

无线携能网络中一种基于时隙切换的中继辅助信能同传协议

洪鑫龙 许晓荣 石振波

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江杭州 310018)

摘 要: 针对网络终端设备低能耗和网络环境延长生命周期的需求, 无线信息与能量协同传输技术已成为当前无线通信领域中新的绿色传输技术之一。论文以绿色无线携能(SWIPT)网络为研究背景, 引入具有能量收集功能的 SWIPT 中继, 给出了 SWIPT 网络中基于时隙切换(TS)的中继辅助信息与能量同传的场景与数学模型。论文设计了基于 TS 的中继辅助信能同传协议与 SWIPT 中继接收机结构, 分析了系统中断性能(OP)与能效性能(EE), 给出了时隙切换因子对 OP 与 EE 的影响。数值仿真结果表明, 为兼顾 SWIPT 网络中的中断和能效, 源节点应以最优功率发送信号, 以实现绿色 SWIPT 网络信息传输与能量收集均衡。

关键词: 无线携能; 时隙切换; 中断性能; 能效; 信能同传协议

中图分类号: TP393 文献标识码: A DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2018.12.008

A Relay-aided Information and Power Transfer Protocol Based on Time Switching Structure in SWIPT

HONG Xin-long XU Xiao-rong SHI Zhen-bo

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: Aiming at the low energy consumption of equipment and the long life cycle of network environment, wireless information and energy simultaneous transmission technology has emerged as one of the novel green transmission technologies in wireless communication. Green simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) network is taken as the research background, SWIPT relays that provided with energy harvesting are introduced in this paper. Time switching (TS) based relay-aided information and power transfer scenario and mathematical model are presented. A relay-aided information and power transfer protocol based on TS structure and the corresponding SWIPT relay receiver structure are designed. Outage performance (OP) and energy-efficiency (EE) performance are analyzed, and the effect of TS factor to OP and EE performance are presented respectively. Numerical results show that, in order to guarantee OP and EE performance in SWIPT, the source should transmit signals with optimum power. The tradeoff between information transmission and energy harvesting in SWIPT can be achieved consequently.

Key words: simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT); time switching (TS); outage performance (OP); energy-efficiency (EE); information and power transfer protocol

1 引言

近年来,不断扩大的信息技术(Information

and Communication Technology, ICT)产业规模,大量普及的智能移动终端,以及激增的数据流量需求和无处不在的无线接入服务,极大地增加了智能移动

收稿日期: 2018-08-07; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 浙江省自然科学基金一般项目“绿色无线携能网络中继选择与资源调度策略研究”(LY19F010011); 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(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(GK178800208018); 浙江省科协青年科技人才培养工程资助项目(2016YCGC009)

设备的能量消耗^[1]。智能移动设备普遍由储电量受限的电池供应电能,而电池储电量已成为限制网络使用寿命的瓶颈,因为在过去数十年间,电池储电量并没有显著性扩大。针对设备实现低能耗,网络环境实现较长生命周期的需求,无线信息与能量协同传输技术应运而生^[2]。

在以往的研究中,无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)和信息传输(Wireless Information Transfer, WIT)应对不同的研究需求,衡量系统的好坏有不同的性能指标:无线能量传输侧重于能量传输效率最大化,而无线信息传输则偏重于在噪声干扰和信道衰减过程中信道传输速率最大化^[3]。近年来,人们发现射频信号中同时蕴含信息和能量,通过调整设计,统一设计目标,WPT和WIT可以找到折衷点^[4]。

在实际的通信网络中,信源发送的信息大多由多个可利用的中继协助转发。传统半双工中继传输的模式是前后时隙依次接收和转发。若中继在接收与转发两条线路中有一条线路状况不理想,将导致信息传输速率下降。因此传统半双工中继协作模式的性能受限于信道状况^[5]。

为应对传统半双工中继传输技术的不足,本文采用协作传输技术。协作传输作为一种新型无线传输技术,通过多用户协作达到多用户之间的空间分集,能够显著提高无线传输的可靠性。作为一种新型的传输技术,协作传输技术可应用于无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)^[6],中继蜂窝网络^[7],移动网络^[8],无线携能网络^[9]。

