

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于无线携能通信的传感云系统Sink节点最优能效策略

王哲, 李陶深, 葛丽娜, 吴敏, 刘鹏, 汤卫东

引用本文:

王哲, 李陶深, 葛丽娜, 等. 基于无线携能通信的传感云系统Sink节点最优能效策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1929–1938.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1628>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 认知智能电网中基于能效优化的频谱分配策略

Spectrum allocation strategy based on energy efficiency optimization in cognitive smart grid

*控制与决策*. 2021, 36(8): 1901–1910 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1448>

### 基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

*控制与决策*. 2021, 36(4): 947–952 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

### 基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

*控制与决策*. 2021, 36(4): 947–952 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

### 基于超级节点的分布式传感器节点定位算法

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes

*控制与决策*. 2020, 35(12): 2898–2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

### 微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

# 基于无线携能通信的传感云系统Sink节点最优能效策略

王哲<sup>1†</sup>, 李陶深<sup>2</sup>, 葛丽娜<sup>1</sup>, 吴敏<sup>2,3</sup>, 刘鹏<sup>3</sup>, 汤卫东<sup>1</sup>

(1. 广西民族大学人工智能学院, 南宁 530006; 2. 广西大学计算机与电子信息学院, 南宁 530004; 3. 广西电网有限责任公司, 南宁 530023)

**摘要:** 无线携能通信能够提升传感器网络的能量效率和资源复用率,然而当前研究均优化无线携能通信参数以实现系统增益,忽略了信道质量变化对系统能量效率的影响.为了解决该问题,针对无线携能通信的传感云系统,提出基于最优停止理论的Sink节点能效优化策略.首先设计下行无线携能通信、上行信息传输的工作时序,其中下行阶段Sink节点采用机会调度策略,选择信道质量较好时刻开始下行链路传输.Sink节点能效定义为系统所实现的上行吞吐量与下行能耗之比.继而基于最优停止理论,建立Sink节点能效最优化问题并证明该问题存在最优停止规则.最后设计最优能效算法求解Sink节点最优下行无线携能传输时刻,从而制定相应的能效优化策略.通过仿真实验验证最优能效算法的有效性与性能,同时通过不同策略的对比验证所提策略在提升Sink节点能效方面的优势.

**关键词:** 无线携能通信; 能效; 信道质量; 最优停止理论; 传感云

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1628

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 王哲,李陶深,葛丽娜,等.基于无线携能通信的传感云系统Sink节点最优能效策略[J].控制与决策,2021,36(8):1929-1938.

## Optimal energy efficiency optimization strategy for SWIPT-enabled sensor-cloud system

WANG Zhe<sup>1†</sup>, LI Tao-shen<sup>2</sup>, GE Li-na<sup>1</sup>, WU Min<sup>2,3</sup>, LIU Peng<sup>3</sup>, TANG Wei-dong<sup>1</sup>

(1. Institute of Artificial Intelligence, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China; 2. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Power Grid Co., Ltd, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) can improve the energy efficiency and resource reuse rate of sensor networks. However, current studies optimize the parameters of SWIPT to achieve system gains, ignoring the impact of channel quality changes on system energy efficiency. In order to solve this problem, this paper proposes a Sink node energy efficiency optimization strategy based on the optimal stopping theory for the SWIPT-enabled sensor-cloud system. First of all, the schedule sequence of downlink SWIPT and uplink information transmission is designed. In the downlink phase, the Sink node adopts the opportunity scheduling strategy and selects the time when the channel quality is good to start the downlink transmission. Sink node's energy efficiency is defined as the ratio of uplink throughput and downlink energy consumption realized by the system. Then, based on the optimal stopping theory, the problem of Sink node energy efficiency optimization is formulated and the existence of optimal stopping rules is proved. Finally, the optimal energy efficiency algorithm is designed to solve the optimal downlink SWIPT time of the system, so as to realize the optimal energy efficiency strategy of the sensor-cloud system. The effectiveness and performance of the optimal energy efficiency algorithm are verified by simulations, and the advantages of the optimal energy efficiency strategy are shown on system gains by comparing with other three strategies.

**Keywords:** SWIPT; energy efficiency; channel quality; optimal stopping theory; sensor-cloud

## 0 引言

传感云系统是无线传感网络与云计算技术结合的产物,前者实现了信息世界与物理世界的连接,

成为物联网(internet of things, IoT)与信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)的重要组成部分;后者拓展了前者在数据处理和存储方面的能力,利用云端

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2020-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61762010,61862007); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138147, 2020GXNSFBA297103); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2020KY04030).

责任编辑: 刘民.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: designbyyili@163.com.

处理底层传感器网络产生的数据,继而实现系统自治与用户远程服务.随着传感云系统的扩大与节点数量的增多,其能耗问题成为制约其发展的重要因素;同时,传感器节点能量有限且难以补给的特点严重制约了系统的生命周期.

近年来,随着能量收集(energy harvesting, EH)技术和无线功率传输(wireless power transfer, WPT)技术的发展,能量收集网络应运而生.能量收集网络中的无线能量传输,主要有无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)和无线供电通信网络(wireless powered communication network, WPCN)两种形式,前者实现了WPT与无线信息传输的同步运行,后者则运行在不同的时序中<sup>[1-4]</sup>.因此,考虑将能量收集网络技术与传感云系统相结合,既能降低系统的传统能耗,实现系统的节能减排,同时也能够延长节点生命周期,拓宽网络的部署范围.

基于EH技术和WPT技术的无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)中,节点的能量补给方式通常有两种:一种是使用移动无线充电车(wireless charging vehicle, WCV)通过规划路径为节点充电;另一种则是使用固定式的混合型接入点(hybrid access point, H-AP)或能量接入点(energy access point, E-AP),以全向电磁辐射<sup>[5]</sup>或定向波束成形<sup>[6-11]</sup>的方式为周围节点提供无线充电.文献[6]提出了一种无线供电传感器网络的协作SWIPT策略,旨在最大化系统的能量利用率,同时指出能量传输效率在传输距离上的快速衰减是WPT应用的主要障碍.文献[7]研究了毫米波的无线供电传感器网络,其中接入点使用波束成形技术向小区内的传感器节点传输能量,网络采用WPCN方式,通过下行阶段传感器节点的能量耗尽概率和上行阶段的波束中断概率来评估网络性能.其中无线链路的状态受到小规模分组衰落和大规模路径损耗的影响,毫米波信道被建立为强视距链路和弱非视距链路,其空间随机性通过泊松点过程进行模拟.文献[8]同样针对无线供电传感器网络,使用与节点位置相关的限界函数模拟信道状态,研究了联合优化节点部署、WPT和传感器规划等问题,目标为保证最低采样速率前提下最小化节点部署数量.文献[9]针对SWIPT使能的认知传感器网络,联合优化传输功率和功率分割比以在容许干扰范围内最大化系统的可实现速率,其信道系数取决于终端距离、路径损耗指数和瑞利衰落系数.不同于文献[9],文献[10]则是基于Nakagami- $m$ 衰减信道模型分析了基于SWIPT的无线传感器网络性能,推导出中

断概率和遍历容量的闭式表达式并基于蒙特卡洛模拟验证.文献[11]从协议的角度研究多输入多输出SWIPT问题,提出混合型时间切换(time switch, TS)和功率分割(power split, PS)的SWIPT协议,其下行链路和上行链路均基于广义集群信道模型<sup>[12]</sup>构建.

