb{N}$  表示自然数集,  $\mathbb{P}(\cdot)$  表示某事件发生的概率. 表 1 给出了本文涉及主要符号及其含义.

## 2 系统模型

考虑一个泊松双极网络模型: 在半径为  $R$  米的二维圆形区域内, 发送节点基于密度为  $\lambda$  的 PPP 的一次实现 (样本) 结果  $\phi^{\text{TX}} \triangleq \{\mathbf{X}_k\}_{k=1}^N \subset \mathbb{R}^2$  分布于此区域的各个位置, 其中,  $N$  表示  $\phi^{\text{TX}}$  中的元素

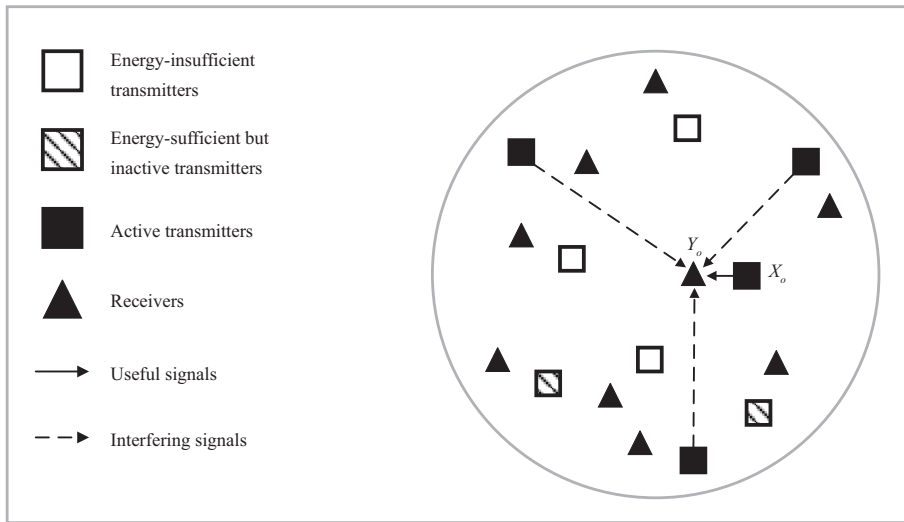


图 1 系统模型  
Figure 1 System model

个数; 而以每个发送节点所处位置  $\mathbf{X}_k$  为圆心、 $D$  米为半径的圆周上任意位置  $\mathbf{Y}_k$  分布一个与其对应的接收节点. 标记所有接收节点的位置坐标集合为  $\phi^{\text{RX}} \triangleq \{\mathbf{Y}_k\}_{k=1}^N \subset \mathbb{R}^2$ , 亦可视为密度为  $\lambda$  的 PPP 的一次实现结果 [15]. 网络时间轴被等长地划分为时隙. 任一发送节点均能够准确地定位到间隙边界, 如果在某间隙开始时刻发送了一个数据包, 则在此间隙末可通过对应接收节点无错误传输的反馈信号获知其在该间隙的传输是否成功. 不失一般性, 下面将聚焦于位于  $\mathbf{X}_o$  的发送节点 (称为发送节点  $o$ ) 及其对应的位于  $\mathbf{Y}_o$  的接收节点 (称为接收节点  $o$ ).

假设每个发送节点需要从自然界收集能量, 并且在能量充足时方可发送数据. 尽管自然界能量到达过程较难准确刻画为一个数学模型, 大多数场景 (如振动能量源) 下的能量到达过程可近似为一个随机 i.i.d. 到达过程 [16], 并且基于 i.i.d. 伯努利能量到达过程的最优策略在任意具有同样均值的 i.i.d. 能量到达过程下仍然具有近优性能 [17]. 鉴于此, 与近年来工作 [18~20] 一致, 本文在理论工作部分假设各节点能量到达过程符合 i.i.d. 伯努利过程, 而在仿真部分展现所提出策略在其他众多能量到达过程的性能表现. 设各发送节点的电池容量为  $E$  个单位, 在每个间隙可以独立地以概率  $\mu$  收集到 1 单位能量, 以概率  $1 - \mu$  收集 0 单位能量, 而发送一次数据包消耗  $E$  单位能量, 接收反馈所消耗能量则忽略不计. 当发送节点在某间隙开始时刻能量为  $E$  时, 可根据第 3 节所述接入协议选择在该间隙发送数据包, 一旦进行数据发送则不能进行能量收集. 因此, 发送节点  $o$  在任一间隙  $t$  存在 3 种可能的状态: 能量不充足状态、能量充足但并未传输状态、传输状态. 前两种属于非活跃状态, 而第 3 种属于活跃状态. 标记发送节点  $o$  在间隙  $t$  开始时刻的能量为  $\Xi_{o,t}$ , 则其随时间  $t$  的演进可表述为

$$\Xi_{o,t+1} = \min\{\Xi_{o,t} + \mathbb{1}_{o,t}^{\text{H}} - \mathbb{1}_{o,t}^{\text{A}}E, E\}, \quad (1)$$

其中,  $\mathbb{1}_{o,t}^{\text{H}}$  为指示函数: 若事件“发送节点  $o$  在间隙  $t$  收集到能量”发生, 则函数值为 1, 否则为 0;  $\mathbb{1}_{o,t}^{\text{A}}$  为指示函数: 若事件“发送节点  $o$  在间隙  $t$  处于活跃状态”发生, 则函数值为 1, 否则为 0.

如图 1 所示, 若发送节点  $o$  在某间隙处于活跃状态, 则其发射信号对于接收节点  $o$  来说即为有用信号, 而在此间隙处于活跃状态的其余发送节点所发射信号对于接收节点  $o$  而言即为干扰信号. 将无线信道建模为瑞利 (Rayleigh) 衰落信道并忽略信道噪声, 路径损耗因子设为  $\alpha \geq 2$ , 发送节点的发射

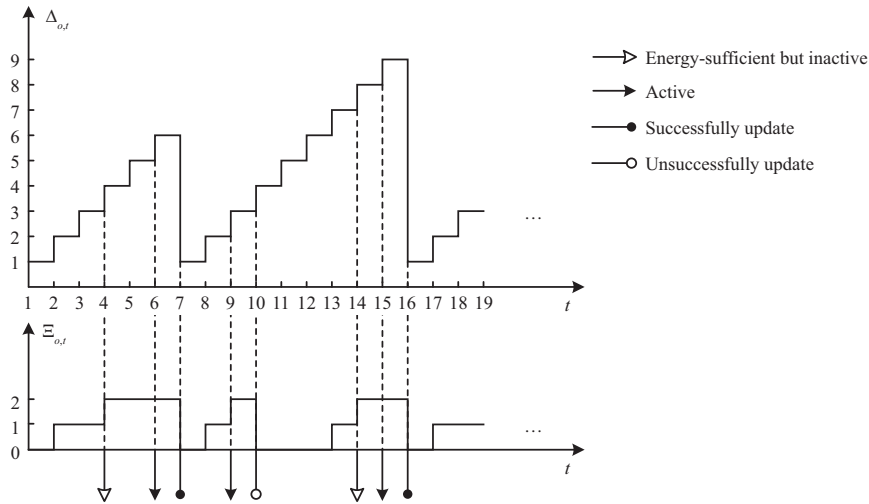


图 2 当  $E = 2$  时  $\Xi_{o,t}$  和  $\Delta_{o,t}$  的演进示例  
 Figure 2 Evolutions of  $\Xi_{o,t}$  and  $\Delta_{o,t}$  when  $E = 2$