作为一种新型的能量传输技术,无线能量与信息协同传输的模式如下:没有电能供电的节点,在后续无线通信链路传输信号前,需要从周围的射频信号中收集能量并且储存^[10]。这项技术的优点是不必配置容量受限的电池,同时对外界环境依赖性小,不必从自然环境中收集能量(如地热能、潮汐能、太阳能等)^[11]。

目前,基于中继的无线信息与能量协同传输已有大量研究工作^[12-14]。文献[12]考虑用于物联网应用的认知无线携能通信网络,其由主用户通信和认知通信系统组成,该文献提出了信息反向散射通信(BackCom)模式和能量收集模式的混合传输机制;文献[13]研究了具有反向散射模式的射频携能

通信网络,节点在休眠状态下收集能量,在活动状态下以反向散射模式发送信息;文献[14]提出了一种包括混合接入点和多用户反向散射模式辅助的无线携能通信网络,通过最优用户的工作模式选择与时间分配,以最优传输策略得到最大化总吞吐量。

无线携能通信技术使得能量与信息资源得到了有效利用。为了满足绿色通信需求,无线携能网络能量效率的研究也得到广泛开展^[15-17]。协作中继通信有两个重要性能指标,一是描述网络可靠性的中断概率,刻画网络在中继节点的帮助下成功传输信息的概率;二是描述网络能量利用率的能效^[18]。针对SWIPT网络中可靠性与能效折衷问题,论文设计了基于TS的中继辅助信能同传协议与SWIPT中继接收机结构,研究了一种保障能效的自适应中继辅助信能同传协议。以能效作为目标函数,论文推导了能量收集约束下的系统中断概率,分别分析了系统中断性能(OP)与能效性能(EE),分析了时隙切换因子对OP与EE的影响。

2 系统建模与假设

在给出信息与能量同传协议之前,论文给出以下假设^[19]:

(1)发送端 S_1 、 S_2 和目的接收端D电路中信号处理的功率很小,可忽略不计。

(2)系统中所有信道均满足瑞利平坦块衰落。信道系数为 h_{s_r} 和 h_{r_d} ,在网络中一次单向传输信息完成的时间间隔 T 内,信道系数不变且相互独立。

(3)中继节点R储存能量空间足够大,同时信息缓存存储空间也足够大。故可忽略能量和信息的溢出问题。

图1为无线携能网络基于时隙切换的中继辅助信息与能量传输场景图。SWIPT中继具有信息传输与能量收集功能。源节点 S_1 和 S_2 由电源供电,没有电能供应的中继R能量受限,R需要从 S_1 和 S_2 发送的射频信号中接收能量并存储,全部用于后续中继R到目的地节点D的信息传输。在中继R的辅助下,源节点 S_1 和 S_2 向目的地节点D分别发送独立的信号 x_1 和 x_2 。

本文假设SWIPT网络中节点信道模型为平坦瑞利块衰落。信道系数 $h_{i,j}$ ($i, j \in S, R, D, 1, 2$)服从独立循环对称复高斯随机变量,在一次双向传输信

息交换完成的时间间隔 T 内,信道系数保持不变。
 $n_{i,j}(i,j \in S,R,D,1,2)$ 为加性高斯白噪声。

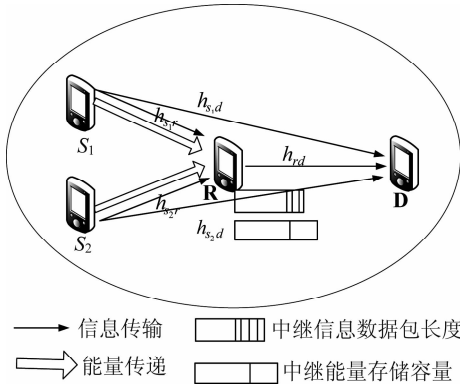


图 1 无线携能网络基于时隙切换的中继辅助信息与能量传输场景图

Fig. 1 Relay-aided information and power transfer scenario based on time switching structure in SWIPT

图 2 为基于时隙切换的 SWIPT 中继接收机结构。该接收机由时隙切换器、能量收集器与信息收发机组成。 S_i 发送的信号在 $(1-\sigma)T/2$ 的时间内,由中继 R 的能量收集器收集能量,在 $\sigma T/3$ 的时间内,则由中继 R 处的信息收发机译码信息,其中 $\sigma \in [0,1]$,中继能量存储器管理每个时隙的时隙切换因子。

