



无线携能通信中一种能效优先的 缓存队列机制中继选择方案

洪鑫龙, 许晓荣, 姚英彪
(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对无线携能 (SWIPT) 中在节点能量受限情况下的缓存队列机制半双工 (HD) 中继选择的问题, 研究了 SWIPT 中能效优先的缓存队列机制中继节点选择方案和所提策略的系统能效。给出了基于能效优先的缓存队列机制 SWIPT 最佳接收/转发中继节点选择方案。数值仿真结果表明, 所提策略可以有效降低 SWIPT 网络的中断概率, 实现缓存队列 SWIPT 中能效与中断性能的折中。

关键词: 无线携能; 缓存队列机制中继选择; 能效优先; 能量收集; 中断性能

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018111

Energy-efficiency based buffer-aided relay selection scheme in SWIPT

HONG Xinlong, XU Xiaorong, YAO Yingbiao
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Aiming at the problem of buffer-aided half-duplex (HD) relay selection in simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) with energy constraint, energy-efficiency priority based buffer-aided relay selection scheme in SWIPT was investigated. Moreover, SWIPT system energy efficiency was studied, and an appropriate mathematical model was constructed to perform energy efficiency based buffer-aided optimal receive/transmit relay selection in SWIPT. Numerical results show that the proposed scheme effectively reduces SWIPT outage probability and achieves the tradeoff between energy efficiency and outage performance in buffer-aided SWIPT.

Key words: SWIPT, buffer-aided relay selection, energy-efficiency priority, energy harvesting, outage performance

收稿日期: 2017-11-14; 修回日期: 2018-02-02

通信作者: 许晓荣, xuxr@hdu.edu.cn

基金项目: 杭州电子科技大学“电子科学与技术”浙江省一流学科 A 类开放基金项目: “无线携能网络中缓存队列机制中继选择与资源调度方案研究” (No. GK178800207001/024), 2017 年度杭州电子科技大学“优秀骨干教师支持计划”人才项目, 杭州电子科技大学通信工程学院专业学位研究生科研创新基金重点项目: “无线携能网络中缓存队列机制中继选择方案研究” (No. GK178800208018), 浙江省科协青年科技人才培养工程资助项目 (No. 2016YCGC009)

Foundation Items: The Open Project of “Electronic Science and Technology” Zhejiang First Class Discipline (Class A): “Research on buffer-aided relay selection and resource scheduling strategies in SWIPT” (No. GK178800207001/024), Excellent Backbone Teacher Support Program in Hangzhou Dianzi University in 2017, The Key Innovation Research Foundation for Graduate Students in School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University: “Research on buffer-aided relay selection schemes in SWIPT” (No. GK178800208018), Young Talent Cultivation Project of Zhejiang Association for Science and Technology (No. 2016YCGC009)



1 引言

无线信息与能量协同传输 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 作为一种新的能量收集技术, 节点从周围的射频信号中收集能量并存储, 用于后续的无线通信链路传输^[1-3]。该技术弥补了传统能量收集的不足, 解决了从自然环境中采集能量 (如潮汐能、风能、太阳能、地热能、振动能等) 对外界环境依赖性大、不易控制以及无线节点不便配置可靠电源的缺陷。SWIPT 与缓存队列机制中继选择技术相结合, 可同时提高信息的传输速率和能量传输的可靠效率^[4]。

缓存辅助的中继传输技术, 即给予中继一定的存储空间, 中继可以不用再遵循“前一时隙收、后一时隙发”这样交替进行的半双工固定传输模式, 中继在收、发信息的同时拥有更多的自由度^[5]。参考文献[6]指出, 根据同一时隙不同链路信道状况的好坏, 通信网络可以自适应地选择链路传输信息。在实际中, 实现多用户全双工无线通信的主要难点是自干扰 (self-interference, SI)、同频干扰 (co-channel interference, CCI) 及多用户干扰 (multi-user interference, MUI)^[7]。利用缓存队列机制半双工 (half-duplex, HD) 中继取代全双工 (full-duplex, FD) 系统天线, 可以达到 FD 中继传输容量性能, 可以有效提高系统的自由度并降低中断概率, 具有 FD 自干扰、扩大网络范围和降低硬件复杂度要求的优势。

按缓存队列存储空间为无限和有限, 可分为两种缓存队列机制中继选择方案^[8]。在缓存存储空间无限时, 最优接收 (发送) 中继的缓存存在接收 (发送) 信息时不会溢出。基于此, 参考文献[8]提出一种总是能在前一个时隙选择拥有最佳信源一中继链路的中继来转发信息的 max-max 中继选择算法。在缓存存储空间有限时, 则需要考虑缓