功率设为  $W$  瓦特. 进一步, 标记接收节点  $o$  在时隙  $t$  的 SIR 为  $SIR_{o,t}$ , 可计算为

$$SIR_{o,t} = \frac{\mathbb{1}_{o,t}^A \Upsilon_{o,t} W D^{-\alpha}}{\sum_{k=1, k \neq o}^N \mathbb{1}_{k,t}^A \Upsilon_{k,t} W |\mathbf{X}_k - \mathbf{Y}_o|^{-\alpha}}, \quad (2)$$

其中,  $\Upsilon_{k,t}$  为服从均值为 1 的指数分布的随机变量, 表示发送节点  $k$  至接收节点  $o$  在时隙  $t$  的信道衰减. 设定 SIR 阈值为  $\theta$ , 即当  $SIR_{o,t} > \theta$  时, 接收节点  $o$  方可成功接收发送节点  $o$  发送的数据包.

假设任一发送节点所发送的数据包均描述其最新状态信息. 标记接收节点  $o$  在时隙  $t$  的实时 AoI 为  $\Delta_{o,t}$ , 其递推表达式如下:

$$\Delta_{o,t+1} = \begin{cases} \Delta_{o,t} + 1, & \text{if } SIR_{o,t} \leq \theta, \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

显然, 发送节点  $o$  可以通过即时反馈在每个时隙  $t$  末获知  $\Delta_{o,t+1}$ . 进一步, 经过  $T$  个时隙后, 接收节点  $o$  的时间平均 AoI 可计算为

$$\bar{\Delta}_o = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \Delta_{o,t}. \quad (4)$$

因此, 所有接收节点的平均 AoI, 即系统平均 AoI 可计算为

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{\Delta}_k. \quad (5)$$

图 2 展示了当  $E = 2$  时  $\Xi_{o,t}$  和  $\Delta_{o,t}$  的演进过程.

### 3 自适应接入设计

从接收节点  $o$  在时隙  $t$  的实时 AoI 的递推表达式 (3) 可以发现: 发送节点  $o$  在时隙  $t$  成功传输数据相较于无成功传输能够使得  $\Delta_{o,t+1} = \Delta_{o,t} + 1$  降低为 1; 因此  $\Delta_{o,t}$  越高, 此成功传输对系统平

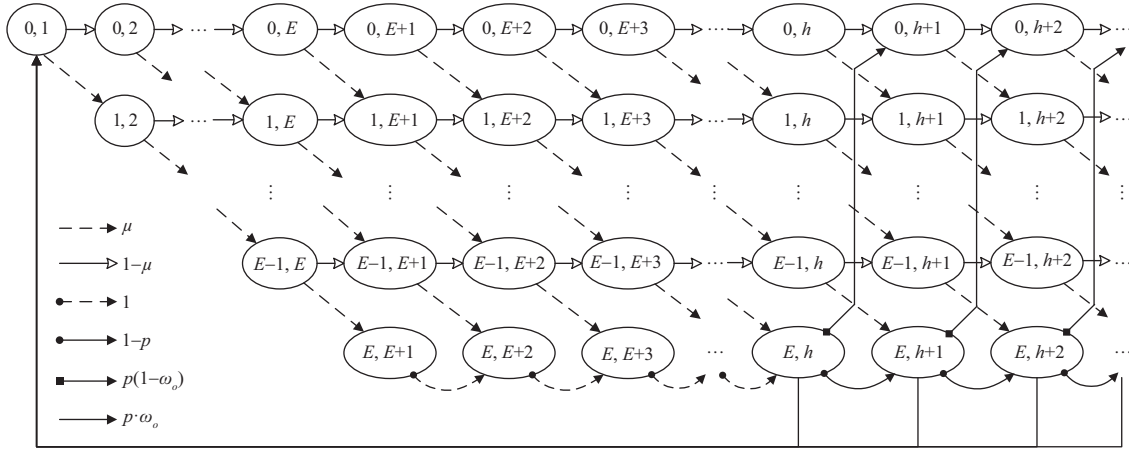


图 3 所提自适应接入协议下  $\{(\Xi_{o,t}, \Delta_{o,t}), t = 1, 2, \dots\}$  的状态转移图

Figure 3 State transition diagram of  $\{(\Xi_{o,t}, \Delta_{o,t}), t = 1, 2, \dots\}$  under the proposed adaptive access protocol

均 AoI 的降低作用越大. 受此启发, 应该使得具有更低对应实时 AoI 的发送节点选择更低发送概率, 以减少对具有更高实时 AoI 的发送节点的干扰, 从而使得后者获得更高成功传输概率.

鉴于此, 所提自适应接入规定发送节点  $o$  在每个时隙  $t$  执行以下接入协议:

- 若能量不足, 即  $\Xi_{o,t} < E$  时, 选择发送概率为 0;
- 若接收节点  $o$  实时 AoI 低于某一门限值  $h$ , 即  $\Delta_{o,t} < h$  时, 选择发送概率为 0;
- 否则, 选择发送概率为  $p > 0$ ;

并称  $(p, h)$  为自适应接入参数. 特别地, 当  $h \leq E + 1$  时, 所提自适应接入协议还原为能量一旦充足, 即采用固定接入概率  $p$  的静态接入协议.

#### 4 自适应接入建模

本节对所提自适应接入协议下的节点行为进行二维马尔可夫建模, 然后推导能量充足且 AoI 达限概率、成功传输概率空间分布以及系统平均 AoI.

考虑到  $\phi^{\text{TX}}$  内各发送节点自身位置 and 对应接收节点位置的不同, 各发送节点的成功传输概率将具有不同取值. 因此, 假设各发送节点的成功传输概率分布不随时间变化, 并标识随机变量  $\Omega$  为各发送节点的成功传输概率, 即  $\Omega \triangleq \mathbb{P}(\text{SIR}_{k,t} > \theta | \mathbb{1}_{k,t}^A = 1, 1 \leq k \leq N)$ . 假设任一发送节点的成功传输概率亦不随时间变化, 并标识  $\omega_o$  为发送节点  $o$  的成功传输概率取值, 即  $\omega_o \triangleq \mathbb{P}(\text{SIR}_{o,t} > \theta | \mathbb{1}_{o,t}^A = 1)$ .

##### 4.1 马尔可夫建模

为了综合考虑自适应接入策略下发送节点  $o$  实时能量及接收节点  $o$  实时 AoI 的变化情况, 考虑随机过程  $\{(\Xi_{o,t}, \Delta_{o,t}), t = 1, 2, \dots\}$ . 其状态空间为  $\{(\xi, \delta) | 0 \leq \xi \leq E, \delta \geq \xi + 1, \xi, \delta \in \mathbb{N}\}$ , 其中  $\xi$  表示发送节点  $o$  在时隙  $t$  开始时刻的实时能量,  $\delta$  表示接收节点  $o$  在时隙  $t$  开始时刻的实时 AoI. 可以发现该随机过程为马尔可夫链, 记其一步转移概率为  $\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta')$ , 即

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') \triangleq \mathbb{P}\left((\Xi_{o,t+1}, \Delta_{o,t+1}) = (\xi', \delta') | (\Xi_{o,t}, \Delta_{o,t}) = (\xi, \delta)\right), \quad (6)$$

其取值如图 3 所示有如下 6 种情况.

