

## 无线能量收集协作系统的节能中继选择方法

江泽远, 肖 琨

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 在无线能量收集协作通信系统中, 针对中继处可能出现的能量瓶颈, 提出优化源节点和中继的传输功率的节能中继选择方法。利用源节点与中继之间发射功率的比例关系计算源节点的发射功率, 选择信道容量最大的中继链路进行数据转发, 并考虑源节点与中继的发射功率约束。在此基础上, 推导系统的平均信道容量和中断性能。仿真结果表明, 该方法可显著提高系统能量效率, 节约源节点的能量消耗。

**关键词:** 协作系统; 能量收集; 中继选择; 能量效率; 中断性能; 信道容量

**中文引用格式:** 江泽远, 肖琨. 无线能量收集协作系统的节能中继选择方法[J]. 计算机工程, 2019, 45(9): 82-86, 94.

**英文引用格式:** JIANG Zeyuan, XIAO Kun. Energy-saving relay selection method in wireless energy harvesting cooperative system[J]. Computer Engineering, 2019, 45(9): 82-86, 94.

## Energy-saving Relay Selection Method in Wireless Energy Harvesting Cooperative System

JIANG Zeyuan, XIAO Kun

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

**[Abstract]** In the wireless Energy Harvesting (EH) cooperative communication system, the energy bottleneck may occur at the relay. For this problem, an energy-saving relay selection method for optimizing transmission power between source node and relay is proposed. Use the proportion of transmission power between the source node and the relay to calculate the transmission power of the source node, select the relay link with the maximum channel capacity for data forwarding, and consider the transmission power constraints of the source node and the relay. On this basis, the average channel capacity and outage performance of the system are deduced. Simulation results show that the proposed method can significantly improve the energy efficiency of the system, and simultaneously save energy consumption of the source.

**[Key words]** cooperative system; Energy Harvesting (EH); relay selection; energy efficiency; outage performance; channel capacity

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0052102

### 0 概述

协作通信因其在降低无线信道衰落和扩展业务方面的优势得到国内外的广泛关注<sup>[1]</sup>, 协作通信协议主要包括译码-转发 (Decode-Forward, DF)<sup>[2-3]</sup> 协议和放大-转发 (Amplify-Forward, AF)<sup>[4-5]</sup> 协议 2 种。在这 2 种协议中, 中继负责协助源节点将信息发送到目的节点。从这个意义上来讲, 中继的选择在协作性能中起关键的作用。在现有的中继选择方法中, 较典型的有: 机会中继选择 (Opportunity Relay Selection, ORS)<sup>[6]</sup> 和部分中继选择 (Partial Relay Selection, PRS)<sup>[7]</sup> 2 种。为获得更好的性能, 需同时考虑功率分配和中继选择 2 个方面。文献[8]提出

在传输功率约束条件下的最优功率分配方法, 以保证 DF 协议在最优水平下运行。通过光参量放大方法 (Optical Parametric Amplification, OPA) 获得中继系统的最大信道容量或信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR), 其中所有的源节点、中继节点和目的节点都使用传统的电源。

在无线能量收集 (Energy Harvesting, EH) 系统中, 无线设备收集各种形式的能量, 如热能、光能、射频波和风能等为电池充电<sup>[9-10]</sup>。针对无线 EH 协作系统, 文献[11-12]提出基于时间切换和功率分割的中继选择方法。在文献[13-14]中, 被选中继按照功率比例将接收到的信号分割成信息和能量 2 个部分, 并将收集到的能量传输到电池中暂时储存。文献[15]受两

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61362015, 61861006); 广西省研究生教育创新项目 (YCSW2018095)。

**作者简介:** 江泽远 (1990—), 男, 硕士研究生, 主研方向为绿色通信、中继选择; 肖 琨 (通信作者), 教授、博士。

**收稿日期:** 2018-07-13    **修回日期:** 2018-09-14    **E-mail:** xiaokun@gxnu.edu.cn

链路容量最大中继选择策略的启发,选择最优源节点到中继节点的链路来接收信息,并将其存储在缓冲区域,利用被选中继转发信息。文献[16]提出一种电池感知中继的选择方案。将累积能量超过阈值的中继节点构成一个子集,并从中选择具有最大端到端 SNR 的“最优”中继节点进行信息转发。文献[17]构建了具有多个随机分布的中继模型。在传输开始前,所有的中继节点都充满电,形成一个子集。中继节点通过解码源节点信号创建一个虚拟的多天线阵列,并将源节点信号连贯地传输到目的节点。综上所述,在无线 EH 系统的中继选择中,关于被选中继节点与源节点功率分配的研究较少。