存空间的上溢与下溢, 中继选择算法就不能以信道状态为判断依据, 还必须考虑缓存的存储状况。

从目标上看, 无线信息传输技术的发展主要体现在两个方面: 一是更快的传输速率; 二是更高的传输可靠性。在实际的协作通信场景中, 中继系统为同步、切换、可靠性等机制付出较大开销, 仅对于单一中继的研究固然是不够的^[9]。大量文献研究了多个模型场景中的 SWIPT 技术, 研究模型包括双向传输系统^[10]、多用户系统^[11]、MIMO 系统^[12]、MISO 系统^[13]、认知无线电系统^[14]、OFDM 系统^[15]等。

对于无源中继通信网络而言, 中断概率是协作中继系统的重要性能指标, 能较好地刻画系统利用无源中继成功进行信息传输的概率; 而对能效的研究则可以刻画系统能量利用率。针对 SWIPT 系统的可靠性和能效的折中问题, 本文重点研究了一种保证能效的自适应链路选择策略, 详细推导了所提策略的能效表达式, 并以能效作为目标函数, 以系统中断概率、收集能量阈值作为约束条件, 通过构造和求解优化问题, 得到最佳接收中继和最佳转发中继, 同时以虚拟 FD 方式实现协作传输, 分析了 SWIPT 系统稳态分布的可达分集增益。

2 系统模型和假设

考虑 SWIPT 网络缓存队列中继选择场景如图 1 所示, SWIPT 网络由源节点 S、目的节点 D、 K 个 SWIPT 缓存队列中继节点 $\{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ 组成。其中, $R_i (1 \leq i \leq K)$ 表示第 i 个 SWIPT 中继节点, 每个中继均由功率分割器、信息收发机、能量收集器组成。信息收发机配备一个长度为 L 的缓存队列, 用于接收 S 发送的数据且在该中继内进行解码, 当该中继被选为最佳转发中继时, 将缓存队列中的数据转发至 D。参数 L_i 表示存储在中继 R_i 的数据分组数量。

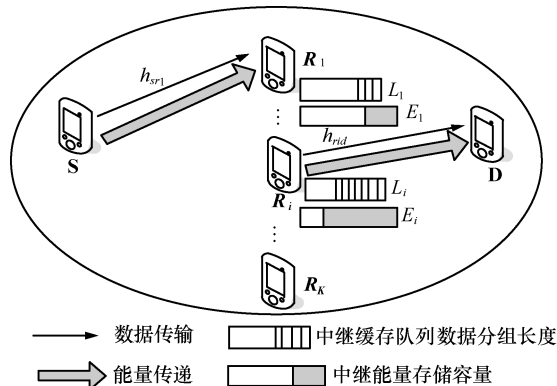


图1 SWIPT网络缓存队列中继选择场景

能量收集器用于收集能量。参数 E_i 表示存储在 R_i 的能量。S 到中继节点 R_i 和中继节点 R_i 到 D 之间的信道系数分别为 h_{sr_i} 、 h_{rd} ，用 l_{kj} ($k \in \{s, r_1, \dots, r_k\}, j \in \{r_1, \dots, r_k, d\}$) 表示在节点 k 和节点 j 之间的信道链路，采用 h_{kj} 表示节点 k 和节点 j 之间的信道系数，假设信道系数服从均指为零、方差为 Ω_{kj} 的循环对称复高斯分布。S 到 R_i 的发送功率和距离分别为 P_s 和 d_i ，路径损耗指数记为 n ，所以 R_i 从 S 接收到的功率可以描述为：

$$P_{R_i} = P_s h_{sr_i}^2 d_{sr_i}^{-n} \quad (1)$$

为了不失一般性，在具体描述中继选择算法之前，做出如下假设：

- 相对于传送信号的功率，源端 S 和目的端 D 电路中信号处理的功率忽略不计；
- 中继节点 R 的存储空间足够大，储能容量足够大，因此不用考虑数据与能量的溢出问题；
- 一个中继节点在一个时隙内只能接收或转发一个数据分组，即第 i 个中继节点接收一个数据分组，表示为 L_i+1 ；
- 系统中所有信道都服从高斯白噪声下的瑞利平坦衰落，即在一次单向传输信息完成的时间 T 内，信道系数 h_{sr_i} 、 h_{rd} 保持不变且相互独立。