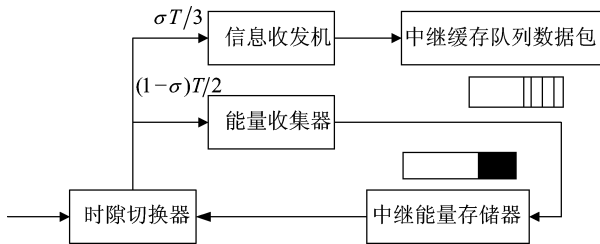


图 2 基于时隙切换的 SWIPT 中继接收机结构
 Fig. 2 SWIPT relay receiver structure based on TS

表 1 为基于时隙切换的中继辅助信息与能量传输方法时隙分配表。假定 T 为一次双向传输的总时间,时隙切换因子 σ 表示信息传输的时间比例, σT 表示用于信息传输的时间,平均分成三部分,依次为 S_1 向 R 的信息传输, S_2 向 R 的信息传输,R 向 D 广播信息。 $(1-\sigma)T$ 表示中继 R 从发送信号 $x_i(i=1,2)$ 采集能量的时间,平均分成两部分,依次为从 S_1 中收集能量,从 S_2 中收集能量。在 R 向 D 广播信息阶段,R 将收到的信息 x_1 和 x_2 进行合并,形成

新的信号 x_R ,并利用收集到的能量向 D 进行广播。

表 1 基于时隙切换的中继辅助信息与能量传输方法时隙分配表

Tab. 1 Time slot allocation table for relay-aided information and power transfer based on TS

传输链路	分配时隙
R 从 S_1 收集能量	$(1-\sigma)T/2$
R 从 S_2 收集能量	$(1-\sigma)T/2$
S_1 向 R 传输信息	$\sigma T/3$
S_2 向 R 传输信息	$\sigma T/3$
R 利用收集到的能量向 D 广播信息	$\sigma T/3$

S_1 和 S_2 分别以功率 P_1 和 P_2 广播信息 x_1 和 x_2 ,用户 D 和 SWIPT 中继 R 都能收到此消息。用户 D 收到的信息 y_{s_1d} 和 y_{s_2d} 分别为:

$$y_{s_1d} = \sqrt{P_1} h_{s_1d} x_1 + n_{s_1d} \quad (1)$$

$$y_{s_2d} = \sqrt{P_2} h_{s_2d} x_2 + n_{s_2d} \quad (2)$$

其中, x_i 是单位功率信号; h_{s_1d} 和 h_{s_2d} 分别为 S_1 到 D 和 S_2 到 D 链路的信道。特别地, $y_{s_id}(i=1,2)$ 并非 D 接收 S_i 的直接有用信号,但能够辅助 D 从中继传送的混合信号 x_R 中译码源信号。

同时,在中继信息收发机处理后,中继 R 收到的基带信号 $y_{r,i}$ 为:

$$y_{r,i} = \sqrt{P_i} h_{s_1r} x_i + n_{s_1r} \quad (3)$$

其中, h_{s_1r} 是 S_i 到 D 链路的信道。在中继能量接收机处理后,中继从 S_i 发送的源信号中采集到的能量为:

$$E_i = \eta P_i |h_{s_1r}|^2 \cdot \frac{(1-\sigma)T}{2} \cdot d_{s_1r}^{-m} \quad (4)$$

其中, $0 \leq \sigma \leq 1$ 为时隙切换因子, $0 < \eta \leq 1$ 代表能量转换效率, $d_{s_1r}^{-m}$ 为 S_i 到中继 R 的距离, m 代表路径损耗因子(自由环境下路径损耗因子 $m=2$), T 为双向传输的总时间。

