

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.11.013

引用格式:李玮,丁长文,杨霖.能量收集双向中继网络的中继选择和功率分配[J].电讯技术,2016,56(11):1255-1259. [LI Wei, DING Changwen, YANG Lin. Relay selection and power allocation for energy harvesting two-way relay networks[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(11): 1255-1259. ]

能量收集双向中继网络的中继选择和功率分配\*

李 玮\*\*1,丁长文<sup>2</sup>,杨 霖<sup>2</sup>

(1. 四川邮电职业技术学院 实验实训中心,成都 610067;  
2. 电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,成都 611731)

**摘 要:**结合能量收集技术,研究了放大转发双向中继网络的系统性能。基于双向中继系统中的两个端到端信噪比平衡准则,推导出了单中继选择情况下信源最优的功率分配方案和中继最优的能量收集比例。仿真结果证明所提方法能够实现最好的系统性能。通过比较发现,能量收集双向中继网络比传统双向中继网络能够实现更高的传输速率。

**关键词:**双向中继网络;能量收集;功率分配;中继选择

**中图分类号:**TN925      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2016)11-1255-05

Relay Selection and Power Allocation for Energy Harvesting Two-way Relay Networks

LI Wei<sup>1</sup>, DING Changwen<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>

(1. The Experimental Training Center, Sichuan Post and Telecommunication College, Chengdu 610067, China;  
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The performance of amplify-and-forward based two-way relay network is analyzed in combination with energy harvesting technology. According to the end-to-end signal-to-noise ratio (SNR) balancing criterion, the optimal power allocation of two sources and the optimal energy harvesting proportion of the single selected relay are derived. Simulation results show that the proposed method can achieve the best performance. Comparison shows that energy harvesting two-way relay communication network has a higher achievable transmission rate than conventional two-way relay network.

**Key words:** two-way relay network; energy harvesting; power allocation; relay selection

1 引 言

中继协作通信技术能够有效增加小区的覆盖面积和降低阴影效应,因而受到了广泛的关注。然而,单向中继采用半双工的工作模式降低了系统的频谱效率,双向中继能够完美地解决这一问题,成为近年来无线通信的研究热点<sup>[1-3]</sup>。

在所有的中继协议中,放大转发 (Amplify-and-

Forward, AF) 相对于解码转发 (Decode-and-Forward, DF), 和压缩转发 (Compress-and-Forward, CF) 等是最简单的,也是最常用的。在放大转发中继协议中,中继只需对接收到的信号进行放大然后转发给接收端<sup>[4]</sup>。

虽然中继可以通过更换电池或充电补充能量等方式延长使用时间,但是费用昂贵且极不方便。为

\* 收稿日期:2016-03-11;修回日期:2016-07-15      Received date:2016-03-11;Revised date:2016-07-15

\*\* 通信作者:27939950@qq.com      Corresponding author:27939950@qq.com

• 1255 •

了解决这一问题,研究人员提出了能量收集 (Energy Harvesting,EH) 技术,该技术能够极大地延长中继的使用期,成为目前无线通信的研究热点<sup>[5-8]</sup>。该技术利用了射频信号可以同时传输信息和能量的特性,中继可以通过收集周围空间的射频信号的能量进行信号处理<sup>[5-6]</sup>。文献[7]研究了不同中继协议对于能量收集双向中继网络总传输速率的影响,并给出了最优的中继协议选择方案。文献[8]为能量收集双向中继网络设计了一种功率分割中继协议 (Power Splitting-Based Relaying,PSR),中继将接收到的信号的一部分转换成能量,并用这部分能量将余下的信号转发给接收端。

功率分配 (Power Allocation, PA) 和中继选择 (Relay Selection,RS) 是提升双向中继网络性能的两种主要方式<sup>[9-11]</sup>。在双向中继网络中,合理地选取性能最优的中继能提高系统的性能。文献[9]提出了一种基于误码率的最优中继选取方式,并在此基础上提出了一种复杂度较低的次优最大最小中继选择方式;文献[10]提出了一种基于信噪比 (Signal-to-Noise Ratio,SNR) 平衡准则的最优联合功率分配和中继选择算法;文献[11]研究了全双工的双向中继网络的中继选择方式;文献[12]证明了端到端均衡准则可以得到双向中继系统的最优功率分配算法。

本文基于端到端信噪比平衡准则<sup>[10,12]</sup>,提出了结合能量收集技术的双向中继网络的联合功率分配和中继选择算法,通过推导获得了两个信源最优的功率分配和中继节点最优的能量收集比例 (Energy Harvesting Proportion,EHP),并选取性能最优的中继进行信号的转发。与传统的双向中继网络相比较,证明了能量收集双向中继网络的性能优越性。