综上所述,在基于WPT的传感器网络中,系统能效受到系统决策的影响,同时也受制于信道状态的好坏.虽然上述工作均使用不同的方法模拟信道的不确定性,但能量和信息的传输均为全时段进行,且所制定的系统决策尚不能够应对信道的时变特性,即当信道状态不佳时,不得不增大发射功率以满足接收端的能量收集需求,这就造成了系统资源的浪费;同时,由于能量收集网络中双近-远(double near-far)<sup>[3-4,13]</sup>问题的存在,信道状态同时影响着下行链路的能量传输和上行链路的信息传输.因此,在当前的无线供电传感器网络系统规划中,应依据传感器网络自身特点,选择在信道状态良好时进行能量传输,从而节省系统资源消耗.

为了克服无线衰落信道的质量波动特性,减少系统能耗,无线网络的机会调度方案得到关注和研究,该方案将系统资源动态地分配给最佳瞬时无线链路,分为集中式机会调度(centralized opportunistic scheduling, COS)和分布式机会调度(distributed opportunistic scheduling, DOS),前者将所有用户的信道状态在决策端集中进行估计和规划,而后者则由用户自主规划无需统筹网络全局信息<sup>[13]</sup>.文献[14]首次研究了随机接入信道的自组网络中两类场景下的DOS策略,其一为所有用户协作以最大化网络总吞吐量,其二为用户以非协作方式最大化自身吞吐量.文献[15]在文献[14]的基础上增加考虑了平均延迟约束,即在所设计延迟容忍度下,最大化两类场景的吞吐量.文献[16]提出一种DOS两级侦测方法优化文献[14]中的两类场景,解决系统第一次侦测的信道估计不准确问题,结果表明两级侦测较一级侦测提升了110%的系统增益.文献[17]指出文献[14-16]中DOS的不足,即DOS策略的制定仅考虑用户完全饱和情形,如用户的传输队列完全积压,而实际网络中不同用户的队列并不相同,因此需考虑用户参与信道竞争时可能并没有足够的数据用于传输的情形.继而,文献[17]提出自适应分布式机会调度(adaptive DOS, ADOS),通过控制最佳传输速率阈值和访问概率来克服上述不足.结果表明ADOS在比例公平性方面优于DOS,并提升了30%的吞吐量.上述研究工作均针对无线信道状况随时间变化的信息传输网络,尚不能直接应用于WPT.与此同时,由于无线供电传

传感器网络中的能量有限,应选择合适的时机进行能量传输,减少能量在无线信道传输中的损耗.

本文基于最优停止理论,采用WPCN工作方式,首先设计下行链路动态SWIPT的无线供电传感器网络系统运行时序;继而建立系统最优能效问题,并求解该问题的最优停止规则;最后设计系统最优能效的下行SWIPT算法,求解系统最优能效问题,得到系统下行SWIPT的最优停止规则,设计系统仿真实验,并与其他方案进行对比,验证所设计算法的有效性与性能.

### 1 系统模型与时序

传感云网络的系统结构如图1所示,其中底层的传感器节点以蜂窝结构组成并均匀分布在蜂窝区域内,每个小区中心位置设置一个Sink节点. Sink节点和传感器节点均配备单一天线. Sink节点由稳定电源供电;传感器节点配备能量收集装置,以PS的工作模式从Sink节点发射的射频(radio frequency, RF)信号中收集能量并解码信息. 在由Sink节点与传感器节点构成的网络系统中,假设Sink节点能够侦测到相邻小区中Sink节点的通信状态,且当前小区Sink节点与相邻小区Sink节点以随机接入的方式竞争同一信道,因此每个时刻的相邻小区间至多只有一条链路能够成功实现下行SWIPT. Sink节点在成功

竞争信道后,能够获知信道的状态信息(channel-state information, CSI). 由于信道衰落的时变特性,竞争成功的链路的信道状态可能是好的或者较差的,只有当链路状况良好时,竞争成功的Sink节点才开始下行SWIPT.

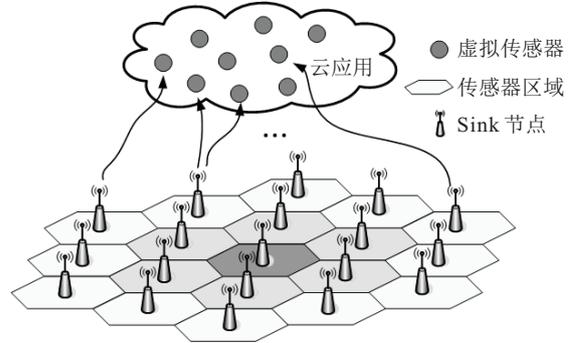


图1 系统结构

#### 1.1 系统运行时序

为了侦测信道的使用情况, Sink节点向其小区内的传感器节点以广播方式发送时长为 $\tau$ 的数据,传感器节点接收到数据后向Sink节点发回确认信号. Sink节点获得该确认信号后,即可称作该Sink节点信道竞争成功. 当信道竞争成功后,获知相应的CSI. 设计由Sink节点与传感器节点构成的网络系统的运行时序,如图2所示.

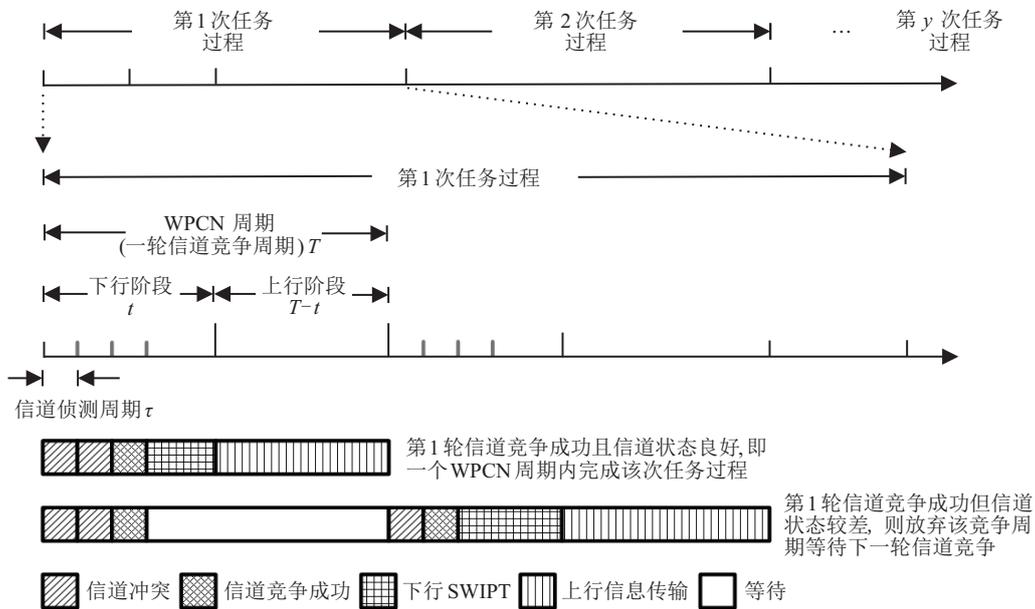


图2 系统运行时序

系统进行Y次任务过程,每次任务过程为Sink节点通过信道竞争获得信道使用,并在信道状态良好时进行下行SWIPT,将任务信息和能量在当前小区内以广播的形式发送至传感器节点,继而传感器节点使用收集到的能量在接下来的上行阶段中将数据上传