在 S_i 向 x_1 和 x_2 发送信号的过程中,中继收集到 E_1+E_2 的能量,并将收集到的能量全部用于后续向 D 广播信号。中继在向目的节点广播阶段的发送功率为:

$$P_r = \frac{E_1 + E_2}{\sigma T/3} \quad (5)$$

收到的信号 $y_{r,1}$ 和 $y_{r,2}$ 先被中继合并成信号 x_R ,

之后以功率 P_r 向 D 广播信息。其中

$$x_R = \varphi_1 y_{r,1} + \varphi_2 y_{r,2} \quad (6)$$

$\varphi_i (i=1,2)$ 为信号 $y_{r,1}$ 和 $y_{r,2}$ 的加权合并系数,选取如下:

$$\varphi_i = \sqrt{\frac{\theta_i}{P_i |h_{s_r}|^2 + 1}} \approx \sqrt{\frac{\theta_i}{P_i |h_{s_r}|^2}} \quad (7)$$

其中, $\theta_1 + \theta_2 = 1$ 。无论 θ_i 取何值, x_R 总是单位功率信号,式(7)具有一般意义,在文献[13]中亦采用^[13]。

D 收到中继 R 的广播信号:

$$y_{rd} = \sqrt{P_r} h_{rd} x_R + n_{rd} \quad (8)$$

由于可以从式(1)和式(2)中译码出 $x_1 (x_2)$, 因此 D 能从接收信号 y_{rd} 中除去干扰信号 $x_2 (x_1)$ 。获得无扰信号:

$$\tilde{y}_{d,1} = \sqrt{P_r} h_{rd} \varphi_1 \sqrt{P_1} h_{s_1r} x_1 + \sqrt{P_r} h_{rd} \varphi_2 n_{s_2r} + \sqrt{P_r} h_{rd} \varphi_1 n_{s_1r} + n_{rd} \quad (9)$$

3 中断性能 (OP) 分析

将 S_1 -D 的传输链路作为研究对象分析中断性能。第一步分析 S 到 D 的链路互信息,第二步分析互信息小于指定速率的概率。根据式(5)中的 P_r , 同时考虑式(7)中选取的近似,可求出 $\tilde{y}_{d,1}$ 的信噪比 γ_1 为:

$$\gamma_1 = \frac{\frac{3(1-\sigma)}{2\sigma} \eta (P_1 + P_2) \theta_1 |h_{s_1r}|^2 |h_{rd}|^2}{\frac{3(1-\sigma)}{2\sigma} \eta (P_1 + P_2) \left(\frac{\theta_1}{P_1} + \frac{\theta_2}{P_2} \right) |h_{rd}|^2 + 1} \quad (10)$$

D 已收到信号 x_1 的两个副本,通过最大比合并 (Maximal Ratio Combining, MRC) 方法,目的节点合并收到的两个信号副本。其中, S_1 到 D 直连链路的信噪比为 $\gamma_0 = P_1 |h_{s_1d}|^2 d_{s_1d}^{-m}$, 目的节点接收到 S_1 的互信息为:

$$I_1 = \frac{2\sigma}{3} \log(1 + \gamma_0 + \gamma_1) \quad (11)$$

当式(11)的互信息小于指定速率 R_i 时便会发生中断,中断概率为:

$$\Pr_{\text{out}} = \Pr(I_1 < R_i) \quad (12)$$

设定速率阈值 R_i , 采用信息与能量协同传输协议的系统中中断概率可由下式计算:

