

基于能量收集的多对双向 MIMO AF 中继系统的和速率分析

李高祥^{1,2}, 杨 霖^{1,2}, 林旭彬¹

(1. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川成都 611731;

2. 中国电子科技集团公司第五十四所通信网信息传输与分发技术重点实验室, 河北石家庄 050081)

摘 要: 采用基于中继功率分配的能量收集方法, 中继将接收到的部分射频信号转化为能量并利用收集到的能量放大和转发剩下的信号, 通过在中继使用最大比合并/最大比传送的接收和预编码技术, 推导出每个用户的遍历速率的下界表达式, 然后研究了使所有用户和速率最大的最佳中继功率分配比. 仿真结果说明了在最佳中继功率分配比的条件下可以得到最大的和速率, 同时给出了和速率与中继天线数和用户对数的关系, 并表明了用户在总功率一定的条件下, 能量收集中继系统的性能优于传统的没有能量收集的中继系统.

关键词: 双向中继系统; 多对用户; 能量收集; 中继功率分配; 最大比合并/最大比传送; 和速率

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)03-0531-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.003

Sum Rate Analysis of Multi-pair Two-Way MIMO AF Relay System Based on Energy Harvesting

LI Gao-xiang^{1,2}, YANG Lin^{1,2}, LIN Xu-bin¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Networks Laboratory, the 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: An energy harvesting method based on power splitting-based relay is adopted, where the relay converts part of the received radio frequency signals into energy and amplifies and forwards the remaining signal using the collected energy. By using maximum-ratio combining/maximum-ratio transmission receiving and precoding technology at the relay node, the corresponding lower bound expressions for the ergodic rate of each user are derived and the optimal relay power allocation ratio which maximizes the sum rate of all users is calculated. The simulation results show that the maximum sum rate can be obtained under the optimal relay power allocation ratio, and the relationship between the sum rate with the number of relay antennas and the number of users is given. What's more, the performance of the relay system based on energy harvesting outperforms that without energy harvesting.

Key words: two-way relay system; multipair users; energy harvesting; power splitting based relay; maximum-ratio combining/maximum-ratio transmission; sum rate

1 绪论

无线通信中, 中继通信技术可以提高无线通信网络的性能, 扩展通信距离, 受到了很大关注^[1,2]. 相比于单向中继网络, 双向中继网络的频谱效率是单向中继网络的两倍, 成为近年来的研究热点^[3]. 常用的中继协议有放大

转发 (Amplify and Forward, AF) 和解码转发 (Decode and Forward, DF), AF 相对于 DF 较为简单和容易实现, 中继只需对接收到的信号进行放大然后转发给接收端^[4].

相比单对用户的双向中继系统, 多对用户的双向中继系统具有更强的实用价值^[5~11]. 文献[5]说明了可实现的遍历和速率, 提供了整体数据速率的一个上界,

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2018-09-09; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61831004, No. 61571082); 通信抗干扰技术国家级重点实验室基础科研创新基金 (No. IFN2018218); 国防基础科研计划资助 (No. JCKY2017204A603); 国防科技创新特区项目; 通信网信息传输与分发技术重点实验室开放课题 (No. 614210402070517)

可以用来分析系统的基本容量限制. 文献[6]提出了多对双向中继系统的分布式 AF 中继方案, 推导出了可实现速率的分析表达式. 文献[7]提出了在 OFDM 全双工中继网络中, 采用最小二乘信道估计, 基于减小最小均方误差之和的最优导频设计和功率分配方案. 文献[8]分析了多对单向多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 中继系统可实现的和速率. 文献[9, 10]将文献[8]中的研究扩展到多对双向 MIMO 中继系统. 文献[11]提出了多对双向大规模 MIMO 中继系统的可实现的遍历速率的下界表达式, 并分析了遍历速率与中继天线数和用户对数的关系, 同时分析了中继天线足够大时的能量效率. 文献[12]则是在信道估计条件下, 得到了可实现的遍历速率的下界表达式. 基于这个表达式, 提出了使频谱效率最大的功率分配方案. 文献[13]提出了多对双向 AF 中继网络中基于高和速率的中继波束成形方案.