至Sink节点. 在传感云系统中,假定Sink节点与传感器节点构成的WPCN的周期为 $T$ ,其中下行时长为 $t$ ,信道侦测时长为 $\tau$ . 在Sink节点与传感器节点构成的无线链路中,信道增益 $g$ 服从某种分布(如Rayleigh分布<sup>[18]</sup>),并假设信道侦测周期大于信道的相干时间长

度,同时下行 SWIPT 时长应不大于信道的相干时间长度。

### 1.2 下行阶段

假定中心小区与其周围6个相邻小区组成干扰网络,此时干扰网络中 Sink 节点的数量为  $K$ ,  $K = 7$ 。

在一个干扰网络中,一轮信道竞争的过程可以描述如下:首先,  $K$  个 Sink 节点以均等的概率  $p$  参与信道竞争,即  $p = 1/K$ ;然后,在之后的任意时刻,当有且只有一个 Sink 节点竞争信道时,则称作第1回信道竞争成功。以节点 Sink A 参与信道竞争为例,如果 Sink A 第1回竞争获得信道使用,且此时信道状态良好,则 Sink A 立即开始下行 SWIPT;否则,放弃 SWIPT 并退出本轮信道竞争,等待参与下一轮的信道竞争,继而本轮中剩余的  $K - 1$  个 Sink 节点继续进行本轮信道竞争。在第2回的竞争中,当只有一个节点竞争信道时,则称作第2回信道竞争成功,此时假设获得本回信道使用权的节点为 Sink B, Sink B 执行与 Sink A 相同的操作。若当前信道状态良好,则立即开始 SWIPT,否则放弃信道使用而等待下一轮信道竞争,由本轮中剩余的  $K - 2$  个 Sink 继续竞争信道。依次进行。由此可见,在一个干扰网络的一轮信道竞争中,信道被成功竞争了  $K$  回。

对于当前的干扰网络,由于前  $K - i$  次竞争成功的 Sink 节点放弃传输并等待下一轮信道竞争,因此信道在第  $i$  ( $i \leq K$ ) 回竞争成功时,其参与竞争的 Sink 节点数量为  $K - i + 1$ ,此时其中任一 Sink 节点在第  $i$  回竞争成功的概率为

$$p_i^s = \left[ \frac{1}{K - i + 1} \right] p(1 - p)^{K-i}. \quad (1)$$

可以得到,第  $i$  回竞争成功的期望竞争次数为  $n_i = 1/p_i^s$ ,任一 Sink 节点第  $i$  回竞争成功的期望竞争次数为  $n_i p$ ,下行链路总期望竞争次数为  $\sum_{i=1}^K n_i p$ 。假设 Sink 节点的发送功率为  $P$ ,结合其侦测时长  $\tau$ ,得到每次信道竞争的能耗为  $P\tau$ ,下行阶段的总期望竞争能耗为  $P\tau \sum_{i=1}^K n_i p$ 。若信道质量良好,则第1回信道竞争成功所需时长的期望为  $n_1 \tau$ ,剩余 SWIPT 的传输时长为  $t - n_1 \tau$ 。

考虑到实际中 Sink 节点无法一直等待下行传输,因此设置 SWIPT 的最大延时为  $D$ ,如果 Sink 成功竞争到信道,且当前达到最大延时  $D$ ,则该 Sink 节点不考虑当前链路质量,立即开始下行 SWIPT。显然, Sink 节点达到最大延时的竞争总次数期望为  $n_1 p$ ,竞争能耗期望为  $P\tau n_1 p$ ,竞争时长期望为  $n_1 \tau$ ,剩余 SWIPT

传输时长为  $t - n_1 \tau$ 。

### 1.3 上行阶段

下行周期为  $t$ ,则上行链路剩余的时长为  $T - t$ 。假设当前小区内传感器节点总数量为  $M$ ,则第  $m$  ( $1 \leq m \leq M$ ) 个传感器节点收集到的能量为  $\eta_m \alpha_m P t_S$ 。其中:  $\eta_m$  为路径损耗系数,  $\alpha_m$  为 PS 系数,  $t_S$  为下行 SWIPT 时长。依据香农公式,上行阶段中传感器节点  $m$  所能实现的上行链路传输速率为

$$R_m = W_m \log_2 \left( 1 + \frac{g_m \cdot P_m^s}{N_0 W_m} \right). \quad (2)$$

其中:  $R_m$  为信道传输速率,  $W_m$  为信道带宽,  $g_m$  为信道增益,  $P_m^s$  为传感器节点的发射功率,  $N_0$  为噪声功率谱密度。继而可以得到当前小区中第  $m$  个传感器节点的上行链路吞吐量为

$$\text{TPS}_m = (T - t) R_m = (T - t) W_m \log_2 \left( 1 + \frac{g_m \eta_m \alpha_m P t_S / (T - t)}{N_0 W_m} \right). \quad (3)$$

### 1.4 Sink 节点能效模型

系统的一次任务过程包含两个环节,即首先由 Sink 节点参与信道竞争成功获得信道后进行 SWIPT,继而传感器节点利用收集到的能量将采集数据上传至 Sink 节点。一次任务过程可能包含了  $N$  个信道竞争周期。SWIPT 的最大时延为  $D$ ,因此  $N \in \{1, 2, \dots, N_D\}$ ,其中  $N_D = \lfloor D/T \rfloor$ ,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整运算。于是, Sink 节点能效定义为在一次任务过程中,小区内全部传感器节点上行总吞吐量与 Sink 节点总能耗之比,即

$$\text{EFF} = \frac{\sum_{m=1}^M \text{TPS}_m}{P t_S + E}, \quad (4)$$

其中  $P t_S$  为 SWIPT 能耗,  $t_S = t - n_1 \tau$ 。假设当前小区进行了  $Y$  次任务,则当前小区的平均能效为

$$\begin{aligned} \overline{\text{EFF}} &= \frac{\sum_{y=1}^Y \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y}}{\sum_{y=1}^Y (P t_{S,y} + E_y)} \\ E_y &= \sum_{n=1}^{N_y} (E'_{n,y}), \\ E'_{n,y} &= \begin{cases} \sum_{i=1}^K n_i p P \tau, & 1 \leq N_y < N_D; \\ n_1 p P \tau, & N_y = N_D. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $\text{TPS}_{m,y}$  为第  $y$  次任务过程中第  $m$  个传感器节点的上行链路吞吐量,  $t_{S,y}$  与  $N_y$  分别为第  $y$  次任务过程中下行 SWIPT 时长与所需的信道竞争次数。

## 2 最优能效问题

基于Sink节点平均能效,本节建立最优能效问题,并证明该问题存在最优停止规则.