2 系统模型

双向多中继网络模型如图 1 所示,系统由两个信源节点  $S_1$ 、 $S_2$  和  $N$  个能量收集的中继 ( $R_i, i=1,2, \cdots, N$ ) 构成。在系统中,所有节点都只具有一根天线。假定信源之间没有直达的通信链路,只能通过中继的协助进行信息交流。双向中继的信息交流在两个时隙内完成:第一个时隙,两个信源同时向所有中继发送信息,中继接收到一个叠加信号;第二个时隙,性能最优的中继同时向两个信源转发接收到的叠加信号。

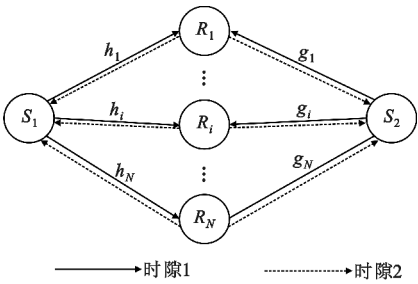


图 1 双向中继网络模型  
Fig. 1 The two-way relay network model

图 1 中,  $h_i$ 、 $g_i$  分别表示信源  $S_1$ 、 $S_2$  到中继的信道参数,我们考虑信道是准静态衰落的,其分布满足  $h_i \sim CN(0, \sigma_{h_i}^2)$  和  $g_i \sim CN(0, \sigma_{g_i}^2)$ 。在通信节点  $S_1$ 、 $S_2$  和  $R_i$  处的高斯白噪声分布为  $n_1 \sim CN(0, \sigma_1^2)$ 、 $n_2 \sim CN(0, \sigma_2^2)$  和  $n \sim CN(0, \sigma^2)$ 。

第一个时隙,信源  $S_k(k=1,2)$  向中继发送信号为  $s_k$ , 中继  $R_i$  接收到的叠加信号为

$$r_i = \sqrt{p_{s,1}} h_i s_1 + \sqrt{p_{s,2}} g_i s_2 + n \tag{1}$$

式中:  $p_{s,1}$ 、 $p_{s,2}$  分别表示两个信源的发送功率。

基于文献[8]中的功率分割中继协议,接收信号以  $\rho_i:1-\rho_i$  的比例分割成两个部分,其中一部分被能量收集接收器接收,转换成能量,另一部分被信号处理接收器接收。由于系统采用 AF 中继协议,不需要再对信号进行其他处理,只需要用转换得到的能量将信号转发出去即可,如图 2 所示。

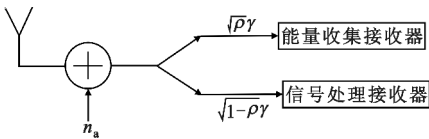


图 2 功率分割中继协议  
Fig. 2 The power splitting-based relaying protocol

能量收集接收器接收的信号为

$$\sqrt{\rho_i} r_i = \sqrt{\rho_i p_{s,1}} h_i s_1 + \sqrt{\rho_i p_{s,2}} g_i s_2 + \sqrt{\rho_i} n, \tag{2}$$

所以中继用于转发信号的功率为

$$p_{r_i} = \eta \rho_i (|h_i|^2 p_{s,1} + |g_i|^2 p_{s,2} + \sigma^2) \tag{3}$$

式中:  $0 \leq \eta \leq 1$  为能量收集接收器的能量转换效率。

余下信号用于中继转发给接收端,可以表示为

$$x_i = \sqrt{(1-\rho_i)} r_i + n_a = \sqrt{p_{s,1}(1-\rho_i)} h_i s_1 + \sqrt{p_{s,2}(1-\rho_i)} g_i s_2 + \sqrt{(1-\rho_i)} n + n_a \tag{4}$$

式中:  $n_a$  是信号从通带转换到基带叠加的高斯白噪

声,其分布是  $n_a \sim CN(0, \sigma_a^2)$ 。

因此,中继的放大参数可以表示为

$$\sqrt{\alpha_i} = \sqrt{\frac{P_{r_i}}{(1-\rho_i)(|h_i|^2 p_{s,1} + |g_i|^2 p_{s,2} + \sigma^2) + \sigma_a^2}} \approx \sqrt{\frac{\eta \rho_i}{(1-\rho_i)}} \quad (5)$$