3 传输协议

S 根据信道链路 h_{sr_i} 和中继缓存队列状态，确

定最佳接收中继 R_r^* ，S 以一定发射功率将数据分组发送到该最佳接收中继的缓存队列中（在场景图 1 中假设选择的最佳 SWIPT 接收节点为 R_1 ，则 R_1 将接收数据分组进行解码并存入其缓存队列 L_1 ，同时收集 S 能量存储于能量收集器 E_1 ）。在同一时隙内，目的节点 D 根据信道链路 h_{rd} 和中继缓存队列状态，确定最佳转发中继 R_t^* ，并按先入先出（first in and first out, FIFO）排队策略利用收集的能量以一定转发功率将存在其缓存队列中的数据分组进行编码后发送到 D（在场景图 1 中假设选择的最佳 SWIPT 转发节点为 R_t ，则 R_t 利用其能量收集器中存储的能量 E_t 以一定的功率将其缓存队列中的数据分组 L_t 编码后转发至 D）^[16]。

因此，所提 SWIPT 缓存队列中继选择模型能在一个时隙内，根据信道链路状态和中继缓存队列状态，选择出一对最佳中继（最佳接收中继和最佳转发中继）完成信息的协作传输和能量收集过程。采用缓存队列机制的 SWIPT 最佳中继选择方案在实现虚拟全双工（full-duplex, FD）通信的情况下，可以增加 SWIPT 协作分集的空间自由度，降低系统中断概率，同时保障 SWIPT 中继节点的能效。

参考文献[15]研究了基于功率分割（power splitting, PS）的 SWIPT 中继接收机结构，如图 2 所示。该接收机由功率分割器、信息收发机和能量收集器组成。最佳接收中继的功率分割器将接收到的信号以功率分割因子 λ_i 分成两部分，其中一部分 $\sqrt{\lambda_i} y_{r_i}$ 输入信号收发机进行信息解码编码，另一部分 $\sqrt{1-\lambda_i} y_{r_i}$ 输入能量收集器进行能量收集，其中 $\lambda_i \in [0,1]$ ，每个时隙的功率分割因子由中继能量存储器进行管理。信息收发机配备一个长度为 L 的缓存队列，用于存储 S 发送的数据且在该中继内进行解码，当该中继被选为最佳转发中继时，将缓存队列中的数据转发至 D。参数 L_i 表示存储在中继 R_i 的数据分组数量。能量收集器用于收集能量，参数 E_i 表示存储在中继 R_i 的能量。

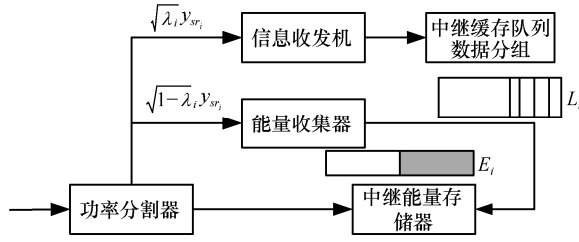


图2 基于功率分割的 SWIPT 中继接收机结构

4 最佳接收/转发中继对选择

假设 T 为完成一次传输的总时间，有两个传输阶段（S-R 阶段、R-D 阶段），若采用等时隙划分，则各阶段持续 $T/2$ 的时间见表 1。

表 1 能量收集传输协议

第一阶段 $T/2$	第二阶段 $T/2$
R 从 S 收集能量 $((1-\lambda_i)P_S)$	R 用收集到的能量向 D 传输信息
S 向 D 传输信息 $(\lambda_i P_S)$	

在第一阶段，S 向 R 传输信号，经过中继接收机处理，在第一阶段第 i 个 SWIPT 中继接收信号表示为：

$$y_{sr_i} = \sqrt{P_S} x_{sr_i} h_{sr_i} d_{sr_i}^{-\frac{n}{2}} + n_{sr_i}, i = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

其中，S 发送功率为 P_S ，归一化发送信号 x_{sr_i} ，S 与该中继之间距离 d_{sr_i} ， n 为路径损耗指数（自由空间路径损耗指数 $n=2$ ）， n_{sr_i} 为信道高斯加性白噪声，其服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布。

第 i 个 SWIPT 中继在其信息收发机处的接收信号为 $y = \sqrt{\lambda_i} y_{sr_i}$ ，能量收集器收集的能量为 $E_{r_i} = \eta(T/2)(1-\lambda_i)P_S |h_{sr_i}|^2 d_{sr_i}^{-n}$ ，其中功率转换效率 $0 \leq \eta \leq 1$ 。

不失一般性，在某一时刻，设 S 发送信号为 x_s ，最佳接收中继 R_r^* 接收的信号包括来自于最佳发送中继 R_t^* 的干扰，因此，最佳接收节点接收信号表示为：

$$y_{SR_r^*} = \sqrt{P_S} h_{SR_r^*} x_s d_{SR_r^*}^{-\frac{n}{2}} + \sqrt{P_{R_t^*}} h_{R_t^* R_r^*} y_{R_t^*} + n_{SR_r^*} \quad (3)$$