依据大数定理,式(5)收敛于

$$\overline{\text{EFF}} = \frac{\sum_{y=1}^Y \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y}}{\sum_{y=1}^Y (Pt_{S,y} + E_y)} \rightarrow \frac{\mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right]}{\mathbf{E}[(Pt_{S,y} + E_y)]}, \quad (6)$$

其中 $\mathbf{E}[\cdot]$ 表示数学期望. 定义集合 $\mathbf{N} = \{1, 2, \dots, N_D\}$ ,于是Sink节点的平均能效最大化问题 $P_1$ 可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{N_y \in \mathbf{N}} \frac{\mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right]}{\mathbf{E}[(Pt_{S,y} + E_y)]}. \\ & E_y = \sum_{n=1}^{N_y} (E'_y), \\ & E'_y = \begin{cases} \sum_{i=1}^K n_i p P \tau, & 1 \leq N_y < N_D; \\ n_1 p P \tau, & N_y = N_D. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(6)和(7),得到 $Y$ 次任务过程后的最优平均能效为

$$\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}} = \sup_{N_y \in \mathbf{N}} \frac{\mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right]}{\mathbf{E}[(Pt_{S,y} + E_y)]} \Big|_{y=1, 2, \dots, Y}. \quad (8)$$

通过等式变换,式(8)可重新写作

$$\sup_{N_y \in \mathbf{N}} \left( \mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right] - \overline{\text{EFF}}^{\text{opt}} \mathbf{E}[(Pt_{S,y} + E_y)] \right) = 0. \quad (9)$$

式(9)是一个关于 $\overline{\text{EFF}}$ 的最大化期望报酬 $\mathbf{E}[\Phi_{N_y}(\overline{\text{EFF}})]$ 的优化问题,报酬函数 $\Phi_{N_y}(\overline{\text{EFF}})$ 可表示为

$$\Phi_{N_y}(\overline{\text{EFF}}) = \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} - \overline{\text{EFF}}(Pt_{S,y} + E_y). \quad (10)$$

于是,可将式(7)的平均能效最大化问题转化为最优停止问题,即

$$\begin{aligned} & \max_{N_y \in \mathbf{N}} \mathbf{E}[\Phi_{N_y}(\overline{\text{EFF}})] = \\ & \max_{N_y \in \mathbf{N}} \left( \mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right] - \overline{\text{EFF}} \mathbf{E}[(Pt_{S,y} + E_y)] \right). \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)的目标是获得信道竞争的最优停止时间 $N_y^{\text{opt}}$ 与最优平均能效 $\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}}$ ,此时系统获得最大期望报酬 $\mathbf{E}[\Phi_{N_y}(\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}})]$ ,最优停止时间 $N_y^{\text{opt}}$ 为

$$N_y^{\text{opt}} = \arg \sup_{N_y \in \mathbf{N}} \frac{\mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right]}{\mathbf{E}[(Pt_{S,y} + E_y)]}. \quad (12)$$

## 3 最优停止规则

假设Sink在当前任务过程的第 $N_y$ 次竞争中成功获取信道,则其停止信道竞争进行SWIPT的报酬为

$$\begin{aligned} & \Phi_{y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}) = \\ & \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)} - \overline{\text{EFF}}(Pt_{S,y(N_y)} + E_{y(N_y)}), \\ & t_{S,y(N_y)} = t - N_y \tau, \\ & E_{y(N_y)} = \sum_{n=1}^{N_y} \sum_{i=1}^K n_i p P \tau. \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $y(N_y)$ 表示在当前的第 $y$ 次任务过程中的第 $N_y$ 次信道竞争中Sink成功获得信道并进行下行SWIPT.若此时放弃,则获得的期望报酬为

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}[\Phi_{y(N_y+1)}(\overline{\text{EFF}}) | F_{y(N_y)}] = \\ & \mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y+1)} - \overline{\text{EFF}}^{\text{opt}}(Pt_{S,y(N_y+1)} + E_{y(N_y+1)}) \Big| F_{y(N_y)} \right], \\ & N_y = 1, 2, \dots, N_D - 1, \\ & t_{S,y(N_y+1)} = t - (N_y+1)\tau, \\ & E_{y(N_y+1)} = \sum_{n=1}^{N_y+1} \sum_{i=1}^K n_i p P \tau. \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $F_{y(N_y)}$ 表示已进行的 $y$ 次任务中获得的上行链路吞吐量序列 $\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,1(N_1)}, \dots, \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)}$ ,以及SWIPT传输时长序列值 $t_{S,1(N_1)}, \dots, t_{S,y(N_y)}$ 和竞争总能耗序列值 $E_{1(N_1)}, \dots, E_{y(N_y)}$ .根据最优近视停止规则<sup>[18]</sup>,Sink节点在 $N_y$ 次竞争中成功获取信道并进行SWIPT的条件应满足

$$\begin{aligned} & \Phi_{y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}) \geq \mathbf{E}[\Phi_{y(N_y+1)}(\overline{\text{EFF}}) | F_{y(N_y)}], \\ & N_y = 1, 2, \dots, N_D - 1. \end{aligned} \quad (15)$$

**定理1** 当 $N_y^{\text{opt}}(\overline{\text{EFF}}) = \min\{N_D > N_y \geq 1 : \Phi_{y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}) \geq \mathbf{E}[\Phi_{y(N_y+1)}(\overline{\text{EFF}}) | F_{y(N_y)}]\}$ ,且近视停止规则满足 $\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)} \geq \text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}})$ 时,该停止规则最优.其中

$$\begin{aligned} \text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}) = & \begin{cases} \int_{\text{TPS}_{\text{th},y(N_{y+1})}(\overline{\text{EFF}})}^{\text{TPS}_{\text{max}}} (r - \overline{\text{EFF}}Pt_{y(N_{y+1})})dF_{\text{TPS}}(r) - \\ \overline{\text{EFF}}(E_{N_{y+1}}) + \overline{\text{EFF}}P(t - n_1\tau), 1 \leq N_y < N_D; \\ 0, N_y = N_D. \end{cases} \\ E_{N_{y+1}} = & \begin{cases} \sum_{i=1}^K n_i p P \tau, 1 \leq N_y < D_N - 1; \\ n_1 p P \tau, N_y = D_N - 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

$F_{\text{TPS}}(r)$  为上行链路吞吐量的累积分布函数.