本文构建了一个协作模型,其源节点通过电网供电或 EH、电网混合能源供电,所有中继均为可移动的 EH 节点。在这种情况下,当所选中继没有足够的能量将源节点的所有数据转发到目的节点时,OPA 方法需要更多的缓冲区来存储源节点的部分信息。为此,本文提出一种基于新功率分配模型的中继选择方法,以避免在中继上增加缓冲。

## 1 系统模型

本文系统模型如图 1 所示,其由源节点  $S$ 、目的节点  $D$  和 EH 中继节点  $R_i$  组成,  $i=1,2,\dots,N$ 。源节点由电力供电或混合能源供电,中继由 EH 提供的能源供电,目的节点由电池供电。假设传输信道为平坦的瑞利衰落信道,所有通信链路相互独立,源节点到各中继节点链路的信道系数为  $h_{si}$ ,各中继节点到目的节点链路的信道系数为  $h_{id}$ ,源节点到目的节点链路的信道系数为  $h_{sd}$ 。当源节点和中继节点总的发射功率受限和不受限时,分别采用中继选择方法 P-ESRS 和 ESRS,在选择中继数据转发后,其协作过程均由 2 个时隙组成。在第 1 个时隙,源节点发送数据,中继节点和目的节点接收数据。在第 2 个时隙,通过中继选择方法选出的中继节点转发数据,目的节点接收数据,当源节点与目的节点之间存在有效的直接链路时,目的节点还需对接收数据进行合并处理。为便于表达,本文忽略从源节点到目的节点的直接链路。

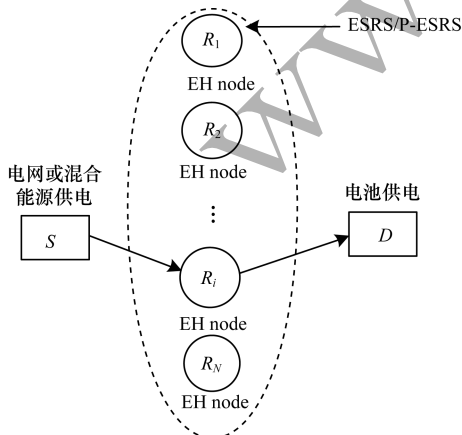


图 1 本文系统模型

假设 EH 的中继节点  $R_i$  在没有发送数据时一直在收集能量,将时间离散化,第  $j$  个时间间隔内收集的能量为  $E_j$ ,在时间  $T$  内所有累加的能量总和为  $E_{T,i}$ ,则  $E_{T,i} = \sum E_j$  [18]。由于  $E_j$  是独立同分布的随机变量,根据中心极限定理,  $E_{T,i}$  服从正态分布。又因为能量不可能为负,所以  $E_{T,i}$  服从 0 到无穷大的截断高斯分布,其概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 如下:

$$f(E_{T,i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{E_i}} \psi(u_i, \sigma_{E_i}) e^{-\left(\frac{E_{T,i}-u_i}{2\sigma_{E_i}^2}\right)^2} \quad (1)$$

其中,  $\psi(u_i, \sigma_{E_i}) = \Phi\left(\frac{\infty - u_i}{\sigma_{E_i}}\right) - \Phi\left(\frac{0 - u_i}{\sigma_{E_i}}\right)$ ,  $E_{T,i}$  和  $\sigma_{E_i}$  分别是可用能量的均值和标准方差,  $\Phi(x)$  为标准正态分布的累积分布函数。

## 2 功率不受限时的中继选择方法

### 2.1 传统方法描述

在各节点具有信道状态信息的情况下,假设传输信道为平坦的瑞利衰落信道,所有通信链路相互独立,源节点到中继  $R_i$  链路的信道系数为  $h_{si}$ ,中继  $R_i$  到目的节点链路的信道系数为  $h_{id}$ ,源节点到目的节点链路的信道系数为  $h_{sd}$ ,源节点的发射功率为  $P_{si}$ ,中继节点的发射功率为  $P_{id}$ ,源节点和中继节点的总功率限制为  $P_{total}$ 。当不存在分集时,DF 中继网络的  $S \rightarrow R$  链路和  $R \rightarrow D$  链路中容量较小的链路决定系统的容量大小。因此,其最优功率分配问题可转化为一个最大最小值问题,具体如下:

$$C = \max_{P_{si}, P_{id}} \min \left\{ \frac{1}{2} \log(1 + |h_{si}|^2 P_{si}), \frac{1}{2} \log(1 + |h_{id}|^2 P_{id}) \right\}$$