(1) 发送节点  $o$  在时隙  $t$  开始时刻能量不充足且在时隙  $t$  收集到 1 单位能量, 即  $\xi' = \xi + 1, \delta' = \delta + 1$  时,

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') = \mu; \quad (7)$$

(2) 发送节点  $o$  在时隙  $t$  开始时刻能量不充足且在时隙  $t$  未收集到能量, 即  $\xi' = \xi < E, \delta' = \delta + 1$  时,

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') = 1 - \mu; \quad (8)$$

(3) 发送节点  $o$  在时隙  $t$  开始时刻能量充足, 但接收节点  $o$  的实时 AoI 低于  $h$  从而使得发送节点  $o$  不能发送数据包, 即  $\xi' = \xi = E, \delta < h, \delta' = \delta + 1$  时,

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') = 1; \quad (9)$$

(4) 发送节点  $o$  在时隙  $t$  开始时刻能量充足, 同时接收节点  $o$  的实时 AoI 大于等于  $h$ , 但发送节点  $o$  选择不发送数据包, 即  $\xi' = \xi = E, \delta \geq h, \delta' = \delta + 1$  时,

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') = 1 - p; \quad (10)$$

(5) 发送节点  $o$  在时隙  $t$  处于能量充足状态, 同时接收节点  $o$  的实时 AoI 大于等于  $h$ , 而发送节点  $o$  选择发送数据包但传输不成功, 即  $\xi = E, \delta \geq h, \xi' = 0, \delta' = \delta + 1$  时,

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') = p(1 - \omega_o); \quad (11)$$

(6) 发送节点  $o$  在时隙  $t$  处于能量充足状态, 同时接收节点  $o$  的实时 AoI 大于等于  $h$ , 而发送节点  $o$  选择发送数据包且传输成功, 即  $\xi = E, \delta \geq h, \delta' = 0, \delta' = 1$  时,

$$\beta_o(\xi, \delta, \xi', \delta') = p \cdot \omega_o. \quad (12)$$

当仅考虑 AoI 收敛的情形时, 所构建马尔可夫链的状态数是有限的, 而有限非周期不可约马尔可夫链存在唯一的平稳分布, 且其平稳分布即为极限分布. 标记处于状态  $(\xi, \delta)$  的稳态概率为  $\eta_o(\xi, \delta)$ , 则根据式 (7)~(12) 所述状态转移概率, 可得到以下关系:

$$\eta_o(\xi, \delta) = \begin{cases} (1 - \mu)\eta_o(\xi, \delta - 1), & \xi = 0, 2 \leq \delta \leq h, \\ (1 - \mu)\eta_o(\xi, \delta - 1) + p(1 - \omega_o)\eta_o(E, \delta - 1), & \xi = 0, \delta \geq h + 1, \\ \mu\eta_o(\xi - 1, \delta - 1), & 1 \leq \xi \leq E, \delta = \xi + 1, \\ \mu\eta_o(\xi - 1, \delta - 1) + (1 - \mu)\eta_o(\xi, \delta - 1), & 1 \leq \xi \leq E - 1, \delta \geq \xi + 2, \\ \mu\eta_o(\xi - 1, \delta - 1) + \eta_o(\xi, \delta - 1), & \xi = E, E + 2 \leq \delta \leq h, \\ \mu\eta_o(\xi - 1, \delta - 1) + (1 - p)\eta_o(\xi, \delta - 1), & \xi = E, \delta \geq h + 1, \\ p\omega_o \sum_{\delta=h}^{\infty} \eta_o(E, \delta), & \xi = 0, \delta = 1. \end{cases} \quad (13)$$

基于式 (13) 和概率的归一化公式  $\sum_{\xi=0}^E \sum_{\delta=\xi+1}^{\infty} \eta_o(\xi, \delta) = 1$  可得到  $\eta_o(0, 1)$  的闭合表达式

$$\eta_o(0, 1) = \frac{\mu p \omega_o}{\mu + pE + sp\omega_o}, \quad (14)$$

其中,  $s$  表示比值:

$$s = \frac{\sum_{\delta=E+1}^{h-1} \eta_o(E, \delta)}{\eta_o(0, 1)} = \mu^E \sum_{\delta=0}^{h-E-2} \sum_{m=0}^{\delta} \binom{E-1+m}{m} (1-\mu)^m. \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (13) 可获得所有  $\eta_o(\xi, \delta)$  的闭合表达式.

#### 4.2 能量充足且 AoI 达限概率

记发送节点  $o$  能量充足且接收节点  $o$  的 AoI 达到门限值  $h$  的概率为  $\tau_o$ , 基于式 (13)~(15) 可获得

$$\begin{aligned} \tau_o &\triangleq \mathbb{P}(\Xi_{o,t} = E, \Delta_{o,t} \geq h) \\ &= \sum_{\delta=\max\{h, E+1\}}^{\infty} \eta_o(E, \delta) \\ &= \frac{1}{p\omega_o} \eta_o(0, 1) \\ &= \frac{\mu}{\mu + pE + sp\omega_o}. \end{aligned} \quad (16)$$

由此可见,  $\tau_o$  受  $\omega_o$  影响, 这是因为事件“实时 AoI 大于等于门限”与节点在空间上所处干扰环境有关, 干扰越大, 成功传输概率越低, 则实时 AoI 达到门限值的概率越高, 而  $\tau_o$  也相应越高. 特别地, 当  $h \leq E+1$  即采用静态接入协议时,  $s = 0$ , 则  $\tau_o = \frac{\mu}{\mu+pE}$ , 显而易见与  $\omega_o$  无关.