**证明** 根据式(11)可得

$$\begin{aligned} \Phi_{y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}) - \mathbf{E}[\Phi_{y(N_{y+1})}(\overline{\text{EFF}})|F_{y(N_y)}] = & \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} - \overline{\text{EFF}}(Pt_{S,y(N_y)} + E_{y(N_y)}) - \\ \mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_{y+1})} - \overline{\text{EFF}}(Pt_{S,y(N_{y+1})}) \middle| F_{y(N_y)} \right] + & \overline{\text{EFF}}(\mathbf{E}[E_{y(N_{y+1})}|F_{y(N_y)}]). \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $\mathbf{E}[E_{y(N_{y+1})}|F_{y(N_y)}]$  为Sink节点在进行第  $N_y + 1$  次竞争时的竞争能耗的期望值,可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[E_{y(N_{y+1})}|F_{y(N_y)}] = & \begin{cases} \sum_{m=1}^K n_i p P \tau, 1 \leq N_y < D_N - 1; \\ n_1 p P \tau, N_y = D_N - 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

考虑到下行 SWIPT 的最大时延  $D$ , Sink 节点在到达第  $N_D$  次竞争成功后立即开始下行 SWIPT, 此时上行链路吞吐量阈值为 0, 即  $\text{TPS}_{\text{th},y(N_D)}(\overline{\text{EFF}}) = 0$ . 因此, 有

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D)} - \overline{\text{EFF}}Pt_{y(N_D)} \middle| F_{y(N_D-1)} \right] = & \int_0^{\text{TPS}_{\text{max}}} (r - \overline{\text{EFF}}Pt_{y(N_D)})dF_{\text{TPS}}(r), \end{aligned} \quad (19)$$

其中  $\text{TPS}_{\text{max}} = \max \left\{ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,1}, \dots, \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y} \right\}$  为第 1 至第  $y$  次任务过程中的最大吞吐量. 因此, Sink 节点若在第  $N_D - 1$  次竞争成功且下式成立时, 立即开始下行 SWIPT:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D-1)} \geq & \int_0^{\text{TPS}_{\text{max}}} (r - \overline{\text{EFF}}Pt_{S,y(N_D)})dF_{\text{TPS}}(r) - \\ \overline{\text{EFF}}(n_1 p P \tau) + \overline{\text{EFF}}Pt_{S,y(N_D-1)}, \end{aligned} \quad (20)$$

其中  $t_{S,y(N_D-1)} \leq t - n_1\tau$ . 值得注意的是, 式(20)与任务传输次数  $y$  无关的原因在于其不同任务对系统的影响, 反映在变量  $\text{EFF}$  和  $\text{TPS}_{\text{max}}$  中.

依据式(20), Sink 节点在  $N_D - 1$  次竞争成功后开始下行 SWIPT 的吞吐量阈值为

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D-1)}(\overline{\text{EFF}}) = & \int_0^{\text{TPS}_{\text{max}}} (r - \overline{\text{EFF}}Pt_{S,y(N_D)})dF_{\text{TPS}}(r) - \\ \overline{\text{EFF}}(n_1 p P \tau) + \overline{\text{EFF}}P(t - n_1\tau), \end{aligned} \quad (21)$$

继而得到

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \left[ \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D-1)}(\overline{\text{EFF}}) - \overline{\text{EFF}}Pt_{S,y(N_D-1)} \middle| F_{y(N_D-2)} \right] = & \int_{\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D)}(\overline{\text{EFF}})}^{\text{TPS}_{\text{max}}} (r - \overline{\text{EFF}}Pt_{S,y(N_D-1)})dF_{\text{TPS}}(r). \end{aligned} \quad (22)$$

依据式(15), 得到Sink节点在第  $N_D - 2$  次竞争成功并开始下行 SWIPT 的吞吐量阈值为

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D-2)}(\overline{\text{EFF}}) = & \int_{\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_D-1)}(\overline{\text{EFF}})}^{\text{TPS}_{\text{max}}} (r - \\ \overline{\text{EFF}}Pt_{S,(N_D-1)})dF_{\text{TPS}}(r) - & \overline{\text{EFF}} \left( \sum_{i=1}^K n_i p P \tau \right) + \overline{\text{EFF}}P(t - n_1\tau). \end{aligned} \quad (23)$$

重复上述过程, 可得到Sink节点在第  $N_D - 3$  次, 第  $N_D - 2$  次, ..., 第 1 次竞争成功开始下行 SWIPT 的吞吐量阈值分别为

$$\text{TPS}_{\text{th},y(N_D-3)}(\overline{\text{EFF}}), \dots, \text{TPS}_{\text{th},y(1)}(\overline{\text{EFF}}),$$

继而可证Sink节点在第  $N_y$  次信道竞争成功并开始下行 SWIPT 满足式(16). 又因当Sink节点当前吞吐量满足式  $\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)} \geq \text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}})$  时, 式(15)单调, 于是定理1中的近视停止规则最优.  $\square$

依据定理1, 得到最优停止问题(11)的最优停止规则为

$$\begin{aligned} N_y^{\text{opt}}(\overline{\text{EFF}}) = & \min \left\{ N_D > N_y \geq 1 : \sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)} \geq \right. \\ & \left. \text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}) \right\}. \end{aligned} \quad (24)$$

最后, 依据式(8)求解最优平均能效  $\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}}$ .

假设信道增益  $g_m$  的累积分布函数为  $F(g_m)$ , 上行链路吞吐量的累积分布函数为  $F_{\text{TPS}}(r)$ . 由于Sink节点在每次参与信道竞争中成功获得信道的概率为  $p = 1/K$ , Sink 节点在第  $y$  次任务中首次信道竞争成

功并进行下行SWIPT的概率表示为

$$p(1 - F_{\text{TPS}}(\text{TPS}_{\text{th},y(1)}(\overline{\text{EFF}}))),$$

放弃本次SWIPT的概率为

$$F_{\text{TPS}}(\text{TPS}_{\text{th},y(1)}(\overline{\text{EFF}})) + (1 - \text{TPS}_{\text{th},y(1)}(\overline{\text{EFF}}))(K - 1)p.$$

由此可得, Sink节点在第 $N_y$ 次竞争成功并开始下行SWIPT的概率为

$$\begin{aligned} \theta_{N_y} = & \left( \prod_{n=1}^{N_y-1} (F_{\text{TPS}}(\text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}})) + (1 - F_{\text{TPS}}(\text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}})))(K - 1)p) \right) \times \\ & (1 - F_{\text{TPS}}(\text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}})))p. \end{aligned} \quad (25)$$

Sink节点在当前任务的第 $N_y$ 次竞争成功并进行下行SWIPT, 此时得到下行SWIPT期望时长以及上行链路吞吐量的期望值分别为

$$E[t_{S,y}] = \begin{cases} t - N_y\tau, & 1 \leq N_y < D_N - 1; \\ t - n_1\tau, & N_y = D_N - 1. \end{cases} \quad (26)$$

$$E\left[\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)}\right] = \int_{\text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}})}^{\text{TPS}_{\text{max}}} \frac{r}{F_{\text{TPS}}(\text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}))} dF_{\text{TPS}}(r). \quad (27)$$

Sink节点在进行 $y$ 次任务后的系统吞吐量, 以及下行SWIPT期望能耗和竞争能耗期望分别为

$$E\left[\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y}\right] = \sum_{N_y=1}^{D_N} E\left[\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y(N_y)}\right] \theta_{N_y}, \quad (28)$$

$$E[Pt_{S,y}] = \sum_{N_y=1}^{D_N} PE[t_{S,y}] \theta_{N_y}, \quad (29)$$

$$E[E_y] = \sum_{N_y=1}^{D_N} \left( \sum_{n=1}^{N_y} (E'_{n,y}) \right) \cdot \theta_{N_y}. \quad (30)$$

将上述式子分别代入式(8), 得到最优平均能效 $\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}}$ . 综上所述, 设计最优下行SWIPT算法如下所示, 该算法实现了系统最优平均能效 $\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}}$ .