然而在实际的中继系统中, 中继节点的电池容量是有限的, 充电和替换电池在某些环境下是十分不方便和需要花费很大代价的^[14, 15]. 传统的能量收集是从自然环境中收集能量, 例如太阳, 风等自然能量^[16-18], 但这种能源不能随时获得, 也不易于控制. 文献[19]提出了一种新兴的能量收集技术, 通过收集射频信号的能量, 可以延长能量有限的中继节点的使用时间, 因为射频信号可以同时携带能量和信号, 所以中继节点可以同时收集能量和处理信息. 文献[20]提出了一个基于中继功率分配 (Power Splitting-based Relay, PSR) 的能量收集技术, 中继将接收到的部分射频信号转化为能量并利用收集到的能量放大和转发剩下的信号. 文献[21]提出了基于 PSR 协议的双向中继系统联合功率分配和中继选择方案. 文献[22]提出了基于 PSR 协议的最小功率消耗的双向中继系统联合功率分配和中继选择算法. 文献[23]研究了结合 PSR 与 AF 和 DF 中继协议的使系统容量最大的最优中继功率分配方案. 文献[24]研究了基于 PSR 的中继系统的性能, 并提出了信源功率分配和中继功率分配策略. 关于多对双向中继系统, 文献[25]研究了多对双向 MIMO AF 中继系统的功率传输技术, 提出了先收集后传输的能量收集协议. 整个过程分为三个时隙: 第一个时隙, 中继向所有用户广播射频信号, 用户收集能量; 第二个时隙, 所有用户向中继发送信号; 第三个时隙, 中继转发信号到所有用户. 文献[26]提出了一种新的大规模 MIMO 多对双向中继系统的无线功率传输技术, 用户采用功率分割策略, 将接收到的中继广播的信号分为两部分, 一部分转化为能量, 用于下一阶段用户向中继的信号传输, 另一部分用作信息处理. 文献[25, 26]都只考虑了多对双向中继系统

中用户的能量收集, 没有考虑到中继的能量收集.

本文考虑一个基于能量收集的多对双向 MIMO AF 中继系统, 多对用户通过一个能量有限的中继节点交换信息, 中继将接收到的部分射频信号转化为能量并利用收集到的能量放大和转发剩下的信号. 中继采用 PSR 的能量收集技术和最大比合并/最大比传送 (Maximum-Ratio Combining/Maximum-Ratio Transmission, MRC/MRT) 的接收和预编码技术, 推导出每个用户的遍历速率的下界表达式, 同时计算出使所有用户和速率最大的最佳中继功率分配比. 仿真结果说明了在最佳中继功率分配比的条件下, 可以得到比随机选取中继功率分配比更大的和速率, 同时也说明了在用户总功率一定的情况下, 和速率与中继天线数成正比, 与用户对数成反比以及能量转换效率不太低时, 利用最佳功率分配比的 PSR 中继系统的性能优于传统的没有能量收集的中继系统.

符号: 对一个矩阵 \mathbf{X} , \mathbf{X}^* 、 \mathbf{X}^T 、 \mathbf{X}^H 、 $\text{Tr}(\mathbf{X})$ 分别表示矩阵 \mathbf{X} 的共轭、转置、共轭转置、迹, $\|\mathbf{X}\|_F$ 表示矩阵 \mathbf{X} 的 F 范数, $|\cdot|$ 、 $\mathbb{E}[\cdot]$ 、 $\text{Var}(\cdot)$ 分别表示绝对值、期望和方差. 对任意向量 \mathbf{x} , $\text{diag}(\mathbf{x})$ 表示一个对角矩阵, 其对角元素为 \mathbf{x} 中的元素.

2 系统模型

系统模型如图 1 所示, K 对用户通过一个天线数为 N 的中继 R 交换信息, $N \geq 2K$, 第 m 对用户对可以表示为 $(2m-1, 2m)$ 或 $(2m, 2m-1)$. 假设用户对之间信道条件较差, 不能直接连接, 必须通过中继传输信号. 采用时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 的传输模式, 双向中继的传输过程分为两个阶段, 多址接入 (Multiple-Access, MA) 阶段和广播 (Broadcast, BC) 阶段. 在 MA 阶段, 所有用户同时向中继传送信号; 在 BC 阶段, 中继放大并广播接收到的信号. 设 T 为整个传输过程的时间, 每个阶段的时间为 $T/2$.