当系统具有最大信道容量时,须满足如下条件:

$$\frac{1}{2} \log(1 + |h_{si}|^2 P_{si}) = \frac{1}{2} \log(1 + |h_{id}|^2 P_{id}) \quad (2)$$

由  $P_{si} + P_{id} = P_{total}$ ,结合式(2)可得源节点和中继之间的发射功率比例关系,具体如下:

$$\frac{P_{si}}{P_{id}} = \frac{|h_{id}|^2}{|h_{si}|^2} \quad (3)$$

### 2.2 本文方法描述

由于源节点和被选中继节点之间的信道容量等于被选中继和目的节点的信道容量,所有接收信息都来自源节点,因此,在第 2 个时隙可通过被选中继将数据发送到目的节点。在这种情况下,中继不会发生数据拥塞,其缓冲区可最小化。在本文模型中,由于中继收集的能量是随机变化的,因此能量瓶颈在中继节点中,而源节点总是可以从电网中获得足够的能量。当能量不足,中继无法为数据传输提供足够的能量时,OPA 方法 [8] 的中继功耗过高、数据拥塞,其不再是中继方法的较优选择。

为节约源节点的能量,同时达到最大的中继信道容量,本文提出基于中继节点的发射功率来确定源节点发射功率的 ESRS 方法。假设在第 2 个时隙,中继  $R_i$  的可用能量用于数据转发,则第 2 个时隙中的传输功率为  $P_{id} = E_{T,i}/T_s$ 。根据式(3),可得到源节点的发射功率,如下:

$$P_{si} = P_{id} \cdot \frac{|h_{id}|^2}{|h_{si}|^2} = E_{T,i} \cdot \frac{|h_{id}|^2}{T_s |h_{si}|^2} \quad (4)$$

在根据容量最大化准则选择中继时,可只考虑源节点与中继节点之间的链路,或者只考虑中继节点与目的节点之间的链路。在 ESRS 方法中,根据前段链路选择中继节点,如下:

$$k = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{1}{2} \ln(1 + |h_{si}|^2 P_{si}) \right\} = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ E_{T,i} \cdot \frac{|h_{id}|^2}{T_s} \right\} \quad (5)$$

也可根据后段链路选择中继节点,如下:

$$k = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{1}{2} \ln(1 + |h_{id}|^2 P_{id}) \right\} = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ E_{T,i} \cdot \frac{|h_{id}|^2}{T_s} \right\} \quad (6)$$

式(5)和式(6)都是根据信道容量最大化准则选择同一中继节点进行数据传输。

基于 ESRS 的协作过程具体步骤如下:

**步骤 1** 根据式(5)或式(6)选出中继  $k$ 。

**步骤 2** 在第 1 个时隙,源节点以  $P_{si} = E_{T,i} \cdot \frac{|h_{id}|^2}{T_s |h_{si}|^2}$  的功率传输数据,然后中继  $k$  接收源节点发送的数据。

**步骤 3** 在第 2 个时隙,中继  $k$  以  $P_{id} = \frac{E_{T,i}}{T_s}$  的功率转发源节点的数据到目的节点,然后目的节点接收中继节点发送的数据。

### 2.3 信道容量分析

对于平坦的瑞利衰落信道,  $x = |h_{id}|^2$  的 PDF<sup>[19]</sup> 如下:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x}{\sigma^2}} \quad (7)$$

得出信道增益  $g_{id} = |h_{id}|^2$  的 PDF 为:

$$f(g_{id}) = \frac{1}{2\sigma_{R_i}^2} e^{-\frac{g_{id}}{2\sigma_{R_i}^2}} \quad (8)$$

令  $v_i = E_{T,i} |h_{id}|^2$ , 结合式(1)和式(5),可求得  $v_i$  的 PDF 为:

$$f(v_i) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{E_i}\sigma_{R_i}^2\psi(u_i, \sigma_{E_i})} \times \int_0^\infty \frac{e^{-\left(\frac{(E_{T,i}-u)^2\sigma_{R_i}^2 E_{T,i} + \sigma_{E_i}^2 v_i}{2\sigma_{R_i}^2\sigma_{E_i}^2 E_{T,i}}\right)}}{E_{T,i}} dE_{T,i} \quad (9)$$