**算法1** 最优能效算法.

step 1: 开始, 初始 $\overline{\text{EFF}}_0$ , 执行 step 2.

step 2: 根据式(16)求解 $\text{TPS}_{\text{th},y(D_N)}(\overline{\text{EFF}}_0)$ , 并设置 $N_y = D_N - 1$ .

step 3: 若 $N_y \geq 1$ , 执行 step 4; 否则, 执行 step 5.

step 4: 根据式(16)求得 $\text{TPS}_{\text{th},y(N_y)}(\overline{\text{EFF}}_0)$ , 设置 $N_y = N_y - 1$ , 返回 step 3.

step 5: 根据式(21)~(23)求解 $E\left[\sum_{m=1}^M \text{TPS}_{m,y}\right]$ ,

$E[Pt_{S,y}]$  和  $E[E_y]$ , 根据式(9)求得 $\overline{\text{EFF}}_{\text{new}}$ . 若 $|1/\overline{\text{EFF}}_{\text{new}} - 1/\overline{\text{EFF}}_0| > \varepsilon$  (设定的误差值), 则 $\overline{\text{EFF}}_0 = \overline{\text{EFF}}_{\text{new}}$ , 返回 step 2; 否则,  $\overline{\text{EFF}}^{\text{opt}} = \overline{\text{EFF}}_{\text{new}}$ , 结束.

**4 仿真与验证**

本节针对所提出的最优能效下行SWIPT策略进行仿真实验. 假设在上行阶段开始时刻, 小区内传感器节点立即开始上行数据传输, 且发送功率等于下行阶段收集到的能量与上行阶段时长之比; 无线信道的波动特性服从已知的长期统计分布函数, 信道的概率密度函数可基于已测数据, 通过无参密度估计方法进行直接估计<sup>[19]</sup>; 与此同时, 假设发送端能够基于导频或训练的信道估计方法感知信道的瞬时CSI<sup>[20]</sup>. 于是, 一条链路两次竞争信道的最小时间间隔 $\tau$ 大于信道的相干时间, 相干时间内的信道状态保持不变<sup>[20-21]</sup>, 因此, 一次成功的信道竞争所使用的竞争次数 $K$ 是一个几何随机变量; 假设下行SWIPT期间Sink的发射功率保持不变, 即该过程内信道的状态是不变的, 此时SWIPT传输时长应小于或等于信道的相干时间. 考虑信道衰落分别服从Rayleigh分布、Rician分布和Nakagami- $m$ 分布. 其中, Rayleigh分布与Rician分布的概率密度函数与累积分布函数参考文献[22]中给出, Nakagami- $m$ 分布的概率密度函数与累积分布函数参考文献[23]中给出. 实验参数的设置如表1所示.

表1 仿真参数

参数	值
带宽 $W/\text{Hz}$	$10^7$
噪声功率谱密度 $N_0/(\text{W}/\text{Hz})$	$10^{-7}$
Rayleigh 衰减参数	$\sigma^2 = 1, A = 1 \text{ W}$
Rician 衰减参数	$\sigma^2 = 1, A = 1 \text{ W}$
Nakagami- $m$ 衰减参数	$m = 4$
传输功率 $P/\text{W}$	0.1
数据最大时延 $D/\text{s}$	0.6
传输持续时长 $t_s/\text{s}$	0.08
传感器节点功率切割比 PS 系数	0.8
下行阶段时长 $t/T$	0.5
信道竞争周期 $\tau/\text{s}$	0.08

**4.1 算法1验证**

首先, 设定系统进行了30次任务过程, 即 $Y = 30$ , 并设置 $\overline{\text{EFF}}_0 = 1\text{bit}/\text{Hz}/\text{J}$ , 设置不同的数据最大时延, 继而通过算法1得到系统30次任务过程的最优停止时间, 即Sink获得信道停止参与信道竞争并开始SWIPT的时刻, 如图3所示. 值得注意的是, 系统的最优SWIPT时刻, 更倾向于在接近最大时延的时段中

产生,这是由于在当前时段中,系统的最优停止规则使用了之前所有时段所实现的平均能效,即系统倾向于对未来时段内更好的系统性能的期望.同时,较长的下行竞争周期能够增大系统的自由度,这反应在竞争周期较长情形下,下行SWIPT达到最大时延的任务数量远小于竞争周期较短情形下达到最大时延的任务数量.

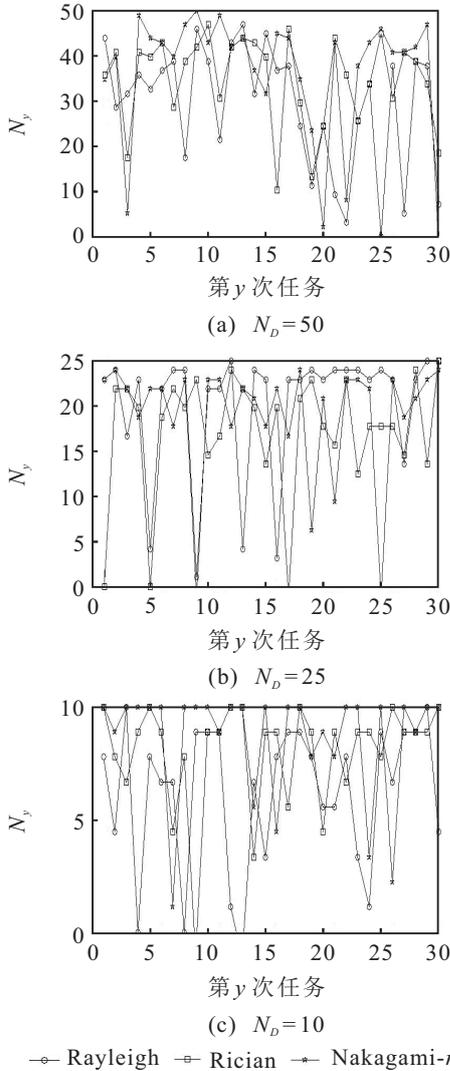


图3 30次任务中算法1所得到的最优SWIPT时刻

其次,通过设置不同的Sink节点发送功率,得到3种信道模型下,算法1在进行50次任务中所得到的最优下行SWIPT时刻,如图4所示.其中Rayleigh信道下的最优停止时间较其他两种信道更接近最大时延 $N_D$ ,这是由于其他两种信道更接近真实情况进而具有较小的模型不确定性,系统需要更多的时间以得到能够满足预设误差值的最优停止规则.同时随着Sink节点传输功率的增加,算法1计算得出的最优传输时刻有所提前,这是由于较大的传输功率在一定程度上弥补了信道的不确定性,实现了对系统增益的折中.