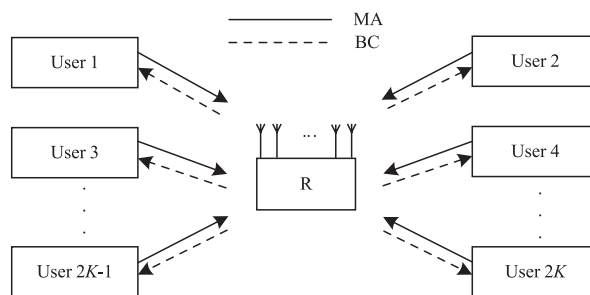


图1 多对双向MIMO AF中继系统模型

假设用户与中继之间的信道都是独立同分布的瑞利信道且在整个传输过程中都是恒定的, 定义第 i 个用户和中继之间的信道为 $\mathbf{g}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ($i = 1, 2, \dots, 2K$), 其中 \mathbf{g}_i 中的元素都是独立同分布的, 服从均值为 0, 方差

为 1 的复高斯分布,所有用户与中继之间的信道矩阵可以表示为

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_{2K}] \in \mathbb{C}^{N \times 2K} \quad (1)$$

2.1 数据传输

在 MA 阶段,所有用户同时向中继发送信号,中继接收到的射频信号为

$$\mathbf{r} = \sum_{i=1}^{2K} \sqrt{p_i} \mathbf{g}_i x_i + \mathbf{n}_R = \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X} + \mathbf{n}_R \quad (2)$$

其中 $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, $\mathbf{P} = \text{diag}(\sqrt{p_1}, \sqrt{p_2}, \dots, \sqrt{p_{2K}})$, p_i 是第 i 个用户发送信号的功率, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{2K}]^T$, x_i 是第 i 个用户发送的信号,且 $E(\mathbf{X} \mathbf{X}^H) = \mathbf{I}_{2K}$, $\mathbf{n}_R \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 是中继的附加高斯白噪声向量,每个元素服从均值为 0,方差为 σ_n^2 的复高斯分布。

如图 2 所示,基于文献[20]中的 PSR 协议,中继能量收集和信号处理的功率分配比为 $\rho:1-\rho$,信号发送到能量收集接收机转换成能量,剩余的信号 $\sqrt{1-\rho}r$ 发送到信号处理接收机,能量收集接收机接收到的信号为

$$\sqrt{\rho}r = \sqrt{\rho} \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X} + \sqrt{\rho} \mathbf{n}_R \quad (3)$$

中继节点收集到的能量为

$$E_H = \frac{T}{2} \mu \rho \|\mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2 \quad (4)$$

其中, $0 \leq \mu \leq 1$ 是能量收集接收机的能量转换效率。中继的发送功率为

$$P_R = \frac{E_H}{T/2} = \mu \rho \|\mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2 \quad (5)$$

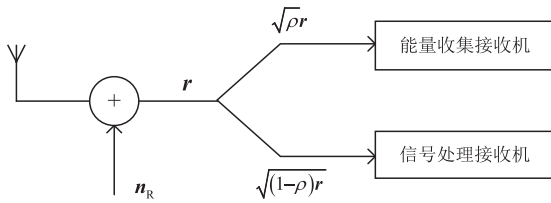


图2 基于PSR协议的中继接收机框图

信道矩阵 \mathbf{G} 中的元素都是独立同分布的,服从均值为 0,方差为 1 的复高斯分布,中继的平均发送功率为

$$\bar{P}_R = \mu \rho E(\|\mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2) = \mu \rho N \left(\sum_{i=1}^{2K} p_i \right) \quad (6)$$

中继的信号处理接收机对接收到的信号采用 MRC 的接收方式,在发送信号时采用 MRT 的预编码技术,预编码后的信号为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_R &= \mathbf{F}(\sqrt{1-\rho}r + \mathbf{n}_{bR}) \\ &= \sqrt{1-\rho} \mathbf{F} \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X} + \sqrt{1-\rho} \mathbf{F} \mathbf{n}_R + \mathbf{F} \mathbf{n}_{bR} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 \mathbf{F} 是中继使用的 MRC/MRT 接收和预编码矩阵,具体的表达式在 2.2 节给出。 $\mathbf{n}_{bR} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 是频带信号向基带信号转换过程中的附加高斯白噪声向量,每个元素服从均值为 0,方差为 σ_n^2 的复高斯分布。