第二个时隙,信源接收到的信号为

$$\begin{aligned} y_1^* &= \sqrt{\alpha_i} h_i x_i + n_1 = \\ &\underbrace{\sqrt{\alpha_i p_{s,1} (1-\rho_i)} h_i^2 s_1}_{\text{self-interference}} + \underbrace{\sqrt{\alpha_i p_{s,2} (1-\rho_i)} h_i g_i s_2}_{\text{self-interference}} + \\ &\sqrt{\alpha_i (1-\rho_i)} h_i n + \sqrt{\alpha_i} h_i n_a + n_1, \\ y_2^* &= \sqrt{\alpha_i} g_i x_i + n_2 = \\ &\underbrace{\sqrt{\alpha_i p_{s,2} (1-\rho_i)} g_i^2 s_2}_{\text{self-interference}} + \underbrace{\sqrt{\alpha_i p_{s,1} (1-\rho_i)} g_i h_i s_1}_{\text{self-interference}} + \\ &\sqrt{\alpha_i (1-\rho_i)} g_i n + \sqrt{\alpha_i} g_i n_a + n_2. \end{aligned} \quad (6)$$

在公式(6)中,  $y_i^*$  ( $i=1,2$ ) 的第一项表示双向中继网络中的自干扰信号,第二项表示接收端希望接收到的信号,后面几项为各个信号处理阶段叠加的高斯白噪声。

假定系统中各个节点具有完全的信道信息,则信源可以完美地消除自干扰,即公式(6)中的第一项,则接收信号可以表示为

$$\begin{cases} y_1 = \sqrt{\alpha_i p_{s,2} (1-\rho_i)} h_i g_i s_2 + \sqrt{\alpha_i (1-\rho_i)} h_i n + \sqrt{\alpha_i} h_i n_a + n_1 \\ y_2 = \sqrt{\alpha_i p_{s,1} (1-\rho_i)} g_i h_i s_1 + \sqrt{\alpha_i (1-\rho_i)} g_i n + \sqrt{\alpha_i} g_i n_a + n_2 \end{cases} \quad (7)$$

为了简化计算,我们可以假定  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_a^2 = \sigma^2$ 。两个端到端信噪比表示为

$$\begin{cases} SNR_{1,i} = \frac{\eta \rho_i (1-\rho_i) p_{s,2} |h_i|^2 |g_i|^2}{\eta \rho_i (1-\rho_i) |h_i|^2 \sigma^2 + \eta \rho_i |h_i|^2 \sigma^2 + (1-\rho_i) \sigma^2} \\ SNR_{2,i} = \frac{\eta \rho_i (1-\rho_i) p_{s,1} |h_i|^2 |g_i|^2}{\eta \rho_i (1-\rho_i) |g_i|^2 \sigma^2 + \eta \rho_i |g_i|^2 \sigma^2 + (1-\rho_i) \sigma^2} \end{cases} \quad (8)$$

### 3 联合功率分配和中继选择算法

传统的中继选择方法运用了最大最小(max-min)算法<sup>[9]</sup>,由于双向中继系统的性能主要受性能比较差的链路的影响,所以算法首先在每一中继的两条链路中选择较小的端到端信噪比,然后建立所有中继的一个集合,在集合中选取最大值,其下标即为选择的中继。问题可以表示为

$$\begin{cases} \max_k \min \{ SNR_{1,i}, SNR_{2,i} \} \\ \text{subject to } p_{s,1} + p_{s,2} \leq P \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P$  为系统总发送功率。

由式(8)~(9)可以将  $p_{s,1}$ 、 $p_{s,2}$  用  $\rho_i$  表示出来,如公式(10)所示:

$$\begin{cases} p_{s,2} = \frac{P(\eta \rho_i (1-\rho_i) |h_i|^2 + \eta \rho_i |h_i|^2 + (1-\rho_i))}{(\eta \rho_i (1-\rho_i) |g_i|^2 + \eta \rho_i (1-\rho_i) |h_i|^2 + \eta \rho_i |g_i|^2 + \eta \rho_i |h_i|^2 + 2(1-\rho_i))} \\ p_{s,1} = \frac{P(\eta \rho_i (1-\rho_i) |g_i|^2 + \eta \rho_i |g_i|^2 + (1-\rho_i))}{(\eta \rho_i (1-\rho_i) |g_i|^2 + \eta \rho_i (1-\rho_i) |h_i|^2 + \eta \rho_i |g_i|^2 + \eta \rho_i |h_i|^2 + 2(1-\rho_i))} \end{cases} \quad (10)$$