标记随机变量  $\Omega$  的概率密度函数为  $f_{\Omega}(\omega)$ , 即  $\int_{\omega_1}^{\omega_2} f_{\Omega}(\omega) d\omega \triangleq \mathbb{P}(\omega_1 < \Omega \leq \omega_2)$ ,  $0 \leq \omega_1 < \omega_2 \leq 1$ . 进一步, 对  $\tau_o$  关于  $\Omega$  求期望, 可得到系统中任一发送节点的能量充足且年龄达限概率  $\tau$ :

$$\tau = \int_0^1 \tau_o f_{\Omega}(\omega) d\omega. \quad (17)$$

#### 4.3 成功传输概率空间分布

标记  $\Omega$  的互补累积分布函数为  $\bar{F}_{\Omega}(\omega)$ , 即  $\bar{F}_{\Omega}(\omega) \triangleq \mathbb{P}(\Omega > \omega)$ ,  $\omega \in [0, 1]$ . 根据文献 [21], 可利用 beta 分布获得  $\bar{F}_{\Omega}(\omega)$  的近似估计如下:

$$\bar{F}_{\Omega}(\omega) \approx 1 - \frac{\int_0^{\omega} v^{a_1-1} (1-v)^{a_2-1} dv}{B(a_1, a_2)}, \quad (18)$$

并且可获得  $f_{\Omega}(\omega)$  的近似估计如下:

$$f_{\Omega}(\omega) \approx \frac{\omega^{a_1-1} (1-\omega)^{a_2-1}}{B(a_1, a_2)}, \quad (19)$$

其中,  $B(a_1, a_2) = \int_0^1 v^{a_1-1} (1-v)^{a_2-1} dv$  为 beta 函数, 而参数  $a_1, a_2$  分别为

$$a_1 = \frac{M_1(M_1 - M_2)}{M_2 - M_1^2}, \quad a_2 = \frac{(1 - M_1)(M_1 - M_2)}{M_2 - M_1^2}. \quad (20)$$

这里的  $M_1, M_2$  分别为随机变量  $\Omega$  的第一和第二阶矩, 具体表达式如下:

$$M_1 = \exp\left(\frac{-\lambda\pi D^2}{\text{sinc}(\frac{2}{\alpha})} \theta^{\frac{2}{\alpha}} p\tau\right), \quad (21)$$



$$M_2 = \exp\left(\frac{-\lambda\pi D^2}{\text{sinc}(\frac{2}{\alpha})}\theta^{\frac{2}{\alpha}}\left[2p\tau + \left(\frac{2}{\alpha} - 1\right)p^2\tau^2\right]\right). \quad (22)$$

因此,如式(19)所示, $f_{\Omega}(\omega)$ 的求解以求解 $\tau$ 为前提,而如式(17)所示, $\tau$ 的求解过程依赖于 $f_{\Omega}(\omega)$ ,可见二者相互耦合.为此,可利用不动点理论对二者相互迭代直至收敛.具体步骤如下:

(1) 设置  $n = 1$ , 给定  $\tau$  迭代初值  $\tau^{(0)} = \frac{\mu}{\mu + pE}$ , 并根据式(19)计算  $f_{\Omega}(\omega)$  的迭代初值  $f_{\Omega}(\omega)^{(0)}$ , 给定迭代精度参数  $\epsilon$ ;

(2) 根据式(17)及(19)分别更新  $\tau^{(n)}$  及  $f_{\Omega}(\omega)^{(n)}$ ;

(3) 若  $|\tau^{(n)} - \tau^{(n-1)}| < \epsilon$ , 转到步骤(4); 否则, 令  $n = n + 1$ , 并转到步骤(2);

(4) 收敛解为  $\tau = \tau^{(n)}$  和  $f_{\Omega}(\omega) = f_{\Omega}(\omega)^{(n)}$ .

需要指出的是, 迭代初值  $\tau^{(0)}$  为  $h \leq E - 1$ , 即静态接入协议下式(16)的取值. 本文将在第6节仿真部分展现初值选法的合理性以及不动点迭代法的收敛性.

#### 4.4 AoI 空间分布

将接收节点  $o$  实时 AoI 为  $\delta$  的稳态概率记为  $\zeta_o(\delta)$ ,  $\delta \geq 1$ , 并且可获得

$$\zeta_o(\delta) = \sum_{\xi=0}^{\min\{\delta-1, E\}} \eta_o(\xi, \delta), \quad \delta \geq 1. \quad (23)$$

利用 4.3 小节求出的  $f_{\Omega}(\omega)$  对其进行加权, 即可得到任一接收节点实时 AoI 为  $\delta$  的概率:

$$\zeta(\delta) = \int_0^1 \zeta_o(\delta) f_{\Omega}(\omega) d\omega, \quad \delta \geq 1. \quad (24)$$

对系统的实时 AoI 求期望, 可得到系统平均 AoI:

$$\bar{\Delta} = \sum_{\delta=1}^{\infty} \delta \cdot \zeta(\delta). \quad (25)$$

## 5 自适应接入启发式优化

为了设置自适应接入参数  $(p, h)$  的最优取值以最小化系统平均 AoI, 可以将  $\bar{\Delta}$  视为  $p$  和  $h$  的函数. 尽管如此, 由于  $\bar{\Delta}$  表达式(25)的计算需要复杂的迭代过程, 可以发现不易于通过求导方式求解自适应接入参数  $(p, h)$  的最优值. 因此, 受文献[22]启发, 可以基于  $p$  的合适固定取值而对  $h$  进行一维搜索以获取系统平均 AoI 的优异性能. 所采用的启发式优化方法具体如下: 首先令  $h \leq E + 1$ , 在静态接入协议下获取最优发送概率  $p^*$ ; 其次设置自适应次优接入参数为  $(p^\diamond = \min\{2p^*, 1\}, h^\diamond)$ , 然后通过一维搜索获取能够在该次优接入参数下使得  $\bar{\Delta}$  最小的  $h^\diamond$  取值.

设置  $p^\diamond = \min\{2p^*, 1\}$  的考虑在于: 引入实时 AoI 门限值  $h$  后, 同一时刻符合传输条件的发送节点数明显减少, 此时系统中干扰已显著降低, 实时 AoI 高于  $h$  的节点无须再以较低的发送概率去换取更高的成功传输概率, 而此设置也不会使得发送概率过高而限制引入  $h$  对 AoI 的优化效果. 本文将在第6节仿真部分展现该做法的合理性.

表 2 固定系统参数  
Table 2 Fixed simulation parameters

Parameter	Value
Radius of the 2D circular area, $R$	30 m
Path loss factor, $\alpha$	4
Transmitter-receiver distance, $D$	0.5 m
Battery capacity, $E$	5 units
Simulation time, $T$	50000 slots

## 6 仿真分析

为验证本文所提传输策略的有效性, 本节在多组参数下对贪婪接入策略<sup>[9]</sup>、最优静态接入策略及所提次优自适应接入策略进行理论和仿真值对比. 需要指出, 贪婪策略可视为静态策略的特例, 而静态策略又可视为自适应策略中设置  $h \leq E + 1$  的特例, 因此均可使用本文建模方法获得理论值. 本节固定系统参数如表 2 所示, 其余参数将在后文给出.

### 6.1 伯努利能量到达

在伯努利能量到达下, 首先对理论推导进行验证, 具体包括成功传输概率的空间分布以及系统实时 AoI 的平均稳态分布, 然后对系统的平均 AoI 进行仿真验证.

图 4 对比了 3 种策略下的成功传输概率空间分布  $f_{\Omega}(\omega)$ . 可见, 采用 4.3 小节所述 beta 分布及不动点理论可较为准确地对  $f_{\Omega}(\omega)$  进行近似. 图 4(a)~(c) 均显示贪婪策略下成功传输概率的分布集中于  $\omega$  取值较低的区间, 最优静态策略次之, 而次优自适应策略最高. 这是因为贪婪策略下各发送节点均频繁地发送数据包而导致传输极易失败; 最优静态策略以降低发送概率为代价提高成功传输概率; 而次优自适应策略在此基础上引入  $h$ , 因此对于成功传输概率分布的优化更为明显. 将图 4(a)~(c) 进行对比, 可见在贪婪策略下, 无论是提高 SIR 阈值  $\theta$  而使得接收节点的成功解调变得更为困难, 还是提高充电概率  $\mu$  使得系统中的节点更易充满电而进行频繁传输, 继而增大相互间干扰, 都将令  $f_{\Omega}(\omega)$  的曲线向  $\omega$  值减小的方向移动, 而最优静态和次优自适应策略通过调整接入参数可将  $f_{\Omega}(\omega)$  曲线维持在  $\omega$  取值较大的地方.