然后,可求得  $\phi_i = v_i/T_s$  的 PDF 为:

$$f(\phi_i) = \frac{T_s}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{E_i}\sigma_{R_i}^2\psi(u_i, \sigma_{E_i})} \times \int_0^\infty \frac{e^{-\left(\frac{(E_{T,i}-u)^2\sigma_{R_i}^2 E_{T,i} + \sigma_{E_i}^2 \phi_i T_s}{2\sigma_{R_i}^2\sigma_{E_i}^2 E_{T,i}}\right)}}{E_{T,i}} dE_{T,i} \quad (10)$$

$\phi_i$  的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 为:

$$F_{\phi_i}(z) = \frac{T_s}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{E_i}\sigma_{R_i}^2\psi(u_i, \sigma_{E_i})} \times \int_0^z \int_0^\infty \frac{1}{E_{T,i}} e^{-\left(\frac{(E_{T,i}-u)^2\sigma_{R_i}^2 E_{T,i} + \sigma_{E_i}^2 \phi_i T_s}{2\sigma_{R_i}^2\sigma_{E_i}^2 E_{T,i}}\right)} dE_{T,i} d\phi_i \quad (11)$$

定义  $F_{\max(\phi_j)}(z)$  为  $\max_{j=1,2,\dots,N, j \neq i}(\phi_j)$  的 CDF, 可得到

$F_{\max(\phi_j)}(z) = \prod_N F_{\phi_j}(z)$ 。因此, 中继  $R_i$  的中断概率如下:

$$P_i = P(\phi_i > \max_{j=1,2,\dots,N, j \neq i}(\phi_j)) = \int_0^\infty f_{\phi_i}(s) F_{\max(\phi_j)}(s) ds = \int_0^\infty \frac{T_s}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{E_i}\sigma_{R_i}^2\psi(u_i, \sigma_{E_i})} \times \int_0^\infty \frac{1}{E_{T,i}} e^{-\left(\frac{(E_{T,i}-u)^2\sigma_{R_i}^2 E_{T,i} + \sigma_{E_i}^2 s T_s}{2\sigma_{R_i}^2\sigma_{E_i}^2 E_{T,i}}\right)} dE_{T,i} \times \left[ \prod_{j=1,2,\dots,N, j \neq i} \int_0^\infty \frac{e^{-\frac{(E_{T,i}-u_j)^2}{2\sigma_{R_j}^2}} (1 - e^{-\frac{s T_s}{2\sigma_{R_j}^2 E_{T,i}}}) dE_{T,i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{E_j}\psi(u_j, \sigma_{E_j})} \right] ds \quad (12)$$

定义  $C_i$  为从源节点经过中继  $R_i$  转发到目的节点的链路的信道容量, 结合式(12), 系统的平均信道容量如下:

$$C = \sum_{i=1}^N P_i C_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N P_i \ln(1 + P_{id} |h_{id}|^2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N P_i \ln\left(1 + \frac{E_{T,i}}{T_s} |h_{id}|^2\right) \quad (13)$$

其中,  $\frac{1}{2}$  表示 2 跳链路的 2 段传输。

### 2.4 中断概率分析

根据本文的 ESRS 方法, 只有当被选中中继  $k = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}}(\phi_i)$  从源节点到目的节点的中继链路处于中断状态时, 系统才会发生中断事件。设  $\Gamma$  为中断门限, 则系统中断概率如下:

$$P_{\text{out}} = P(\underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}}\{\phi_i\} < \Gamma) = \prod_{i=1}^N P_i(\phi_i < \Gamma) = \prod_{i=1}^N \frac{T_s}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{E_i}\sigma_{R_i}^2\psi(u_i, \sigma_{E_i})} \times \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\left(\frac{(E_{T,i}-u)^2\sigma_{R_i}^2 E_{T,i} + \sigma_{E_i}^2 \phi_i T_s}{2\sigma_{R_i}^2\sigma_{E_i}^2 E_{T,i}}\right)}}{E_{T,i}} dE_{T,i} d\phi_i \quad (14)$$