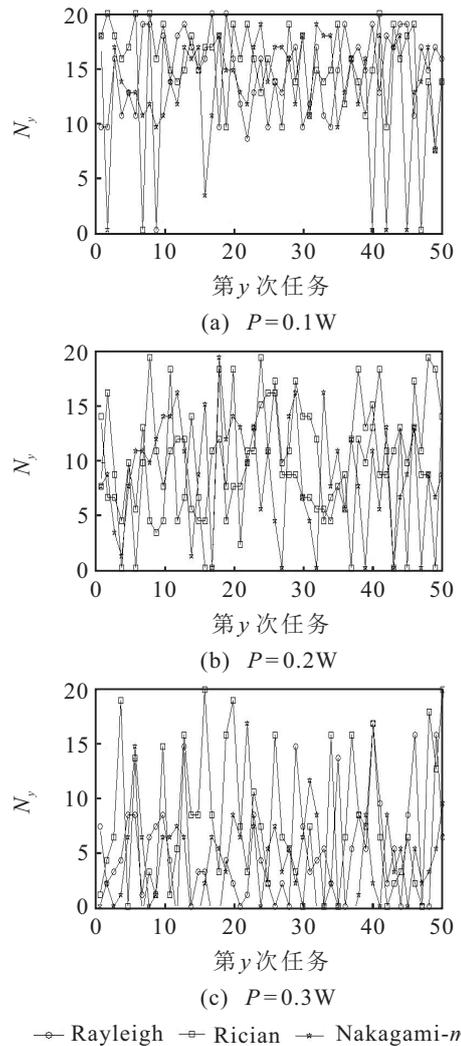


图4 50次任务中不同Sink节点发送功率所得到的最优SWIPT时刻

#### 4.2 最优能效下行SWIPT策略验证

本节将本文所述最优能效策略与另外两类策略进行对比,以验证本文策略在提升系统能效方面的有效性与增益.参与对比实验的策略如下.

策略1:本文中最优能效的下行SWIPT策略,其参数如表1所示.

策略2:随机下行SWIPT策略,即 $K$ 个Sink节点随机地接入信道,当仅有一个Sink节点参与信道竞争时,则获得该信道并进行下行SWIPT,否则等待下一轮信道竞争直至达到最大时延.

策略3:参考文献[22]中的分布式机会调度策略,即 $K$ 个Sink节点进行信道竞争,当仅有一个Sink节点参与信道竞争时,该节点获取信道,同时当传输速率大于最优阈值时进行下行SWIPT传输,否则放弃,等待下一轮信道竞争.

策略4:参考文献[4]中功率控制算法,下行链路持续传输,即不考虑链路质量,Sink节点在整个下行链路时段内进行SWIPT传输,通过控制基站的传输功率以提升网络性能.

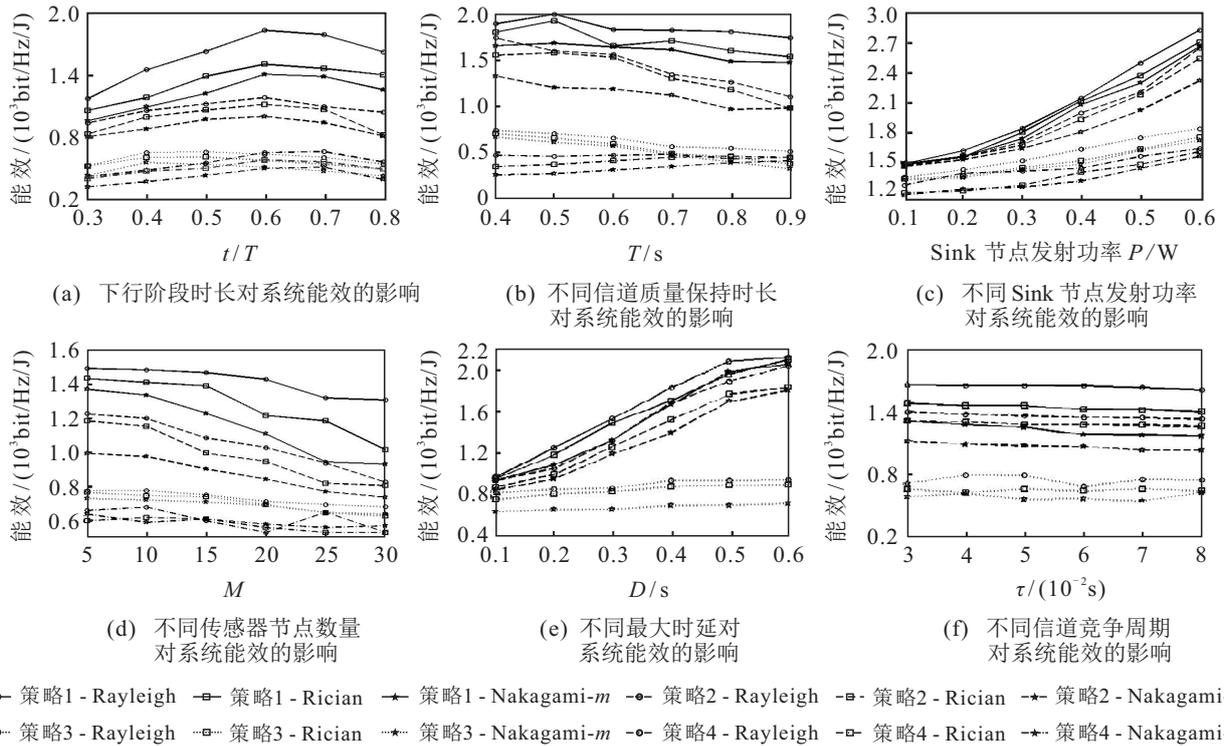


图5 系统能效

分别在 Rayleigh 衰减信道、Rician 衰减信道和 Nakagami-*m* 衰减信道下计算出 4 种策略的系统能效,如图 5 所示. 分别通过 4 种策略下不同的下行阶段时长、信道质量保持时长、Sink 发送功率、传感器节点数量、最大时延以及信道竞争周期所实现的系统能效的对比,得出本文的最优能效策略较其他两种策略在系统能效方面能够实现更多的系统增益,随机下行 SWIPT 策略不考虑信道质量,其所实现的系统能效次之. 策略 3 由于其最优阈值的计算不考虑下行最大时延问题,同时其未能考虑信道质量保持时长,导致下行链路未能达到最优阈值时需一直等待参与信道竞争,竞争能耗增加,因此其系统能效低于前两者. 由于策略 4 并不考虑信道质量,在开始时刻立即进行 SWIPT 并在下行周期内持续传输,因此其系统能效最低. 这一现象也验证了分布式机会调度策略在提升系统能效方面的优势. 图 5(a) 所示为不同下行阶段时长所实现的系统能效,当下行链路时长增加至一定程度时,系统能效转而开始下降,这是由于虽然较长的下行链路时长增加了传感器节点收集到的能量,但同时也增加了系统竞争能耗和传输能耗. 图 5(b) 表明信道质量保持时长,即系统 WPCN 周期的增长导致系统能效略有下降. 同时 Sink 节点发送功率的增加对系统能效的提升有促进作用,如图 5(c) 所示,这是由于发送功率的增大在一定程度上弥补了较差信道质量的影响. 传感器节点数量的增加,导致系统下行阶段能量利用率有所降低,因此其系统能效