在 BC 阶段,中继向所有用户广播 \mathbf{x}_R ,第 k 个用户接收到的信号为

$$\begin{aligned} y_k &= \mathbf{g}_k^T \mathbf{x}_R + n_k \\ &= \sqrt{(1-\rho)} p_{k'} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'} x_{k'} + \sqrt{(1-\rho)} p_k \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_k x_k \\ &\quad + \sum_{i \neq k, k'}^{2K} \sqrt{(1-\rho)} p_i \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_i x_i + \sqrt{1-\rho} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{n}_R \\ &\quad + \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{n}_{bR} + n_k \end{aligned} \quad (8)$$

其中 (k, k') 是一对用户对, n_k 是第 k 个用户接收信号时的附加高斯白噪声,服从均值为 0,方差为 σ_n^2 的复高斯分布。式(8)中,第一项为我们希望得到的信号,第二项为自干扰信号,第三项为其他用户的干扰信号,最后三项为传输过程中的噪声信号。

假设所有的信道是已知的,自干扰可以完美消除,第 k 个用户接收到的信号为

$$\begin{aligned} y_k &= \sqrt{(1-\rho)} p_{k'} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'} x_{k'} + \sum_{i \neq k, k'}^{2K} \sqrt{(1-\rho)} p_i \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_i x_i \\ &\quad + \sqrt{1-\rho} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{n}_R + \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{n}_{bR} + n_k \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 MRC/MRT

为了减小其它用户对干扰信号,在中继节点采用了简单和广泛使用的 MRC/MRT 的接收和预编码技术。根据文献[27],MRC/MRT 接收和预编码矩阵为

$$\mathbf{F} = \alpha \mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H \quad (10)$$

其中 $\mathbf{T} = \text{diag}\{\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_K\}$ 是一个块对角调矩阵, $\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_2 = \dots = \mathbf{T}_K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, α 是满足中继功率限制的放大系数,由式(5),(7)和式(10)可得

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{P_R}{(1-\rho) \|\mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2 + (2-\rho) \sigma_n^2 \|\mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H\|_F^2}} \\ &= \sqrt{\frac{\mu \rho \|\mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2}{(1-\rho) \|\mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2 + (2-\rho) \sigma_n^2 \|\mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H\|_F^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

信道矩阵 \mathbf{G} 中的每个元素都服从均值为 0,方差为 1 的复高斯分布,则中继固定的平均放大系数为

$$\alpha = \sqrt{\frac{\bar{P}_R}{(1-\rho) E(\|\mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{X}\|_F^2) + (2-\rho) \sigma_n^2 E(\|\mathbf{G}^* \mathbf{T} \mathbf{G}^H\|_F^2)}} \quad (12)$$

将式(6)代入式(12),根据数学推导,式(12)可以写为

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu \rho \left(\sum_{i=1}^{2K} p_i \right)}{(1-\rho)(N+1)(N+1+2K) \left(\sum_{i=1}^{2K} p_i \right) + 2(2-\rho)(N+1)K\sigma_n^2}} \quad (13)$$

3 遍历速率分析及最佳的功率分配比

从式(9)可得,第 k' 个用户到第 k 个用户的数据传输的可实现的遍历速率表示为式(14)。

$$R_k = \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{(1-\rho)p_{k'} |\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'}|^2}{(1-\rho) \sum_{i \neq k, k'}^{2K} p_i |\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_i|^2 + (2-\rho)\sigma_n^2 \|\mathbf{g}_k^T \mathbf{F}\|_F^2 + \sigma_n^2} \right) \right] \quad (14)$$

因为式(14)整体分析的复杂性,为了获得可以用于最佳功率分配比的理论表达式,根据文献[12]中的技术,将接收到的信号写为希望得到信号的均值和不相关的有效噪声,可以推导出最差情况下的每个用户的遍历速率的下界表达式. 将式(9)中希望得到的信号 $\sqrt{(1-\rho)p_{k'}} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'} x_{k'}$ 写成 $\sqrt{(1-\rho)p_{k'}} \mathbb{E}(\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'}) x_{k'} + \sqrt{(1-\rho)p_{k'}} [\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'} - \mathbb{E}(\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'})] x_{k'}$, 前一项是希望得到的信号,则式(9)可表示为

$$y_k = \sqrt{(1-\rho)p_{k'}} \mathbb{E}(\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'}) x_{k'} + \tilde{n}_k \quad (15)$$