### 3 功率受限 ESRS 方法

考虑源节点和中继节点的发射功率约束,即  $P_{si} + P_{id} \leq P_{\text{total}}$  时,分2种情况。第1种情况,中继节点收集足够的能量,即  $E_{T,i}/T_s \geq P_{id,\text{opt}}$ ,其中,  $P_{id,\text{opt}}$  为中继  $R_i$  的最优发射功率。第2种情况,中继节点的能量不足,即  $E_{T,i}/T_s < P_{id,\text{opt}}$ 。

对于第1种情况,OPA方法可同时用于源节点和中继节点。因此,中继信道容量将被最大化。根据式(2)和  $P_{si,\text{opt}} + P_{id,\text{opt}} = P_{\text{total}}$ ,得到如下公式:

$$P_{si,\text{opt}} = \frac{P_{id,\text{opt}} |h_{id}|^2}{|h_{si}|^2} = \frac{P_{\text{total}}}{1 + \frac{|h_{si}|^2}{|h_{id}|^2}} \quad (15)$$

$$P_{id,\text{opt}} = \frac{P_{\text{total}}}{1 + \frac{|h_{si}|^2}{|h_{id}|^2}} \quad (16)$$

其中,  $P_{si,\text{opt}}$  是源节点的最优发射功率。

第2种情况与第2.2节中的推导过程相似,可得  $P_{id} = E_{T,i}/T_s$  和  $P_{si} = |h_{id}|^2 P_{id} / |h_{si}|^2$ ,在这种情况下,P-ESRS方法和ESRS方法相同。源节点与中继节点之间的信道容量等于中继节点与目的节点之间的信道容量,因此,只考虑源节点与中继节点之间的链路或中继节点与目的节点之间的链路。然后根据信道容量最大化准则选出中继节点,在P-ESRS方法中,可根据前段链路选出中继节点,具体如下:

$$k = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{1}{2} \ln(1 + |h_{si}|^2 P'_{si}) \right\} = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ |h_{si}|^2 P'_{si} \right\} \quad (17)$$

也可根据后段链路选出中继节点,具体如下:

$$k = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{1}{2} \ln(1 + |h_{id}|^2 P'_{id}) \right\} = \underset{i=1,2,\dots,N}{\operatorname{argmax}} \left\{ |h_{id}|^2 P'_{id} \right\} \quad (18)$$

在数据转发过程中,式(17)和式(18)都选出同一中继节点进行传输。对第1种情况中的  $P'_{si} = P_{si,\text{opt}}$  与第2种情况中的  $P'_{si} = P_{si}$ ,以及第1种情况中的  $P'_{id} = P_{id,\text{opt}}$  与第2种情况中的  $P'_{id} = P_{id}$ ,基于P-ESRS的协作过程描述如下:

1) 根据式(17)或式(18)选出中继节点。

2) 在第1个时隙中,如果  $E_{T,i}/T_s < P_{id,\text{opt}}$ ,源节点以  $P_{si} = \frac{|h_{id}|^2 E_{T,i}}{|h_{si}|^2 T_s}$  或者  $P_{si,\text{opt}} = \frac{|h_{id}|^2 P_{\text{total}}}{|h_{id}|^2 + |h_{si}|^2}$  的功率发送数据,然后,中继节点  $k$  接收数据。

3) 在第2个时隙中,如果  $E_{T,i}/T_s < P_{id,\text{opt}}$ ,中继节点以  $P_{id} = E_{T,i}/T_s$  或者  $P_{id,\text{opt}} = \frac{|h_{si}|^2 P_{\text{total}}}{|h_{id}|^2 + |h_{si}|^2}$  的功率将源节点的数据转发到目的节点,然后,目的节点接收数据。

### 4 数据仿真与分析

运用蒙特卡洛仿真,从系统平均信道容量、中断概率和能量效率的角度,对本文ESRS方法、P-ESRS

方法与平坦的瑞利衰落信道下的OPA方法<sup>[8]</sup>进行比较。假设仿真无线信道服从独立同分布的瑞利衰落信道,通过产生的信噪比随机数模拟各链路的即时信噪比<sup>[20-21]</sup>。每个时隙的时间都设置为0.5 s。源节点和中继节点总的传输功率限制都设为  $P_{\text{total}} = 5 \text{ W}$ 。信噪比中断门限都设为  $\Gamma = 1 \text{ dB}$  并且每个中继所收集的能量方差为0.01。每个中继收集的平均能量值在仿真中用  $u$  表示。