文献[10]提出了传统双向中继网络的联合功率分配的中继选择算法。通过功率分配,当  $SNR_{1,i} = SNR_{2,i}$  时,系统具有最优的性能。能量收集双向中继网络的不同之处在于:系统不再提供中继节点的功率分配,而由中继自身通过收集射频信号的能量得到,即系统的限制条件可以表示为

$$\begin{cases} SNR_{1,i} = SNR_{2,i} \\ P = p_{s,1} + p_{s,2} \end{cases} \quad (11)$$

令  $F = SNR_{1,i} + SNR_{2,i}$ ,显然,当  $F$  取得最大值时,系统的性能最好。将式(10)代入方程  $F$  得

$$F = \frac{2\eta |h_i|^2 |g_i|^2}{\eta \rho_i (|g_i|^2 + |h_i|^2) + \eta \frac{1}{(1-\rho_i)} (|g_i|^2 + |h_i|^2) + 2 \frac{1}{\rho_i}} \quad (12)$$

对方程求微分,可以得到

$$(\eta |g_i|^2 + \eta |h_i|^2 - 2) \rho_i^2 + 4 \rho_i - 2 = 0. \quad (13)$$

该方程的极值即为最优的能量收集参数:

$$\rho_i^0 = \frac{4}{4 + \sqrt{16 + 8(\eta |g_i|^2 + \eta |h_i|^2 - 2)}} \quad (14)$$

根据式(10)和式(14),可以得到最优的功率分配  $\{p_{s,1}^0, p_{s,2}^0\}$ 。

### 4 仿真分析

我们考虑一个具有两个信源、中继数目  $N=6$  的双向中继系统。噪声功率设为  $\sigma^2=1$ ,信道参数  $h_i$ 、 $g_i$  是独立同分布的,且其方差为  $\sigma_{h_i}^2, \sigma_{g_i}^2$ 。

图3为考虑了本文提出的能量收集双向中继网络在完美的信道估计下的联合功率分配和中继选择算法和其他3种情况的比较。情况1为本文提出的算法;最优的功率分配,最优中继选择和最优的能量

收集比例(O-PA&O-RS&O-EHP)。情况2:最优功率分配,最优的中继选择和固定的能量收集比例(O-PA&O-RS&F-EHP)。情况3:平均功率分配,最优的中继选择和固定的能量收集比例(E-PA&O-RS&F-EHP)。情况4:平均功率分配,随机的中继选择和固定的能量收集比例(E-PA&R-RS&F-EHP)。其中固定的能量收集比例为 $\rho_0=0.5$ ,能量转换效率 $\eta=0.9$ ,信道方差 $\sigma_{h_i}^2=\sigma_{g_i}^2=10$ 。经过比较发现,情况1能够得到最快的和传输速率,但是对情况2的优势并不大;情况2相比情况3有稍微的性能优势,其原因是能量收集双向中继只在两个信源做功率的分配,考虑信道是独立同分布的,则发送功率差距并不明显,所以最优的功率分配和平均功率分配情况下性能差距不大;情况4性能最差,说明在能量收集双向中继网络中,选择最优中继进行信号的转发对系统性能有巨大的影响。

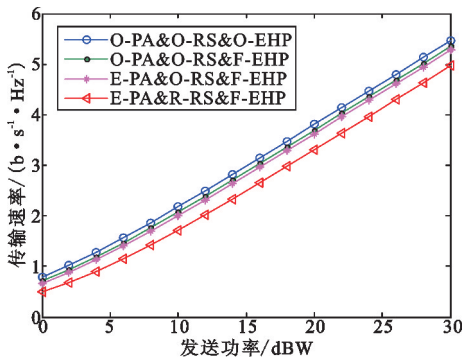


图3 能量收集双向中继网络在不同功率分配和中继选择算法下的性能( $N=6, \rho_0=0.5, \eta=0.9, \sigma_{h_i}^2=\sigma_{g_i}^2=10$ )

Fig. 3 Performance of the energy harvesting two-way relay network versus different power allocation and relay selection methods( $N=6, \rho_0=0.5, \eta=0.9, \sigma_{h_i}^2=\sigma_{g_i}^2=10$ )

图4对文献[10]的传统双向中继网络和能量收集双向中继网络的性能进行比较,信道方差均为 $\sigma_{h_i}^2=\sigma_{g_i}^2=10$ 。两个网络模型分别考虑了最优的功率分配和中继选择(O-PA&O-RS)情况以及等功率分配和最优中继选择(E-PA&O-RS)情况,其中在能量收集双向中继网络中,能量转换效率 $\eta=0.9$ 。比较发现,能量收集网络即使是在信源等功率发送信号时也能够得到比传统双向中继网络更高的和传输速率,说明能量收集双向中继网络不但有比传统的双向中继网络更长的使用周期,不需要对中继更换电池或充电,还有更好的系统性能。