其中 \tilde{n}_k 代表第 k' 个用户到第 k 个用户的数据传输过程中的有效噪声,其表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{n}_k &= \sqrt{(1-\rho)p_{k'}} [\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'} - \mathbb{E}(\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'})] x_{k'} \\ &+ \sum_{i \neq k, k'}^{2K} \sqrt{(1-\rho)p_i} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_i x_i + \sqrt{1-\rho} \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{n}_R \end{aligned}$$

$$R_k^{\text{lower}} = \log_2 \left(1 + \frac{(1-\rho)\alpha^2 N^2 (N+1)^2 p_{k'}}{2(1-\rho)\alpha^2 N(N+1)(N+1+K) \left(\sum_{i \neq k}^{2K} p_i \right) + [(2-\rho)\alpha^2 N(N+1)(N+1+2K) + 1]\sigma_n^2} \right) \quad (18)$$

所有用户的和速率下界表示为

$$R_{\text{sum}}^{\text{lower}} = \sum_{k=1}^{2K} \log_2 \left(1 + \frac{N^2 (N+1)^2 p_{k'}}{2N(N+1)(N+1+K) \left(\sum_{i \neq k}^{2K} p_i \right) + f(\rho)} \right) \quad (19)$$

其中 $f(\rho) = \frac{[(2-\rho)\alpha^2 N(N+1)(N+1+2K) + 1]\sigma_n^2}{(1-\rho)\alpha^2}$ 是关于 ρ 的函数.

求最大和速率的问题与求最大和速率下界的问题是一致的,从式(19)中,我们可以得到和速率下界 $R_{\text{sum}}^{\text{lower}}$ 与 $f(\rho)$ 成反比,则求最大和速率的问题可以转化为

$$\begin{aligned} \min_{\rho} \quad & f(\rho) \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq \rho \leq 1 \end{aligned} \quad (20)$$

将式(13)代入 $f(\rho)$, 同时对 $f(\rho)$ 求导,可以得到使 $f(\rho)$ 最小且满足约束条件的 ρ 值,解得

$$\rho^{\text{opt}} = \frac{-(B+2C) + \sqrt{(A+C)(B+2C)}}{A-B-C} \quad (21)$$

其中, $A = N(N+1)(N+1+2K)$,

$$B = \frac{(N+1)(N+1+2K)}{\mu},$$

$$C = 2(N+1)K\sigma_n^2 / \left(\mu \sum_{i=1}^{2K} p_i \right).$$

4 仿真结果及分析

通过仿真首先分析系统的和速率与中继功率分配

$$+ \mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{n}_{\text{bR}} + n_k \quad (16)$$

在式(15)中,第一项我们希望得到的信号和第二项有效噪声信号是不相关的, \tilde{n}_k 的概率密度函数不容易求出,但是根据文献[12],可以得到最差情况下的有效噪声,其中每一项都可以视为独立的高斯噪声,则第 k' 个用户到第 k 个用户的数据传输的遍历速率的下界为

$$R_k^{\text{lower}} = \log_2 \left(1 + \frac{(1-\rho)p_{k'} |\mathbb{E}(\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'})|^2}{(1-\rho)p_{k'} \text{Var}(\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_{k'}) + \text{IP}_k + \text{NO}_k} \right) \quad (17)$$

其中 $\text{IP}_k = (1-\rho) \sum_{i \neq k, k'}^{2K} p_i \mathbb{E}(|\mathbf{g}_k^T \mathbf{F} \mathbf{g}_i|^2)$, $\text{NO}_k = (2-\rho)\sigma_n^2 \cdot \mathbb{E}(\|\mathbf{g}_k^T \mathbf{F}\|_F^2)$. 根据数学推导,上面式(17)可以写为式(18),其中 α^2 可由式(13)得到.

比 ρ 的关系,并证明了最佳中继功率分配比 ρ^{opt} 的有效性;其次,分析了在用户总功率一定时,在 ρ^{opt} 的条件下,和速率与中继天线数 N 和用户对数 K 的关系;最后说明了在用户总功率一定的条件下,能量收集中继系统的性能优于传统的没有能量收集的中继系统. 仿真过程中,所有用户总功率 $P_T = 1$, 功率平均分配,每个用户的功率为 $p_i = P_T/(2K)$ ($i = 1, 2, \dots, 2K$). 除特别定义外,能量转换效率 $\mu = 1$, 定义输入信噪比为 $\text{SNR} = P_T/\sigma_n^2$.