其中， $d_{SR_r^*}$ 为 S 到最佳接收中继 R_r^* 之间的距离， $P_{R_t^*}$ 为最佳转发中继功率，其转发信号为最佳转发中继 R_t^* 缓存队列中的数据分组 $y_{R_t^*}$ ， R_t^* 将 $y_{R_t^*}$ 发送给 R_r^* 。由于最佳接收中继与最佳转发中继均在协作中继簇内，故不考虑两个中继节点之间的距离。

最佳接收中继在其信息收发机处的接收信号为：

$$y_{R_r^*} = \sqrt{\lambda_{R_t^*}} y_{SR_r^*} \quad (4)$$

最佳转发中继在其信息收发机处的接收信号为：

$$y_{R_t^*} = \sqrt{\lambda_{R_r^*}} y_{SR_r^*} \quad (5)$$

能量收集器收集的能量为：

$$E_{R_r^*} = \eta(T/2)(1-\lambda_{R_r^*})P_S |h_{SR_r^*}|^2 d_{SR_r^*}^{-n} \quad (6)$$

因此，在第二阶段初，最佳转发中继 R_t^* 的发送功率为：

$$P_{R_r^*} = \frac{E_{R_r^*}}{(T/2)} = \eta(1-\lambda_{R_r^*})P_S |h_{SR_r^*}|^2 d_{SR_r^*}^{-n} \quad (7)$$

在第二阶段末，D 接收来自最佳转发中继 R_t^* 的接收信号为：

$$y_{R_t^* d} = \sqrt{P_{R_t^*}} h_{R_t^* d} d_{R_t^* d}^{-\frac{n}{2}} y_{R_t^*} + n_{R_t^* d} \quad (8)$$

其中， $h_{R_t^* d}$ 为最佳转发中继到目的节点的信道系数， $d_{R_t^* d}$ 为最佳转发中继到目的节点的距离， $n_{R_t^* d}$ 为信道高斯加性白噪声，其服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布。所以，源节点 S—最佳接收中继 R_r^* 、最佳发送中继 R_t^* —目的节点 D 间的信息可达速率分别表示为：

$$I_{SR_r^*} = \text{lb}\left(1 + \frac{\lambda_i P_S |h_{SR_r^*}|^2 d_{SR_r^*}^{-n}}{P_{R_t^*} |h_{R_t^* R_r^*}|^2 + \delta^2}\right) \quad (9)$$

$$I_{R_t^* d} = \text{lb}\left(1 + \frac{P_{R_t^*} |h_{R_t^* d}|^2}{\delta^2}\right)$$

为了保证最佳接收中继 R_r^* 可以对信源信息进行正确解码，需要符合两个条件：源—最佳接

收中继的传输频带利用率必须大于指定传输频带利用率 r_0 ；最佳接收中继 R_r^* 必须正确分离源于最佳发送中继 R_t^* 的干扰。

当最佳接收中继 R_r^* 正确分离了源于最佳发送中继 R_t^* 的干扰，则有：

$$I_{SR_r^*} = \text{lb}\left(1 + \frac{\lambda_i P_S |h_{SR_r^*}|^2 d_{SR_r^*}^{-n}}{\delta^2}\right) \geq r_0 \Rightarrow \frac{(2^{r_0} - 1)\delta^2}{\lambda_i |h_{SR_r^*}|^2 d_{SR_r^*}^{-n}} \leq P_S \leq P_{\max} \quad (10)$$

考虑以系统能效为目标，同时以中继缓存队列状态、系统中断概率、收集能量阈值、功率自适应控制约束下的 SWIPT 最佳接收/转发中继选择方案，通过求解优化问题获得最佳接收中继与最佳转发中继，以虚拟 FD 方式实现协作传输。最佳接收中继选择策略优化问题如下：

$$R_r^* = \arg \min_{R_i \in Q_i} \left\{ \frac{P_S / |h_{SR_i}|^2 d_{SR_i}^{-n}}{I_{SR_i}} \right\} \quad \text{s.t.} \begin{cases} \Pr\{I_{SR_i} < r_0\} \leq \Pr_{\text{out}} \\ I_{SR_i} \geq r_0 \\ I_{R_r^* R_i} \geq r_0 \\ E_{R_r^*} \geq e_{\text{th}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其中，} I_{SR_i} = \text{lb}\left\{1 + \frac{P_S |h_{SR_i}|^2 d_{SR_i}^{-n}}{\sigma^2}\right\}, \quad I_{R_r^* R_i} = \text{lb}\left\{1 + \frac{P_{R_i^*} |h_{R_i^* R_i}|^2}{P_S |h_{SR_i}|^2 + \sigma^2}\right\}, \quad r_0 \text{ 为期望信息传输频带利}$$