图 5 对比了 3 种策略下的系统 AoI 平均稳态分布. 可以发现 3 种策略的仿真值均匹配于理论预测, 从而验证了第 4 节建模的准确性. 图 5(a)~(c) 均显示系统 AoI 的平均稳态分布图线具有很明显的“平台”特征. 此现象原因可根据式 (24) 获知: 在贪婪和静态策略中实时 AoI 小于等于  $E + 1$  的稳态概率均相等, 而在自适应策略中实时 AoI 小于等于  $h$  的稳态概率也相等且均等于各传输策略下构建的马尔可夫链处于状态  $(0, 1)$  的平均稳态概率. 因此, 可由“平台”宽度直观地获取电池容量或自适应策略中所设的 AoI 门限值. 例如, 将图 5(a) 与 (b) 进行对比可知  $\theta$  越高, 则对应次优自适应策略的  $h^{\diamond}$  值选取也应更大. 此外, 3 种策略中贪婪策略下实时 AoI 值为 1 的稳态概率最低, 说明该策略下节点的信息更新很不及时, 系统的平均 AoI 性能较差; 而自适应和静态策略相比, 式 (14) 中  $s$  不为零, 因此自适应比静态情形多出一个正项, 故静态策略下实时 AoI 值为 1 的稳态概率要高于自适应情形, 但前者稳态分布的“拖尾”现象更严重, 故二者存在折中. 因此, 自适应策略中合理的自适应接入参数选取将弥补其实时 AoI 值为 1 的稳态概率不够高的缺陷.

图 6 对比了 3 种策略下的系统平均 AoI. 可以发现各种情况下理论与仿真值均匹配或基本匹配.

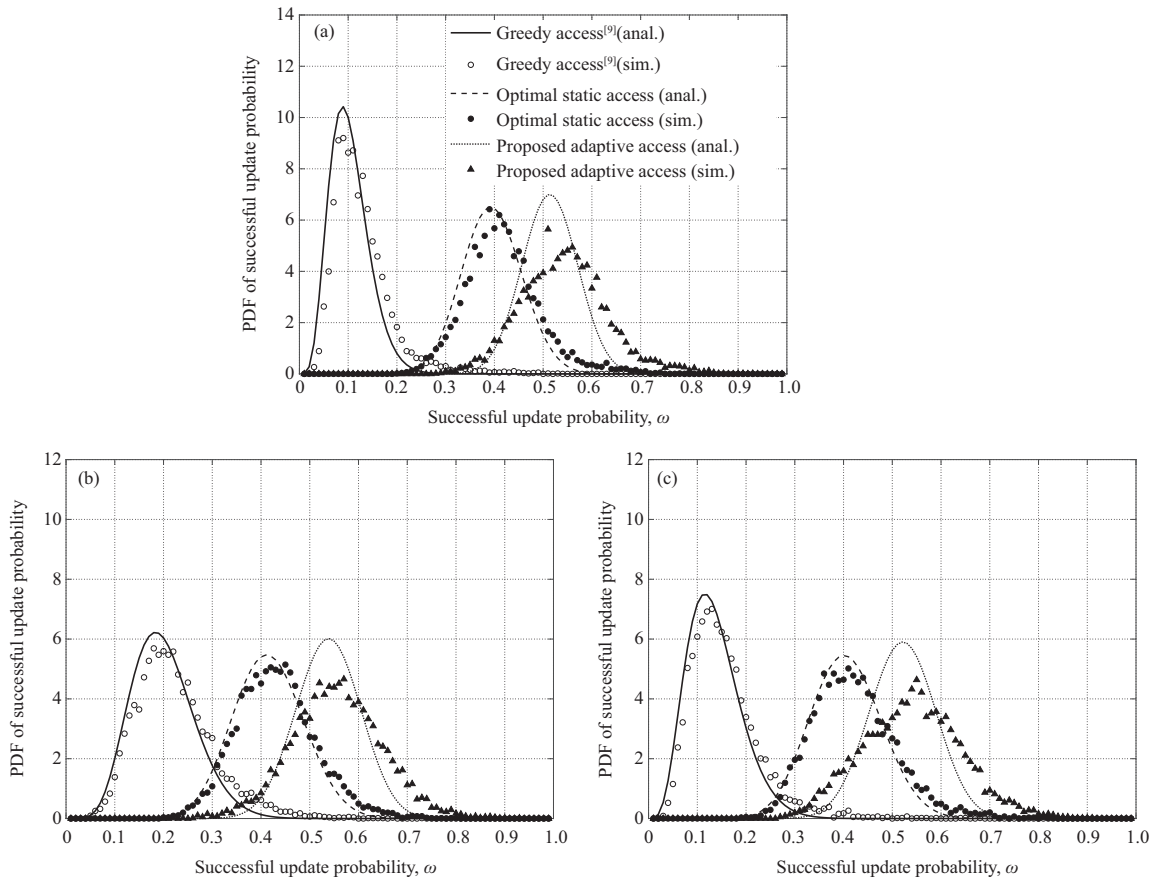


图 4 3 种策略在伯努利能量到达下成功传输概率空间分布理论与仿真对比

Figure 4 Comparisons of spatial distributions of successful update probability under the three protocols with Bernoulli energy arrival. (a)  $\mu = 0.7, \lambda = 1.5, \theta = 100$ ; (b)  $\mu = 0.7, \lambda = 1.5, \theta = 50$ ; (c)  $\mu = 0.9, \lambda = 1.5, \theta = 50$

如图 6(a) 和 (b) 所示, 各策略下系统平均 AoI 均随着  $\lambda$  或  $\theta$  的提高而增加. 这是因为无论是系统中节点数的增加导致节点间相互干扰更为严重, 还是信干比阈值的提高导致传输成功的条件更为严苛, 都将使得成功传输概率的分布向  $\omega$  取值较小的区间移动, 因此数据包的更新变得更为困难. 此外, 随着二者的提高, 贪婪策略下系统平均 AoI 的理论与仿真匹配度逐渐下降, 这是因为 beta 分布更适于对成功传输概率的空间分布集中于  $\omega$  取值较大的场景进行近似<sup>[21]</sup>, 并且因 AoI 与  $\omega$  有近似反比的关系, 故当系统整体的成功传输概率偏低时, 为使系统平均 AoI 的理论与仿真相匹配, 需要对  $f_{\Omega}(\omega)$  的理论与仿真的吻合程度提出更为严格的要求, 在此情况下 beta 分布可能不再适用. 另外, 3 幅子图均显示次优自适应策略相比于其他两种策略具有更佳的平均 AoI 性能, 且其优势基本随着  $\lambda, \theta, \mu$  的提高而逐渐变大. 这是因为三者的提高均使得系统的成功传输概率降低, 从而使得自适应策略对于实时 AoI 较高节点成功传输概率的优化更为明显, 因此对于改善系统的平均 AoI 更为有效.