4.1 和速率与中继功率分配比的关系

图3表示中继天线数 $N = 8$, 用户对数 $K = 2$ 时,和速率与中继功率分配比 ρ 的关系. 从图中可以看出,存在最佳的中继功率分配比 ρ^{opt} , ρ 从 0 到 ρ^{opt} 增加时,和速率随之增加; ρ 从 ρ^{opt} 到 1 增加时,和速率随之减小. 这是因为 ρ 小于 ρ^{opt} 时,用于中继能量收集的功率较小,中继收集到的能量较小,接收用户的 SINR 较小; ρ 大于 ρ^{opt} 时,信号处理接收机接收到的信号较小,中继发送的信号受噪声影响较大,接收用户的 SINR 也较小. 同时也可以看出,低 SNR 条件下, ρ 的中间变化对和速率的影响较大;高 SNR 时, ρ 的中间变化对和速率的影响较小. 这是因为在式(19)中, $f(\rho)$ 和噪声功率 σ_n^2 有关,在高信噪比下, $f(\rho)$ 对和速率的影响很小,也就是说 ρ 在中间变化时,对和速率的影响很小,和速率变化不大. 当 $\rho = 0$ 时,中继没有能量转发信号,和速率为 0; 当 $\rho =$

1 时,中继接收到的信号全部转化为能量,没有信号可以发送,和速率也为 0.

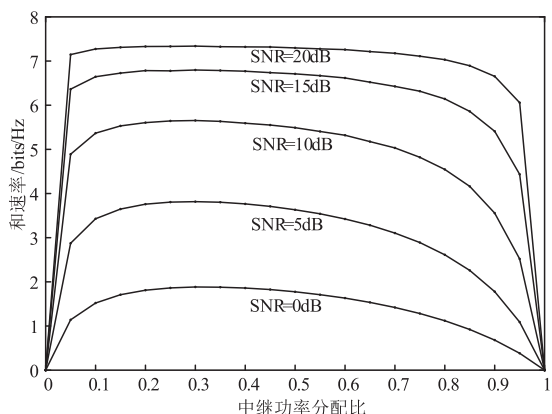


图3 和速率与中继功率分配比的关系曲线

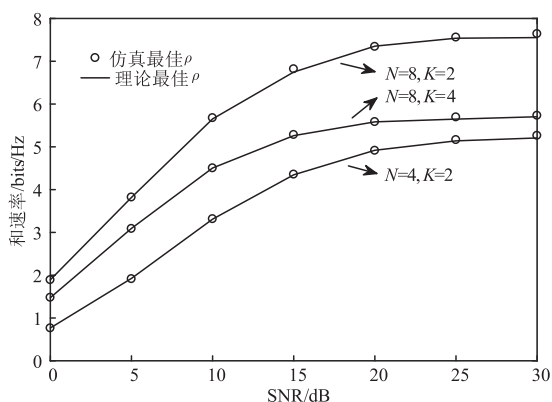


图4 最大和速率与SNR的关系曲线

图 4 中,圆圈是根据图 3 的仿真结果,在固定的 SNR 下,通过仿真不同 ρ ,得到不同的和速率,找到使和速率最大的 ρ 即仿真最佳 ρ ,从而得到最大的和速率;实线是根据推导出的最佳功率分配比 ρ^{opt} 得到的最大和速率.从图中可以看出, ρ^{opt} 得到的和速率与仿真最佳 ρ 得到的最大和速率基本一致,证明了推导出的 ρ^{opt} 可以得到最大的和速率.而且 $N=8$ 时, $K=2$ 得到的和速率要大于 $K=4$ 时的和速率,这是因为用户总功率一定, K 越大,每个用户的功率越小,使得和速率变小; $K=2$ 时, $N=8$ 得到的和速率要大于 $N=4$ 时的和速率,这是因为天线越多,每个用户的速率越大.

4.2 和速率与中继天线数和用户对数的关系

图 5 表示用户对数 $K=2$ 时,在最佳中继功率分配比的条件下,所有用户的总功率一定时,和速率与中继天线数 N 的关系.从图中可看出,和速率与 N 成正比,这是因为在 MIMO 系统中,系统容量和天线数成正比.