用率， $\Pr_{\text{out}}$ 为虚拟 FD 中继采用固定发射功率传输数据分组时达到期望频带利用率导致的系统中断概率。最佳转发中继选择策略优化问题如下：

$$R_t^* = \arg \min_{R_i \in Q_i} \left\{ \frac{P_{R_i} / |h_{R_i d}|^2 d_{R_i d}^{-n}}{I_{R_i d}} \right\}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Pr\{I_{R_i d} < r_0\} \leq \Pr_{\text{out}} \\ I_{R_i d} \geq r_0 \\ I_{R_r^* R_i} \geq r_0 \\ E_{R_i^*} \geq e_{\text{th}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{其中，} I_{R_i d} = \text{lb}\left\{1 + \frac{P_{R_i} |h_{R_i d}|^2 d_{R_i d}^{-n}}{\sigma^2}\right\}, \quad I_{R_r^* R_i} = \text{lb}\left\{1 + \frac{P_{R_i^*} |h_{R_i^* R_i}|^2}{P_S |h_{SR_i}|^2 + \sigma^2}\right\}.$$

因此，本文方案所选出的一对最佳接收/转发中继节点具有如下优点：

- 最佳接收中继 R_r^* 满足较大信道增益，较小缓存队列长度 L_i ，最低信源发送功率；
- 最佳发送中继 R_t^* 满足较大信道增益，较大缓存队列长度 L_i ，最低中继发送功率。

5 性能分析

5.1 中断概率

一条链路 l_{kj} 发生中断的概率为：

$$\begin{aligned} \Pr_0 &= \Pr\{I_{kj} < r_0\} = \Pr\left\{\text{lb}\left(1 + \frac{P_k |h_{kj}|^2}{\delta^2}\right) < r_0\right\} \\ &= \Pr\left\{|h_{kj}|^2 < \frac{(2^{r_0} - 1)\delta^2}{P_k}\right\} \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{2^{r_0} - 1}{P_k}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

记 $\mathbf{A}$ 为中继缓存队列的状态转移矩阵， $\boldsymbol{\pi}$ 为中继缓存队列状态的稳态分布向量，根据参考文献[16]，可得系统的中断概率为：

$$\Pr_{\text{out}} = \text{diag}(\mathbf{A})\boldsymbol{\pi} \quad (14)$$

其中， $\text{diag}(\mathbf{A})$ 为状态转移矩阵 $\mathbf{A}$ 的对角元素，表示转移状态未发生变化，没有数据分组传输，即该中继链路出现中断。 $\boldsymbol{\pi} = (\mathbf{A} - \mathbf{I} + \mathbf{B})^{-1} \mathbf{b}$ ， $\boldsymbol{\pi} = [\pi_1, \dots, \pi_{(L+1)^K}]^T$ ， $\mathbf{b} = [1, \dots, 1]^T$ ， $\mathbf{I}$ 表示单位矩



阵并且 $\mathbf{B}$ 表示所有元素均为 1 的 $(L+1)^K \times (L+1)^K$ 大小的矩阵。

当中继缓存队列 $L \rightarrow \infty$ ，若发送功率 $P_k \rightarrow \infty$ ，则系统中断概率仅与可达链路的条数有关。 K 个中继的可达链路为 $2K$ 条，系统的中断概率可化简为：

$$\begin{aligned} \Pr_{\text{out}}^{\infty} &= (\Pr_0)^{2K} \\ &= \left(1 - \exp\left(-\frac{2^{r_0} - 1}{P_k}\right) \right)^{2K} \end{aligned} \quad (15)$$

此时，系统的可达分集增益为：

$$d_{\infty} = -\lim_{P_k \rightarrow \infty} \frac{\text{lb}(\Pr_{\text{out}}^{\infty})}{\text{lb} P_k} = 2K \quad (16)$$

5.2 能效分析

在 SWIPT 中，信息传输速率和能量收集的最大化不存在正相关，需要寻求信息传输速率与能量收集之间的最佳折中。

能效作为衡量能量受限无线通信系统性能的重要指标，在不同应用场景中，能效有不同的定义^[13-15,17]。本文定义能效为发送端单位能耗下链路可实现的传输速率或信道容量。其表达式为：

$$\eta_c = \frac{I}{E_s - E_{R_i}} \quad (17)$$

其中， I 为 S-R 链路的信息传输速率， $(E_s - E_{R_i})$ 为 S-R 链路的能量消耗。

将式 (6)、式 (10) 代入式 (17)，能效可以表示为：

$$\eta_c = \frac{\text{lb}(1 + \frac{\lambda_i P_s |h_{SR_i}|^2 d_{SR_i}^{-n}}{\delta^2})}{(T/2)(1 - \eta(1 - \lambda_i) |h_{SR_i}|^2 d_{SR_i}^{-n}) P_s} \quad (18)$$