$$\begin{aligned} \Pr_{\text{out}} = & 1 - \exp\left(-\frac{R_0}{P_1 \Omega_{s_1d}}\right) + \\ & \exp\left(-\frac{R_0 b}{a \Omega_{s_1r}}\right) c^{l+1} \\ & \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{R_0 b}{a \Omega_{s_1r}}\right) c^{l+1}}{P_1 \Omega_{s_1d} (a \Omega_{s_1r} \Omega_{rd})^{l+1} l! (l+1)!} \times \\ & \left\{ \ln\left(\frac{c}{a \Omega_{s_1r} \Omega_{rd}}\right) + 2C - \sum_{k=1}^l \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^{l+1} \frac{1}{k} \right\} \times \\ & \left. \left(\frac{1}{P_1 \Omega_{s_1d}} - \frac{b}{a \Omega_{s_1r}} \right)^{-l-2} \times \gamma \left(l+2, \frac{R_0}{P_1 \Omega_{s_1d}} - \frac{R_0 b}{a \Omega_{s_1r}} \right) + H_l \right\} + \\ & \frac{\exp\left(-\frac{R_0}{P_1 \Omega_{s_1d}}\right) c}{P_1 \Omega_{s_1d} a \Omega_{s_1r} \Omega_{rd}} \times \left\{ \ln\left(\frac{c}{a \Omega_{s_1r} \Omega_{rd}}\right) + 2C \right\} \times \\ & \left. \left(\frac{1}{P_1 \Omega_{s_1d}} - \frac{b}{a \Omega_{s_1r}} \right)^{-2} \times \gamma \left(2, \frac{R_0}{P_1 \Omega_{s_1d}} - \frac{R_0 b}{a \Omega_{s_1r}} \right) + H_0 \right\} - \\ & \frac{a \Omega_{s_1r}}{a \Omega_{s_1r} - b P_1 \Omega_{s_1d}} \times \left(\exp\left(-\frac{R_0}{P_1 \Omega_{s_1d}}\right) - \exp\left(-\frac{R_0 b}{a \Omega_{s_1r}}\right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\gamma(\cdot)$ 表示不完全伽马函数, $C \approx 0.5772$ 为欧拉常数, $a = \frac{3}{2} (1-\sigma) \sigma^{-1} \eta (P_1 + P_2) \theta_1$, $b = a P_2^{-1} +$

$a \theta_1 P_1^{-1} \theta_2^{-1}$, $c = 1$, $R_0 = 2 \frac{1.5R_i}{\sigma} - 1$ 。在上式中,

$$H_l = \int_0^{R_0} \exp\left(-\frac{(a \Omega_{s_1r} - b P_1 \Omega_{s_1d}) \tau}{P_1 \Omega_{s_1d} a \Omega_{s_1r}}\right) \tau^{l+1} \ln \tau d\tau \quad (14)$$

4 能效 (EE) 分析

定义能效为源端单位能量消耗下链路实现的信道容量或可达传输速率。能效表达式记为:

$$\eta_c = \frac{I_i}{E_{S_i} - E_i} \quad (15)$$

其中, I_i 为 S_i -R 链路的信道容量, $(E_{S_i} - E_i)$ 为 S_i -R 链路的能量消耗。

上式可进一步表示为:

$$\eta_c = \frac{\log_2 \left(1 + \frac{P_i |h_{s_r}|^2 d_{s_r}^{-m}}{\sigma^2} \right)}{(T/2) (1-\sigma) P_i (1-\eta) |h_{s_r}|^2 d_{s_r}^{-m}} \quad (16)$$

5 数值仿真与分析

文献[16]中提出了基于时隙切换的协作多用户传输(Time Switching-based Cooperative Multi-user Transmission, TSCMT)协议。该协议模型由一个源发送端,一个中继,两个目的节点组成。该文献仅分析了 TSCMT 协议中断概率,并未对能效进行分析。

本文系统模型可作为 TSCMT 协议系统模型的镜像,模型由两个源发送端、一个中继、一个目的节点组成。SWIPT 中继 R 同时具有传输信息和收集能量功能。中继 R 能量受限,R 需要从源节点 S_1 和 S_2 中收集能量并存储。它利用收集到的能量向目的节点 D 进行信息传输。在 SWIPT 中继 R 的辅助下,两个源节点向目的节点 D 分别发送独立的信号。本文系统场景图如图 1 所示。论文通过仿真研究了所提基于 TS 的中继辅助信能同传协议中断性能与能效,以及时隙切换因子对中断概率与能效的影响。

给定频带利用率 $R_f = 1 \text{ bit/s/Hz}$, $\eta = 1$, 归一化距离 $d_{s,d} = 1$, S_1 和 S_2 之间的归一化距离为 1;信道噪声为高斯白噪声,噪声方差 $\sigma^2 = 10^{-5}$;指数型随机变量的均值为 $|h|^2 = 1$ 。

图 3 给出了在不同源发送功率情况下,时隙切换因子对 SWIPT 网络中断性能的影响。由图可知,随着时隙切换因子的增大,用于信息传输的能量提高,链路可达速率提升,因此系统中断概率逐渐下降。在相同的时隙切换因子下,较高的源发送功率可以获得较低的中断概率。