## 6.2 其他能量到达

尽管本文理论工作基于伯努利能量到达, 但考虑到实际场景中能量到达过程的多样性, 本小节将检验所提出自适应策略在以下 4 种非伯努利能量到达过程下的性能表现, 包括 (1) 均匀分布<sup>[17]</sup>: 各发送节点在每个时隙可以收集的能量单位数为服从  $[0, 2\mu]$  内均匀分布的随机变量; (2) 指数分布 (经

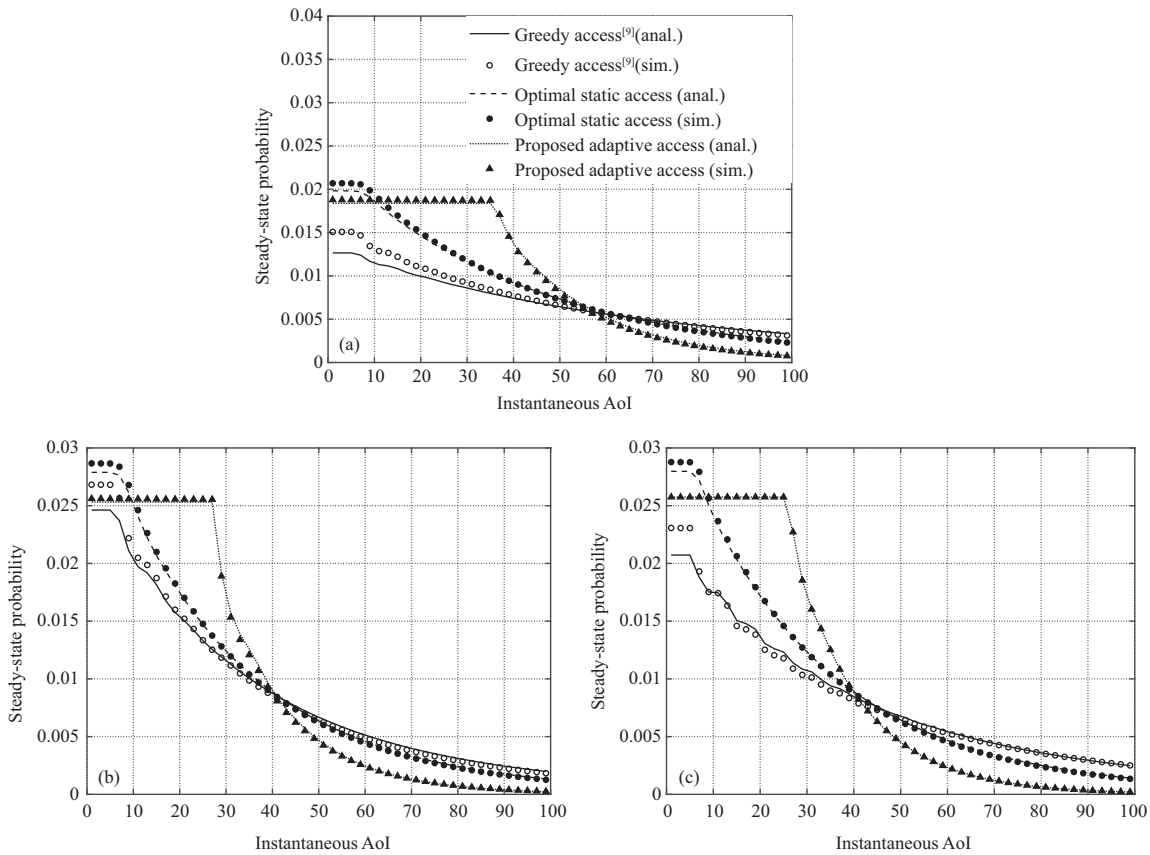


图 5 3 种策略下系统 AoI 在伯努利能量到达下的平均稳态分布理论与仿真对比

Figure 5 Comparisons of average steady-state distributions of AoI under the three protocols with Bernoulli energy arrival. (a)  $\mu = 0.7, \lambda = 1.5, \theta = 100$ ; (b)  $\mu = 0.7, \lambda = 1.5, \theta = 50$ ; (c)  $\mu = 0.9, \lambda = 1.5, \theta = 50$

实验数据验证适用于压电式振动能量源)<sup>[23]</sup>: 各发送节点在每个时隙可以收集的能量单位数为服从均值为  $\mu$  的指数分布的随机变量; (3) Markov 能量到达 (经实验数据验证适用于太阳能)<sup>[23]</sup>: 能量源状态符合双状态 (GOOD, BAD) 的 Markov 链, 当能量源处于 GOOD, BAD 状态时各发送节点在每个时隙分别可以收集 0.8, 0.2 能量单位, 设置 GOOD 至 BAD 转移概率为 0.06、BAD 至 GOOD 转移概率为  $\frac{0.06(\mu-0.2)}{0.8-\mu}$  以确保能量收集均值为  $\mu$ ; (4) 射频能量收集<sup>[24]</sup>: 各发送节点从周边服从密度为 0.2 的 PPP 的无线射频能量站所发射的无线信号 (与发送节点工作频率不同) 中提取能量, 任一发送节点和任一能量站之间信道为瑞利衰落信道、路径损耗因子为  $\alpha$ 、信道衰减值为服从均值为 1 的指数分布的随机变量, 设置能量站发射功率以确保所有发送节点平均后能量收集均值为  $\mu$ .

图 7(a) 和 (b) 分别对比了实际最优静态策略 (从仿真实验中获取最优设置而非理论获得) 和所提出自适应策略在均匀分布、指数分布等 i.i.d. 能量到达以及 Markov 能量到达下的系统平均 AoI. 可以发现, 尽管误差相对于图 6(a) 有所增加, 本文基于伯努利能量到达的理论模型仍然可以较准确评估所提出自适应策略在这些能量到达下的 AoI 性能, 并且此性能仍然明显优于实际最优静态策略且优势随着  $\lambda$  的提高而变大, 因此验证了本文工作对于其他与位置无关的能量到达过程的适用性. 图 7(c) 则在与位置相关的射频能量收集模型下对比了各策略的系统平均 AoI. 正如预期, 由于本文理论模型假设能量收集过程与位置无关, 所提自适应策略的理论值与仿真值存在明显误差, 但其性能仍然在绝大多