6 仿真性能分析

假设 SWIPT 网络含有两个缓存队列长度为 2 的中继，即 $K=2$ ， $L=2$ 。该系统中继有 9 个缓存队列状态（见表 2），故而状态转移矩阵为 $\mathbf{A}_{9 \times 9}$ 。结合马尔可夫链模型，由最佳中继选择算法，推

得该系统的状态转移如图 3 所示。

表 2 $K=2$ ， $L=2$ 的 SWIPT 系统中继缓存状态表

状态	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
$L_1 L_2$	00	01	02	10	11	12	20	21	22

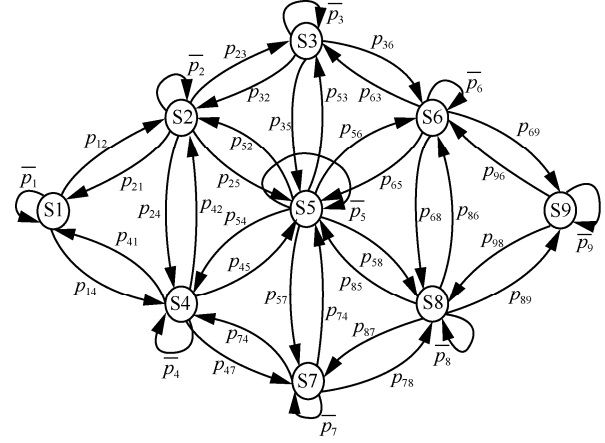


图 3 $K=2$ ， $L=2$ 的 SWIPT 系统中继缓存状态转移

根据对缓存队列转移的分析，推出该系统的状态转移矩阵为：

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \bar{p}_1 & p_{12} & 0 & p_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & \bar{p}_2 & p_{23} & p_{24} & p_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & \bar{p}_3 & 0 & p_{35} & p_{36} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & p_{42} & 0 & \bar{p}_4 & p_{45} & 0 & p_{47} & 0 & 0 \\ 0 & p_{52} & p_{53} & p_{54} & \bar{p}_5 & p_{56} & p_{57} & p_{58} & 0 \\ 0 & 0 & p_{63} & 0 & p_{65} & \bar{p}_6 & 0 & p_{68} & p_{69} \\ 0 & 0 & 0 & p_{74} & p_{75} & 0 & \bar{p}_7 & p_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{85} & p_{86} & p_{87} & \bar{p}_8 & p_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{96} & 0 & p_{98} & \bar{p}_9 \end{pmatrix} \quad (19)$$

SWIPT 系统的参数设置为：以相同的功率分割因子 λ 对能量进行分配；指定传输频带利用率 $r_0 = 1 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ， $\eta = 1$ ，归一化距离 $d_{SR_i} = d_{R_i d} = 1$ ；信道噪声为高斯白噪声，噪声方差 $\sigma^2 = 10^{-5}$ ；所有指数型随机变量的均值 $|h_{kj}|^2 = 1$ 。

6.1 中断概率分析

6.1.1 功率分割因子 λ 对系统中断性能的影响

图 4 给出了当源节点 S 发送功率 $P_s = 20 \text{ dB}$ 时，功率分割因子 λ 对 SWIPT 网络中断性能的影响。

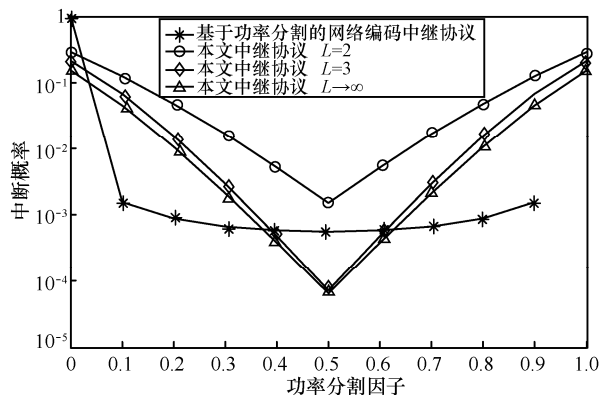


图4 功率分割因子对 SWIPT 网络中断性能的影响

随着 λ 的增大, 网络中断概率先降低后上升, 4 种情况均在 $\lambda = 0.5$ 处取得最优值。造成这种现象的原因是, λ 较小时, 用于信息编译码的能量较少, 易导致源节点 S 到中继 R 链路发生中断; 而当 λ 大于最优值时, 虽然有足够的能量用于 S-R 链路传输, 可中继收集的剩余能量较少, 易导致中继 R 到目的节点 D 链路发生中断。