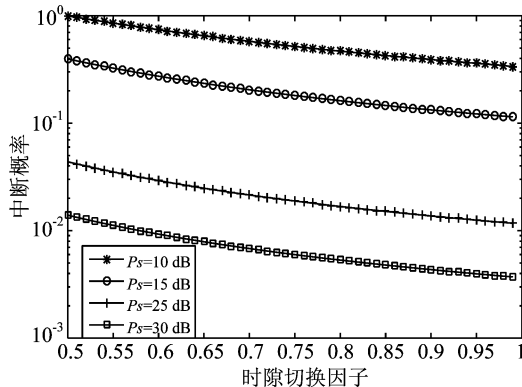


图 3 时隙切换因子对无线携能网络中断性能的影响
Fig. 3 Effect of time switching factor on OP in SWIPT

图 4 给出了源-中继距离对 SWIPT 网络中断性能的影响。设时隙切换因子 $\sigma = 0.5$, 当源节点发送功率较低时,随着源与中继之间距离的增加,中断概率缓慢上升。即当中继离源端较近时,采用本协议,可得到稳定的低中断概率。当源节点发送功率上升到足够大时(如 $P_s = 30 \text{ dB}$),源与中继之间距离的增加对系统中断性能的影响则可忽略不计(中断概率几乎无变化)。

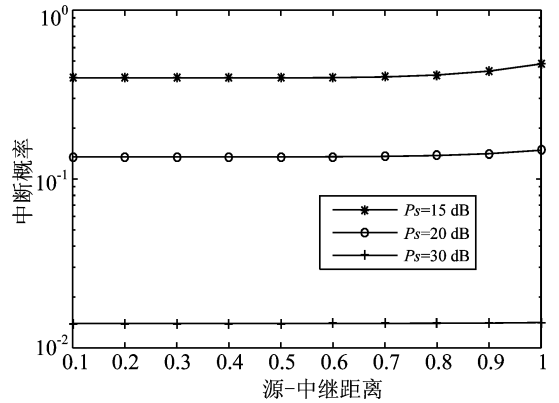


图 4 源-中继距离对无线携能网络中断性能的影响
Fig. 4 Effect of source-relay distance on OP in SWIPT

图 5 给出了能效与时隙切换因子的关系。假定源-中继距离小于归一化距离 1, 当近距离传输时,链路可达速率较大,但以损耗较大的能量为代价,所以能效偏低。由图可知,当源发送功率 $S_1 = 10 \text{ dB}$, 随着时隙切换因子的增大,用于信息传输的能量较大,链路可达速率增大,同时能量消耗的速度降低,因此能效逐渐上升。在相同时隙切换因子下,较高的功率转换效率能得到高能效。

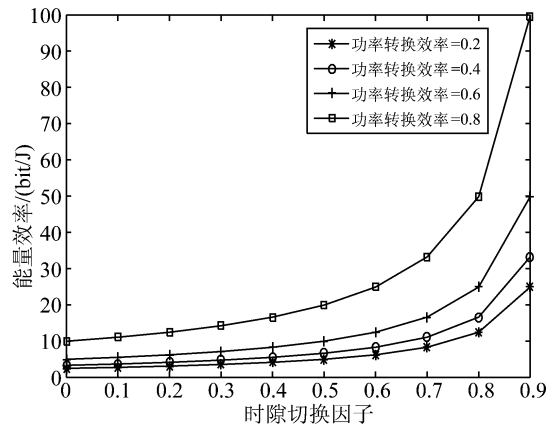


图 5 能效与时隙切换因子关系
Fig. 5 Relationship between EE and time slot switching factor

图6给出了能效与源发送功率的关系。假定源-中继距离小于归一化距离1,当近距离传输时,链路可达速率较大,但以损耗较大的能量为代价,所以能效偏低。由图可知,当时隙切换因子 $\sigma = 0.5$,随着源发送功率的增加,有效提高了链路传输速率,但链路的能量损耗随之增加,故系统能效下降。与图5类似,当源发送功率一定时,高功率转换效率意味着高能效。但在相同的能效指标要求下,高功率转换效率所需较大的源发送功率。