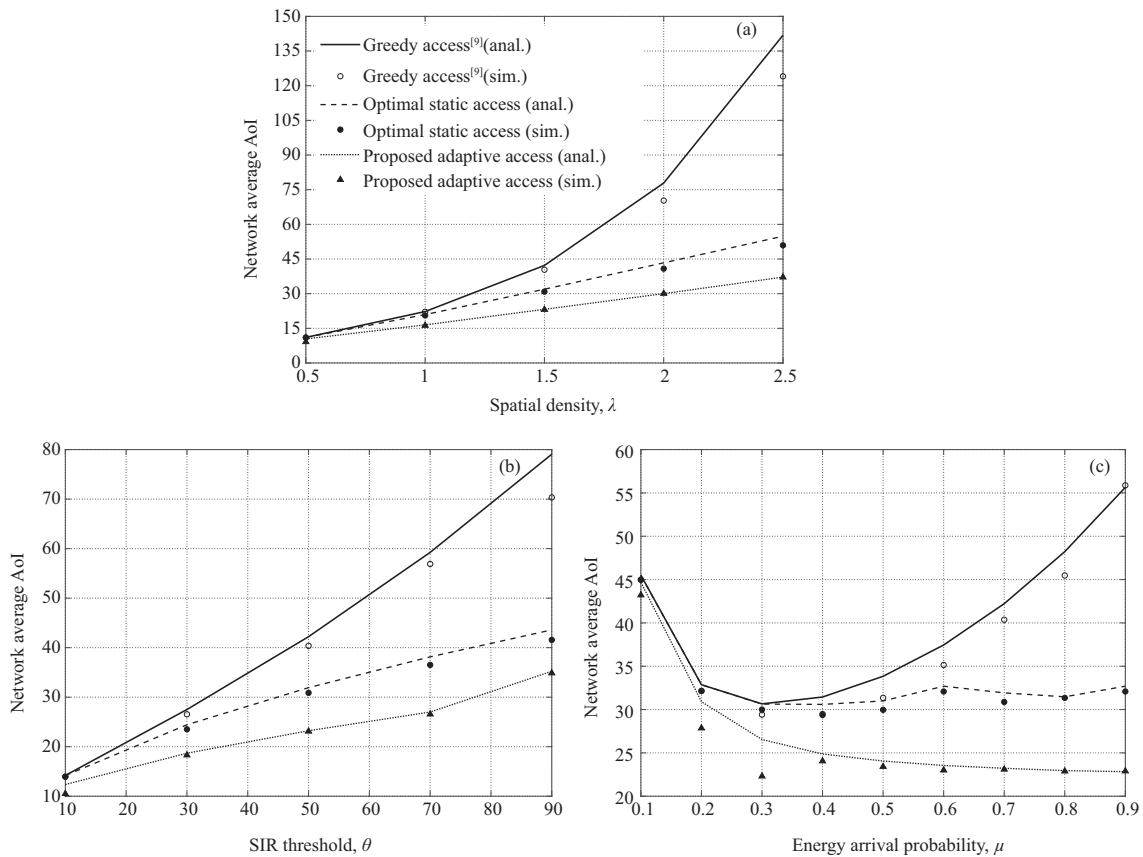


图 6 3 种策略在伯努利能量到达下系统 AoI 的理论与仿真对比

**Figure 6** Comparisons of network average AoI under the three protocols with Bernoulli energy arrival. (a)  $\mu = 0.7, \theta = 50$ ; (b)  $\mu = 0.7, \lambda = 1.5$ ; (c)  $\lambda = 1.5, \theta = 50$

数情况 (除  $\lambda = 0.5$  时) 下优于实际最优静态策略, 因此表明该自适应策略在射频能量收集模型下仍然有助于改善 AoI 性能. 而当  $\lambda = 0.5$  时, 所提自适应策略会采取接入参数 ( $p^\circ = 1, h^\circ = 11$ ), 使得离能量站较近而且容易收集充足能量的部分发送节点几乎持续发送数据, 从而造成严重互干扰而使得部分发送节点始终不能成功发送数据, 进而引起其对应 AoI 持续增加. 鉴于此, 由于自适应策略在此情况下的系统平均 AoI 过大, 图 7(c) 未体现此情况的对比. 此现象的原因在于: 所提自适应策略基于的建模忽略了位置对射频能量收集的影响, 而以全网络射频能量收集平均值估计成功发送概率分布, 在  $\lambda$  较小时会造成较大误差, 从而使得部分发送节点过于激进而严重干扰其他发送节点.

## 7 结束语

本文综合考虑能量收集动态性、互干扰时空差异性以及接入参数自适应性, 对多源多宿大规模物联网的 AoI 优化问题进行了研究. 首次针对此种物联网提出了一种允许具有不同对应实时 AoI 的发送节点在能量充足时采用不同发送概率的自适应接入协议, 并且基于空间点过程、马尔可夫过程以及不动点理论推导了此协议下的 AoI 空间分布及系统平均 AoI, 最后提出了以低复杂度设计次优自适应接入参数的方法. 一系列网络参数下的仿真结果验证了理论建模的准确性, 并验证了所提策略相较于其他策略的 AoI 性能优势. 本文的理论与仿真结果对大规模物联网的传输时效性优化具有重要意义.

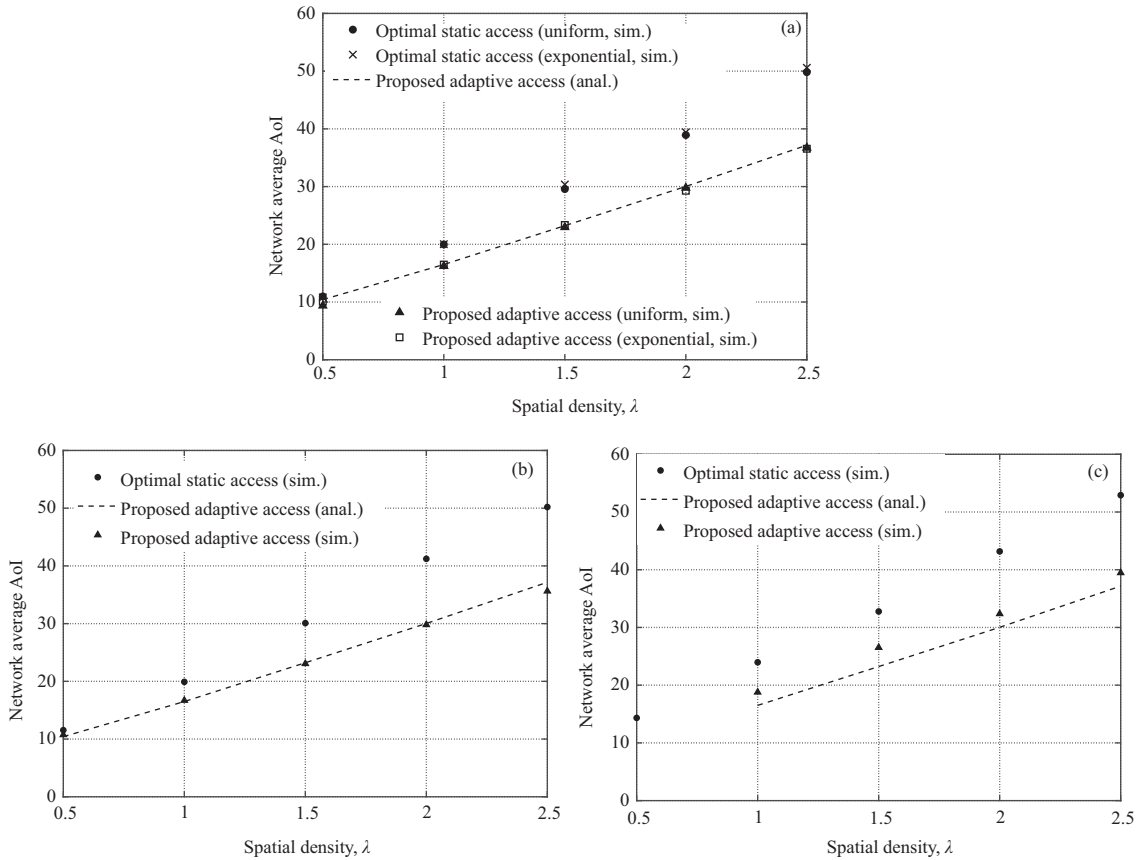


图 7 在  $\mu = 0.7, \theta = 50$  时非伯努利能量到达下的系统 AoI 的理论与仿真对比. (a) 其他 i.i.d. 能量到达; (b) Markov 能量到达; (c) 射频能量收集