同时可看到, 当缓存队列长度 $L \geq 3$ 时, 功率分割因子取值 $0.4 < \lambda < 0.6$ 时, 本文所提中继选择方案可达最小中断概率小于基于功率分割的网络编码 (power splitting-based network coding) 中继协议的可达最小中断概率^[15]。

6.1.2 源发送功率 P_s 对系统中断性能的影响

图 5 给出了当功率分割因子 $\lambda = 0.5$, 源发送功率对网络中断性能的影响。随着源发送功率的增大, 有较多的能量用于 S-R 链路信息传输, 同时中继收集到了较多的能量用于 R-D 链路传输, 保证了传输链路的可靠性, 因此网络中断概率逐渐降低。基于功率分割的网络编码中继协议得到的中断概率有更快的收敛性^[15], 当 $P_s > 5$ dB 时, 源发送功率对改善中断概率的影响就变得很微小, 此时中断概率 $\text{Pr}_{\text{out}} > 10^{-4}$ 。随着源发送功率的增大, 所提方案具有比上述协议更小的中断概率。

结合图 4 和图 5 可知, 随着缓存队列长度 L 的增加, 采用所提能效优先缓存队列机制中继选

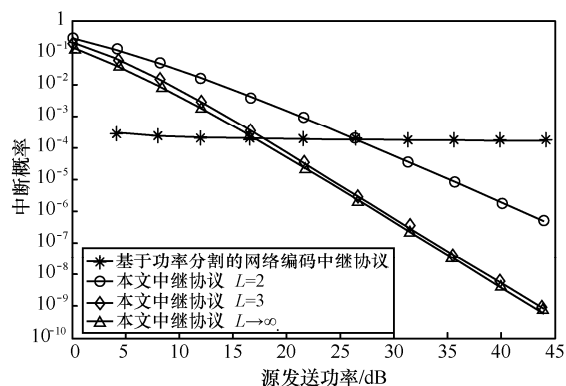


图5 源发送功率对网络中断性能的影响

择方案的中断概率逐渐降低。究其原因, 增加缓存队列长度, 为系统提供了更多可用链路, 提高了分集增益, 故降低了系统中断概率。同时, 对于所提能效优先缓存队列机制中继选择方案, 当缓存队列长度 $L=3$ 时的可达中断性能接近于 $L \rightarrow \infty$ 时的可达中断性能。

本文方案综合考虑了链路信道增益、中继缓存队列状态以及系统的能量获取比例, 在时隙 T 内选择一对最佳中继分别进行数据分组的接收和转发。最佳中继选择协议保证了缓存队列尽可能处于非空非满状态, 满足能效最低要求, 故可得到更多的可用链路, 降低了系统中断概率。

6.2 能效分析

6.2.1 功率分割因子 λ 对系统能效的影响

图 6 给出了在不同功率转换效率的情况下, 功率分割因子 λ 对系统能效的影响。随着功率分割因子 λ 的增大, 用于信息传输的能量较大, 信道可达速率增大, 但付出的代价是能量消耗速度的加快, 因此能效逐渐降低。同时可观察到, 在相同的功率分割因子下, 较高的功率转换效率能获得较高的系统能量效率。而在相同的能效指标要求下, 高功率转换效率所需的功率分割因子较大。

6.2.2 源发送功率 P_s 对系统能量效率的影响

图 7 给出了源发送功率对系统能量效率的影响。源发送功率的增加 (相当于源端与中继端

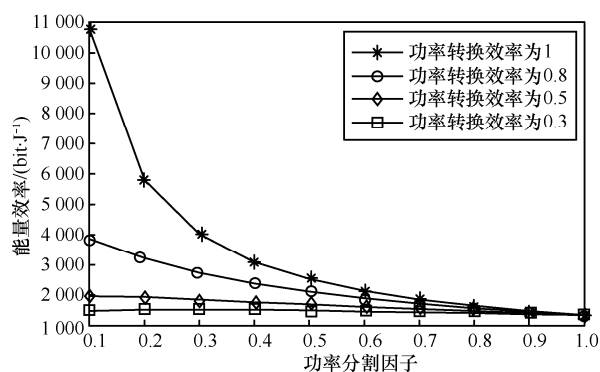


图6 功率分割因子对系统能效的影响

之间的距离较小), 有效地提高了链路传输速率, 直观上有利于提高系统能量效率, 但同时链路能量损耗增加, 系统的能量效率反而降低。在相同的源发送功率下, 与图6相似, 较高的功率转换效率意味着高能量利用率, 故能得到较高的系统能量效率。但在相同的能效指标要求下, 若系统以较高的功率转换效率传输, 则需要较大的源发送功率。