也随之下降,如图 5(d) 所示. 系统最大时延决定了参与信道竞争的最大竞争次数,较多的竞争次数代表着在一定程度上能够获得更好的信道进行下行 SWIPT 传输,如图 5(e) 所示. 信道侦测时长影响了系统下行 SWIPT 时长,因此其侦测时长的增加导致系统能效有所降低,如图 5(f) 所示. 与此同时,图 5 中不同策略所实现的 Sink 节点能效中, Rayleigh 衰落信道下的能效最高, Rician 衰落信道次之, Nakagami-*m* 衰落信道下的能效最低. 这是由于 Rician 衰落与 Nakagami-*m* 需要更多的能量以抵抗更高的模型准确度所导致的路径损耗. 这一现象也表明当不考虑直射分量时有助于 Sink 节点能效的提升,即当输入分布为广义零均值高斯分布时,更有利于能量的传输,该结论能够在文献[1]中得到验证. 另一方面,考虑到实际环境中传感器网络的主传输与多径并存,接收端实现复高斯信号与直射分量叠加,因此 Rician 衰落模型更贴近实际系统,能够更为准确地描述系统特性,而 Rayleigh 衰落更趋近于能量传输的理想情形. 这一特性导致了在图 5 的系统能效曲线中, Rician 衰落模型下的系统能效优于 Nakagami-*m* 模型,但两者的能效均低于不考虑直射分量的 Rayleigh 衰落模型下的系统能效.

### 5 结论

本文针对传感云系统的特性,以提升系统能效与资源复用率为目标,建立了机会型下行 SWIPT,上行信息传输的工作时序;继而基于最优停止理论,

建立Sink节点能效最优化问题,求解该问题的最优停止规则并设计系统最优能效算法以计算得到下行SWIPT的最优传输时刻.通过仿真实验对比验证了所述算法与策略能够达到预期效果并实现系统能效增益.本文策略为携能型通信网络提供了分布式机会调度方法,在一定程度上克服了信道质量变化所导致的传输能耗增加,从而提升系统的能量利用效率.

#### 参考文献(References)

- [1] Ulukus S, Yener A, Erkip E, et al. Energy harvesting wireless communications: A review of recent advances[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(3): 360-381.
- [2] Wang Z, Li T S, Ye J, et al. A novel simulation in energy harvesting networks based on scenario generation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(8): 1931-1937.
- [3] Wang Z, Li T S, Ye J, et al. Energy harvesting networks: A review of recent advances[J]. *Guangxi Sciences*, 2019, 26(3): 253-266.
- [4] Wang Z, Li T S, Ye J, et al. Multi-user MIMO cognitive wireless powered communication network based on non-linear energy harvesting[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(3): 547-558.
- [5] Sun Y H, Qin C, Wang Y, et al. Data routing strategy and wireless charging algorithm for large-scale WRSNs[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(7): 1239-1246.
- [6] Liu T, Wang X D, Zheng L. A cooperative swipt scheme for wirelessly powered sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(6): 2740-2752.
- [7] Psomas C, Krikidis I. Energy beamforming in wireless powered mmwave sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(2): 424-438.
- [8] Du R, Xiao M, Fischione C. Optimal node deployment and energy provision for wirelessly powered sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(2): 407-423.
- [9] Lu W D, Liu Y R, Peng H, et al. Joint resource optimization for cognitive sensor networks with swipt-enabled relay[J]. *Sensors: Based, Switzerland*, 2017, 17(9): E2093.
- [10] Pan G F, Lei H J, Yuan Y, et al. Performance analysis and optimization for SWIPT wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(5): 2291-2302.
- [11] Xu K, Shen Z X, Wang Y R, et al. Resource allocation for hybrid TS and PS SWIPT in massive MIMO system[J]. *Physical Communication*, 2018, 28: 201-213.
- [12] Poon A S Y, Brodersen R W, Tse D N C. A spatial channel model for multiple-antenna systems[C]. *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*. Monterey: IEEE, 2004: 3665-3668.
- [13] Asadi A, Mancuso V. A survey on opportunistic scheduling in wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1671-1688.
- [14] Zheng D, Ge W Y, Zhang J S. Distributed opportunistic scheduling for ad hoc networks with random access: An optimal stopping approach[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(1): 205-222.
- [15] Tan S S, Zheng D, Zhang J S, et al. Distributed opportunistic scheduling for ad-hoc communications under delay constraints[C]. *Proceedings of IEEE Infocom*. San Diego: IEEE, 2010: 1-9.
- [16] Thejaswi P, Zhang J S, Pun M O, et al. Distributed opportunistic scheduling with two-level probing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2010, 18(5): 1464-1477.
- [17] Garcia-S Aavedra, Banchs A, Serrano P, et al. Distributed opportunistic scheduling: A control theoretic approach[C]. *Proceedings of IEEE Infocom*. Orlando: IEEE, 2012: 540-548.
- [18] Ferguson T S. Optimal stopping and applications[J]. *Mathematical Finance & Probability*, 2012, 175(1): 22-34.
- [19] Shen X, Agrawal S. Kernel density estimation for an anomaly based intrusion detection system[C]. *International Conference on Machine Learning: Models, Technologies and Applications Technologies and Applications*. Las Vegas: DBLP, 2006: 161-167.
- [20] Yue G S, Zhou X, Wang X. Performance comparisons of channel estimation techniques in multipath fading CDMA[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(3): 716-724.
- [21] Peng Y, Wang G C, Huang S Q, et al. An energy consumption optimization strategy for data transmission based on optimal stopping theory in mobile networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(6): 1162-1175.
- [22] Wang G C, Zhao Q F, Xie T, et al. A channel-aware expected energy consumption minimization strategy in wireless networks[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(15): 6051-6063.
- [23] Alouini M S, Goldsmith A J. Adaptive modulation over nakagami fading channels[J]. *Wireless Personal Communications*, 2000, 13(1): 119-143.

#### 作者简介

王哲(1991—),男,讲师,博士,从事无线携能通信、边缘计算与物联网等研究, E-mail: designbyyili@163.com;

李陶深(1957—),男,教授,博士生导师,从事无线网络、非线性控制与智能信息技术等研究, E-mail: tshli@gxu.edu.cn;

葛丽娜(1969—),女,教授,博士,从事物联网、边缘计算与智能控制等研究, E-mail: 66436539@qq.com;

吴敏(1979—),男,博士生,从事电力系统自动化与智能控制的研究, E-mail: 122010268@qq.com;

刘鹏(1981—),男,工程师,从电力系统自动化与物联网等研究, E-mail: 164342799@qq.com;

汤卫东(1968—),男,副教授,博士,从事云计算与大数据等研究, E-mail: china5161@126.com.