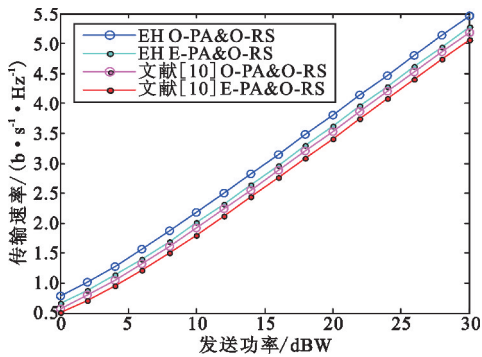


图4 能量收集双向中继网络与传统双向中继网络性能比较( $N=6, \eta=0.9, \sigma_{h_i}^2=\sigma_{g_i}^2=10$ )

Fig. 4 Performance comparison between the energy harvesting two-way relay network and conventional two-way relay network( $N=6, \eta=0.9, \sigma_{h_i}^2=\sigma_{g_i}^2=10$ )

5 结束语

本文研究了能量收集双向中继网络的系统性能。基于端到端信噪比平衡准则,提出了最优联合功率分配和中继选择方法,获得了信源最优的功率分配和中继最优的能量收集比例。仿真结果显示,本文提出的方法能够实现最大的总传输速率。与传统的双向中继网络比较发现,能量收集双向中继网络有更好的系统性能。

本文提出的单中继选择和功率分配方案对于能量收集技术和协作通信的实际应用具有一定指导意义,未来的研究将主要针对能量收集双向中继网络中的多中继选择和功率分配。

参考文献:

[1] 王林,芮国胜,张洋. 双向多中继协同通信系统的性能分析[J]. 电讯技术,2014,54(11):1457-1462.  
WANG Lin, RUI Guosheng, ZHANG Yang. Performance analysis of two-way multi-relay cooperative communication systems[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(11):1457-1462. (in Chinese)  
[2] 王丽元,覃莲,肖海林,等. 双中继协作通信的功率分配改进方案[J]. 电讯技术,2014,54(2):145-150.  
WANG Liyuan, QIN Lian, XIAO Hailin, et al. Power allocation for two relays cooperative communication[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(2):145-150. (in Chinese)  
[3] XIE X Q, PENG M G, ZHAO B, et al. Maximum a posteriori based channel estimation strategy for two-way relaying channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1):450-463.  
[4] YUKSEL M, ERKIP E. Multiple-antenna cooperative wireless systems: a diversity-multiplexing tradeoff per-

- spective[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(10):3371-3373.
- [5] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Information Theory. Cambridge: IEEE, 2008:1612-1616.
- [6] WEN Z G, WANG S, FAN C X, et al. Joint transceiver and power splitter design over two-way relaying channel with lattice codes and energy harvesting[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11):2039-2042.
- [7] TUTUNCUOGLU K, VARAN B, YENER A. Throughput maximization for two-way relay channels with energy harvesting nodes: the impact of relaying strategies[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6):2081-2093.
- [8] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7):3622-3636.
- [9] SONG L Y. Relay selection for two-way relaying with amplify-and-forward protocols[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4):1954-1959.
- [10] TALWAR S, JING Y D, SHAHBAZPANAHI S. Joint relay selection and power allocation for two-way relay networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(2):91-94.
- [11] CUI H Y, MA M, SONG L Y, et al. Relay selection for two-way full duplex relay networks with amplify-and-forward protocol[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2014, 13(7):3768-3777.

- [12] YI Z H, JU M C, KIM I. Outage probability and optimum power allocation for analog network coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2):407-412.

### 作者简介:



李 玮(1981—),女,四川宜宾人,2012年获硕士学位,现为讲师,主要研究方向为移动通信新技术、通信与测控技术;

LI Wei was born in Yibin, Sichuan Province, in 1981. She received the M. S. degree in 2012. She is now a lecturer. Her research concerns new technology for mobile communication, communication and measurement & control technology.

Email:27939950@qq.com

丁长文(1992—),男,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为协作通信网络中的中继选择和功率分配;

DING Changwen was born in Dazhou, Sichuan Province, in 1992. He is now a graduate student. His research concerns relay selection and power allocation of cooperative communication.

杨 霖(1977—),男,四川人,2007年获博士学位,现为副教授,主要研究方向为无线与移动通信、现代通信中的信号处理。

YANG Lin was born in Sichuan Province, in 1977. He received the Ph. D. degree in 2007. He is now an associate professor. His research concerns wireless and mobile communication, signal processing in modern communication.

Email:eelyang@uestc.edu.cn