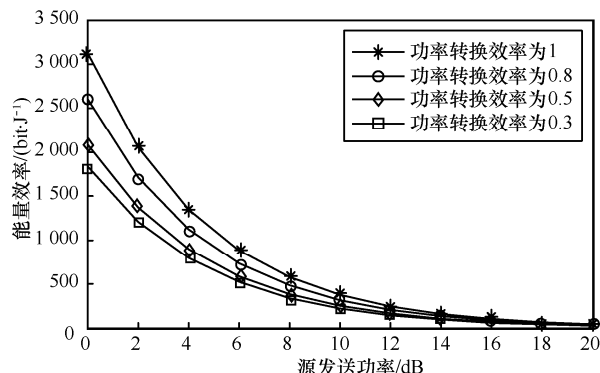


图7 源发送功率对系统能量效率的影响

7 结束语

以绿色 SWIPT 通信为研究背景, 提出了能效优先的缓存队列机制最佳接收/转发中继对选择方案。首先介绍了 SWIPT 网络缓存队列中继选择模型和自适应链路选择传输协议, 推导了所提方案的能效表达式, 并以能效作为目标函数, 在满足系统中断性能、能量收集阈值要求和信息传输频带利用率要求下进行最佳接收/转发中继对的

选择, 利用中继缓存队列的状态转移矩阵和稳态分布向量, 得到系统中断概率和系统能量效率。仿真分析表明, 发送功率的提高降低了系统中断概率, 同时也降低了系统的能量效率。为兼顾中断概率和能效, 并不是以最大功率发送信号, 而应是以“最优”功率发送信号, 在有效降低 SWIPT 网络中断概率的同时实现缓存队列 SWIPT 中能效与中断性能的最佳折中。

参考文献:

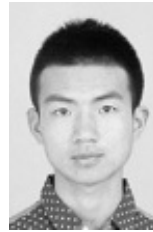
- [1] BI S, HO C K, ZHANG R. Wireless-powered communications: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 117-125.
- [2] 陈恩民. 基于 SWIPT 的 MIMO 中继信道传输策略优化研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
CHEN E M. Study on optimal transmission strategy for simultaneous wireless information and energy transfer in MIMO relay channels [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [3] WEN Z, LIU X, CHEN Y, et al. Joint transceiver designs for full-duplex MIMO SWIPT systems based on MSE criterion[J]. China Communications, 2016, 13(10): 79-85.
- [4] 蒋学仕. 缓冲辅助的中继系统链路选择技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
JIANG X S. Research on link selection technology of buffer-aided relay system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [5] 李伟. 多用户系统中缓冲辅助中继关键技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
LI W. Research on buffer-aided relay networks with multi-source and multi-destination [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [6] ZLANTANOV N, SCHÖBER R, POPOVSKI P. Buffer-aided relaying with adaptive link selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(8): 1530-1542.
- [7] IKHLEF A, JUNSU K, SCHÖBER R. Mimicking full-duplex relaying using half-duplex relays with buffers [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 3025-3037.
- [8] IKHLEF A, MICHALOPOULOS D S, SCHÖBER R. Max-Max relay selection for relays with buffers [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1124-1135.
- [9] NOMIKOS N, CHARALAMBOUS T, KRIKIDIS I, et al. A buffer-aided successive opportunistic relay selection scheme with power adaptation and inter-relay interference cancellation for cooperative diversity systems [J]. IEEE Transactions on

- Communications, 2015, 63(5): 1623-1634.
- [10] LIU G, YU R, JI H, et al. In-band full-duplex relaying: a survey, research issues and challenges [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 500-524.
- [11] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [12] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(7): 1850-1863.
- [13] 卢晓梅. 认知无线电系统的携能关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- LU X M. Research on key SWIPT technology in cognitive radio systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [14] LEE S, ZHANG R, HUANG K K. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4788-4799.
- [15] 杜冠瑶. 无线协作中继网络的资源分配和信息能量同传技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- DU G Y. Resource allocation and SWIPT for cooperative relaying wireless networks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [16] 李良. 基于能量有效性的绿色协作传输方案设计与关键技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- LI L. Key technology research and design of energy-efficiency based green cooperative transmission schemes [D]. Hangzhou:

Hangzhou Dianzi University, 2016.

- [17] 张诚诚. 无线系统中信息与功率联合传输技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- ZHANG C C. Research of simultaneous wireless information and power transfer [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.

[作者简介]



洪鑫龙 (1993-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为能效优先的 SWIPT 网络中缓存队列机制中继选择方案设计。



许晓荣 (1982-), 男, 博士后, 杭州电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 SWIPT 网络中缓存队列机制中继选择与资源调度、能效优先的认知无线网络资源分配等。

姚英彪 (1976-), 男, 博士后, 杭州电子科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线网络的能量有效性、无线资源管理等。