Figure 7 Comparisons of network average AoI under non-Bernoulli energy arrivals when  $\mu = 0.7, \theta = 50$ . (a) Other i.i.d. energy arrivals; (b) Markov energy arrival; (c) radio frequency energy harvesting

本文所采用建模方法需要假设各节点能量到达过程与节点位置无关, 可适用于任意 i.i.d. 能量到达过程, 并且可拓展至与位置无关的非 i.i.d. 能量到达过程<sup>[23]</sup> (例如, 通过在 4.1 小节所构建 Markov 链增加状态刻画 Markov 能量到达). 后续工作将对现有建模方法进行改进以支持与位置相关的射频能量收集模型<sup>[24]</sup>, 并将自适应策略拓展至考虑由位置和实时 AoI 共同决定的发送概率. 另外, 后续工作将应用所提出策略于真实能量收集场景以检验实际性能.

## 参考文献

- 1 Fan P Z, Li L, Chen H, et al. Random access for massive Internet of things: current status, challenges and opportunities. *J Commun*, 2021, 42: 1–21 [范平志, 李里, 陈欢, 等. 面向大规模物联网的随机接入: 现状, 挑战与机遇. *通信学报*, 2021, 42: 1–21]
- 2 Kaul S, Gruteser M, Rai V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks. In: *Proceedings of the 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, Salt Lake City, 2011. 350–358
- 3 Sac H, Bacinoglu T, Uysal-Biyikoglu E, et al. Age-optimal channel coding blocklength for an M/G/1 queue with HARQ. In: *Proceedings of IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Kalamata, 2018. 1–5

- 4 Kaul S, Yates R, Gruteser M. Real-time status: how often should one update? In: Proceedings of IEEE INFOCOM, Orlando, 2012. 2731–2735
- 5 Yates R, Kaul S. Status updates over unreliable multiaccess channels. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Aachen, 2017. 331–335
- 6 Kosta A, Pappas N, Ephremides A, et al. Age of information performance of multiaccess strategies with packet management. *J Commun Netw*, 2019, 21: 244–255
- 7 Chen H, Gu Y, Liew S. Age-of-information dependent random access for massive IoT networks. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Toronto, 2020. 930–935
- 8 Yavascan O T, Uysal E. Analysis of slotted ALOHA with an age threshold. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2021, 39: 1456–1470
- 9 Leng S, Ni X, Yener A. Age of information for wireless energy harvesting secondary users in cognitive radio networks. In: Proceedings of IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), Monterey, 2019. 353–361
- 10 Sleem O, Leng S, Yener A. Age of information minimization in wireless powered stochastic energy harvesting networks. In: Proceedings of the 54th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, 2020. 1–6
- 11 Yang H H, Xu C, Wang X, et al. Understanding age of information in large-scale wireless networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2021, 20: 3196–3210
- 12 Emara M, Elsayy H, Bauch G. A spatiotemporal model for peak AoI in uplink IoT networks: time versus event-triggered traffic. *IEEE Internet Things J*, 2020, 7: 6762–6777
- 13 Yang H H, Arafa A, Quek T Q S, et al. Optimizing information freshness in wireless networks: a stochastic geometry approach. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2021, 20: 2269–2280
- 14 Yang H H, Arafa A, Quek T Q S, et al. Spatiotemporal analysis for age of information in random access networks under last-come first-serve with replacement protocol. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2022, 21: 2813–2829
- 15 Baccelli F, Blaszczyszyn B. *Stochastic Geometry and Wireless Networks: Vol I Theory*. Hanover: Now Publishers, 2010. 272–273
- 16 Ulukus S, Yener A, Erkip E, et al. Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2015, 33: 360–381
- 17 Shaviv D, Özgür A. Universally near optimal online power control for energy harvesting nodes. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2016, 34: 3620–3631
- 18 Zibacenejad A, Chen J. The optimal power control policy for an energy harvesting system with look-ahead: Bernoulli energy arrivals. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Paris, 2019. 116–120
- 19 Kazerouni A, Özgür A. Optimal online strategies for an energy harvesting system with Bernoulli energy recharges. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), Mumbai, 2015. 235–242
- 20 Zibacenejad A, Parhizgar P. Power management policies for slowly varying Bernoulli energy harvesting channels. In: Proceedings of Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT), Tehran, 2018. 1–6
- 21 Haenggi M. The meta distribution of the SIR in Poisson bipolar and cellular networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2016, 15: 2577–2589
- 22 Sun J, Jiang Z, Krishnamachari B, et al. Closed-form whittle’s index-enabled random access for timely status update. *IEEE Trans Commun*, 2020, 68: 1538–1551
- 23 Testa D D, Michelusi N, Zorzi M. Optimal transmission policies for two-user energy harvesting device networks with limited state-of-charge knowledge. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2016, 15: 1393–1405
- 24 Lu X, Wang P, Niyato D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2015, 17: 757–789

## Age-of-information dependent adaptive access for large-scale energy harvesting Internet of Things

Yiwen ZHU<sup>1</sup>, Wei ZHANG<sup>1</sup>, Yan LIN<sup>1</sup>, Yuan-Hsun LO<sup>2</sup> & Yijin ZHANG<sup>1\*</sup>

1. *School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*

2. *Department of Applied Mathematics, Pingtung University, Pingtung 900391, China*

\* Corresponding author. E-mail: yijin.zhang@njjust.edu.cn

**Abstract** Age-of-information (AoI) is an important performance metric to measure the timeliness of delivery in communication systems, and its optimization is crucial for real-time monitoring and accurate control. However, for a multi-source, multi-destination, large-scale Internet of Things (IoT), the joint impact of dynamic energy harvesting, spatiotemporal mutual interference, and time-varying access parameters is not well understood. In this paper, we propose a novel adaptive access protocol for the IoT that allows transmitters with enough energy to adopt different transmission probabilities according to the corresponding instantaneous AoI. Under this protocol, the spatial distribution of AoI and the system average AoI are derived by relying on the joint use of theories of the spatial point process, the Markov process, and fixed points; moreover, a low complexity method for obtaining suboptimal adaptive access parameters is proposed. The simulation results verify the accuracy of the theoretical analysis and show that the proposed policy enjoys significantly lower AoI than existing policies.

**Keywords** Internet of Things, age of information, random access, point process, Markov process