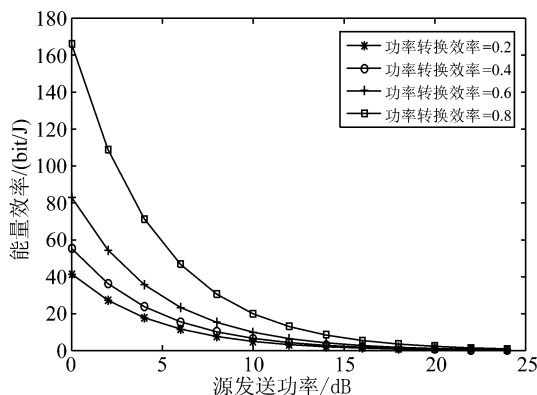


图6 能效与源发送功率关系

Fig. 6 Relationship between EE and source power

6 结论

论文以绿色无线携能网络为研究背景,研究了基于TS的中继辅助信能同传协议。在节点能量受限情况下,给出了基于TS的中继接收机辅助信息与能量传输方法,推导了SWIPT网络中继协作传输的中断概率和能量效率表达式。研究表明,高时隙切换因子在满足能效的性能要求时,能得到较低的中断概率。论文同时分析了源节点发送功率对SWIPT中断性能与能效的影响。为兼顾中断性能与能效,源节点不能以最大功率发送信号,应当以“最优”功率发送信号,以实现OP与EE的最佳折衷。

参考文献

[1] Mitola J, Guerci J, Reed J, et al. Accelerating 5G QoE via public private spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 77-85.

[2] Feng D, Jiang C, Lim G, et al. A survey of energy-efficient wireless communications[J]. IEEE Communications

Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 167-178.

- [3] Zlatanov N, Schober R, Popovski P. Buffer-aided relaying with adaptive link selection[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(8): 1530-1542.
- [4] 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 Enmin. Study on optimal transmission strategy for simultaneous wireless information and energy transfer in MIMO relay channels[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. (in Chinese)
- [5] Hwang I, Lee J W. Half-duplex relaying strategy suitable for a relay with mobility[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2015, 9(1): 108-125.
- [6] 李敏. 基于无线传感器网络的选择协作传输方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- Li Min. Study on selective cooperation in wireless sensor networks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [7] 王佐. 基于缓存队列的两跳中继蜂窝系统性能分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- Wang Zuo. Performance analysis of two-hop-relay cellular systems based on buffer-aided queue[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
- [8] 陈晓易. 移动中继系统中的机会式传输策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Chen Xiaoyi. Opportunistic transmission strategy in mobile relay system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [9] 姚创沐. 无速率编码及其在中继系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Yao Chuangmu. Rateless coding and its application in cooperative relay system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [10] Ikhlef A, Michalopoulos D S, Schober R. Max-Max relay selection for relays with buffers[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1124-1135.
- [11] 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 Xiaomei. Research on key SWIPT technology in Cognitive Radio systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
- [12] Lyu B, Guo H, Yang Z, et al. Throughput maximization for hybrid backscatter assisted cognitive wireless powered

- radio networks [J]. IEEE Internet of Things, 2018, 5(3): 2015-2024.
- [13] Lyu B, You C, Yang Z, et al. The optimal control policy for RF-powered backscatter communication network [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2804-2808.
- [14] Lyu B, Yang Z, Gui G, et al. Wireless powered communication networks assisted by backscatter communication [J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 7254-7262.
- [15] 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.
- [16] 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 Guanyao. Resource allocation and SWIPT for cooperative relaying wireless networks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] Nasir A A, Zhou X, Durrani S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3622-3636.
- [19] 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, 2017.

Li Liang. Key technology research and design of energy-efficiency based green cooperative transmission schemes [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017. (in Chinese)

作者简介



洪鑫龙 男, 1993 年生, 浙江台州人。杭州电子科技大学硕士研究生。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等。

E-mail: 18767156809@163.com



许晓荣 男, 1982 年生, 浙江杭州人。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 网络中继选择、资源调度与物理层安全; 基于能量有效性的认知无线网络物理层安全、资源分配与优化等。

E-mail: xuxr@hdu.edu.cn



石振波 女, 1995 年生, 山西忻州人。杭州电子科技大学硕士研究生。主要研究方向为无线携能网络中能量分配与资源调度技术等。

E-mail: s852584212@163.com