图2给出3种方法的系统中断概率随平均信道增益的变化曲线,源节点和中继节点总的传输功率限制设为1 W。由图2可知,  $u=0.2$  时,ESRE方法的仿真结果与实际结果吻合较好,P-ESRS方法的中断性能与OPA方法类似,且平均信道增益越大,系统中断概率越小。

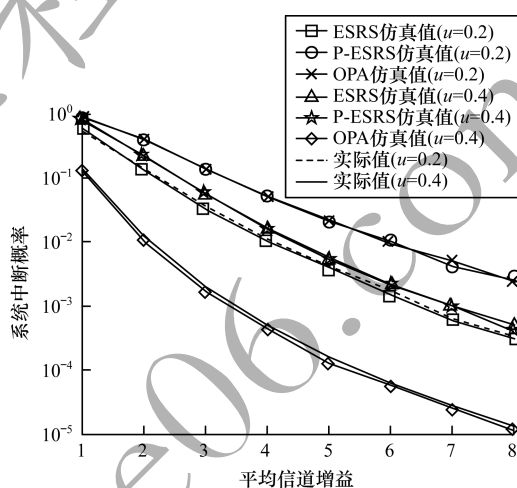


图2 3种方法的系统中断概率随平均信道增益的变化

图3给出3种方法的系统平均信道容量随平均信道增益的变化曲线,其源节点和中继节点的传输功率限制设置为2 W。由图3可知,ESRE方法的仿真结果与实际结果吻合较好,且平均信道增益越大,系统平均信道容量越大。在3种方法中,ESRS方法的平均信道容量最大,P-ESRS方法的信道容量与OPA方法几乎相同。

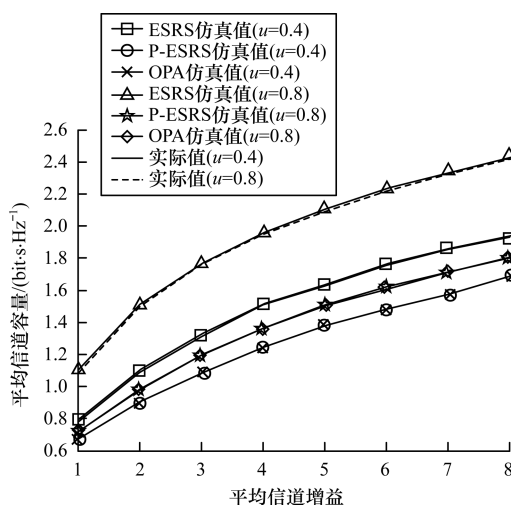


图3 3种方法的平均信道容量随平均信道增益的变化

图 4 为源节点和被选中继节点的总功率为 5 W 时,3 种方法的系统能量效率随平均信道增益的变化曲线。由图 4 可知,平均信道增益越大,系统的能量效率就越大,且 P-ESRS 方法的能量效率大于 ESRS 方法,OPA 方法的能量效率最小。图 5 给出源节点处 P-ESRS 方法所节约的能量随平均信道增益的变化。中继可用能量的平均值分别为 0.1 J、0.2 J 和 0.3 J,源节点和中继节点的发射功率限制设为 5 W。

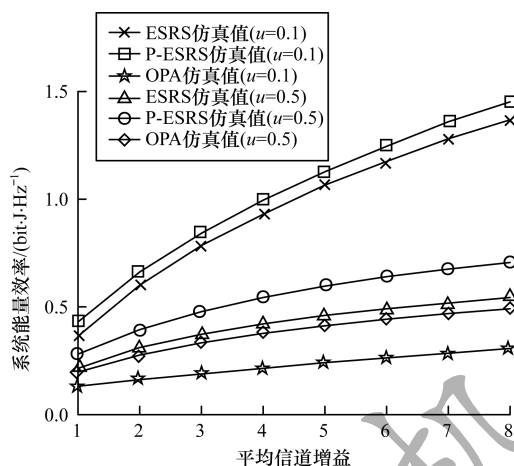


图 4 系统的能量效率随平均信道增益的变化

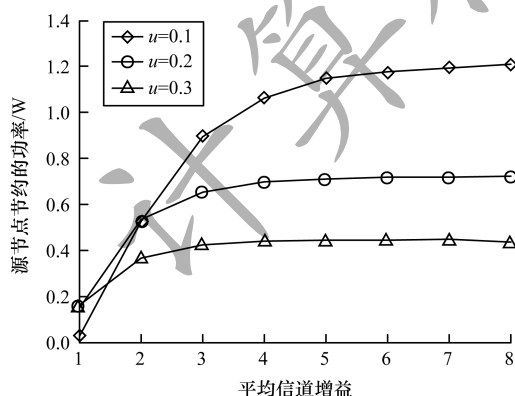


图 5 源节点所节约的能量随平均信道增益的变化

由图 5 可知,当中继节点的能量一定时,平均信道增益越大,源节点节约的能量就越多。然而,当中继节点能量不断增大时,曲线趋于平缓。可以得出,如果中继节点获取的能量越少,在源节点的节能效果越明显,说明本文 P-ESRS 方法可以有效节约能量,特别是在中继能量不足的情况下,其能量节约的效果显著。

## 5 结束语

本文提出节能型中继选择方法,基于源节点与中继之间发射功率的比例关系以及发射功率约束,选择信道容量最大的中继链路进行数据转发。仿真结果表明,该方法可显著提高系统能量效率,节约源节点的能量消耗。下一步将考虑源节点和中继节点的能量收集情况,改善中继选择方法的性能。

## 参考文献

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [2] JU M C, KIM I M, KIM D I. Joint relay selection and relay ordering for DF-based cooperative relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(4): 908-915.
- [3] GU Yifan, CHEN He, LI Yonghui, et al. Distributed multi-relay selection in accumulate then forward energy harvesting relay networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(1): 74-86.
- [4] SOLIMAN S S, BEAULIEU N C. Exact analysis of dual-hop AF maximum end-to-end SNR relay selection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8): 2135-2145.
- [5] ZHANG Yangyang, GE Jianhua, MEN Jinjin, et al. Joint relay selection and power allocation in energy harvesting AF relay systems with ICSI[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2016, 10(15): 1656-1661.
- [6] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.
- [7] KRIKIDIS I, THOMPSON J, MCLAUGHLIN S, et al. Amplify and forward with partial relay selection[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(4): 235-237.
- [8] ZHANG Qi, ZHANG Jingmei, SHAO Chunju, et al. Power allocation for regenerative relay channel with Rayleigh fading[C]//Proceedings of the 59th Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 1167-1171.
- [9] PAING T, SHIN J, ZANE R, et al. Resistor emulation approach to low power RF energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1494-1501.
- [10] LIU Yuanwei, MOUSAVIFAR S A, DENG Yansha, et al. Wireless energy harvesting in a cognitive relay network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2498-2508.
- [11] NASIR A A, ZHOU Xiangyun, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3622-3636.
- [12] ZHONG Caijun, SURAWEEA H A, ZHENG Gan, et al. Wireless information and power transfer with full duplex relaying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3447-3461.
- [13] WANG Dexin, ZHANG Rongqing, CHENG Xiang, et al. Relay selection in full-duplex energy harvesting two way relay networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 1(2): 182-191.
- [14] WANG Fei, GUO Songtao, YANG Yuanyuan, et al. Relay selection and power allocation for cooperative communication networks with energy harvesting[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 735-746.
- [15] LIU Kuanghao, KUNG Telin. Performance improvement for RF energy-harvesting relays via relay selection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 6(9): 8482-8494.

(下转第 94 页)

(上接第 86 页)

- [16] LIU Kuanghao. Performance analysis of relay election for cooperative relays based on wireless power transfer with finite energy storage [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65 (7) : 5110-5121.
- [17] KRIKIDIS I. Relay selection in wireless powered cooperative networks with energy storage [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33 (12) : 2596-2610.
- [18] YANG Jing, ULUKUS S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60 (1) : 220-230.
- [19] ZHANG Yangyang, GE Jianhua. Performance analysis for non-orthogonal multiple access in energy harvesting relaying networks [J]. IET Communications, 2017, 11 (11) : 1768-1774.
- [20] AIROD F E, CHAFNAJI H, YANIKOMEROGLU H. Performance analysis of low latency multiple full-duplex selective decode and forward relays [EB/OL]. [2018-07-01]. <https://arxiv.org/pdf/1802.04076.pdf>.
- [21] 何杰, 肖琨, 潘和月. 一种面向电池供电中继节点的中继选择方法 [J]. 计算机工程, 2017, 43 (10) : 77-81, 90.

编辑 樊丽娜