图 6 表示中继天线数 $N=16$ 时,在最佳中继功率分配比的条件下,所有用户的总功率一定时,和速率与用户数 K 的关系.从图中可以看出,和速率与 K 成反

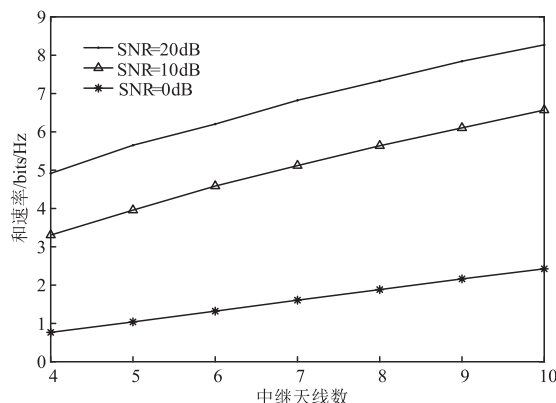


图5 和速率与中继天线数的关系曲线

比,这是因为用户总功率一定时, K 越大,根据 $p_i = P_T/(2K)$ ($i=1,2,\dots,2K$),每个用户的功率越小,每个用户的信噪比越小,使得每个用户的 SINR 越小,SINR 减小导致的和速率减幅大于 K 增加得到的和速率增幅,使得和速率越小.

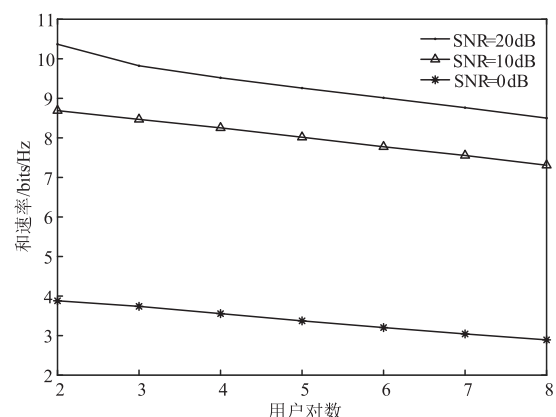


图6 和速率与用户对数的关系曲线

4.3 最佳和固定中继功率分配比的能量收集中继系统与传统中继系统的性能比较

图 7 中,中继天线数 $N=8$,用户数 $K=2$,实线是在最佳中继功率分配比和固定中继功率分配比 ($\rho=0.5$) 的条件下,能量收集中继系统得到的和速率,虚线是传统的没有能量收集的中继系统得到的和速率,此时用户功率 $p_i = P_T/(4K)$ ($i=1,2,\dots,2K$),中继功率 $P_R = P_T/2$.从图中可以看出, $\mu=1$ 和 $\mu=0.4$ 时,最佳中继功率分配比的能量收集中继系统的和速率都大于固定中继功率分配比的能量收集中继系统的和速率.同时,最佳中继功率分配比和固定中继功率分配比的能量收集中继系统的和速率都大于传统中继系统的和速率,说明了能量收集中继系统的性能要优于传统中继系统,最佳中继功率分配比可以提升能量收集中继系统的性能.另外, $\mu=1$ 时最佳中继功率分配比与固定中继功率分配比的性能差距大于 $\mu=0.4$ 时的差距,这是因为 μ 越大,中继

收集到的能量越多,最佳 ρ 对中继发送功率的提升越大,因而最佳 ρ 对性能的提升也越大。

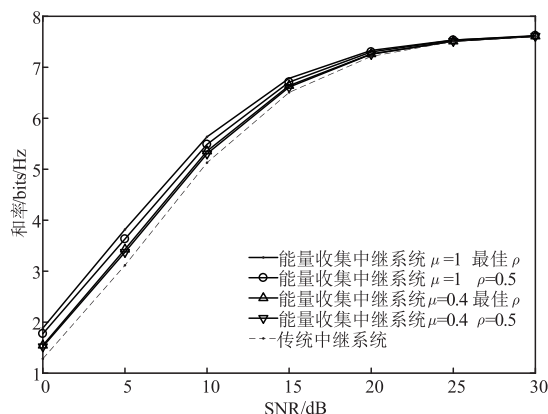


图7 能量收集中继系统与传统中继系统的比较

5 总结

本文提出一个基于能量收集的多对双向 MIMO AF 中继系统,多对用户通过一个多天线的中继节点交换信息,中继本身没有能量。在中继采用 PSR 的能量收集方法和 MRC/MRT 的接收和预编码技术,将中继接收到的射频信号一部分转化为能量并利用收集到的能量放大和转发剩下的信号,推导出每个用户的遍历速率的下界表达式,进而利用这个表达式计算出使所有用户速率最大的最佳中继功率分配比。仿真结果说明了用户速率随着中继功率分配比的增加先增加后减小,这表示存在最佳的中继功率分配比,而且相比随机选取中继功率分配比,在最佳中继功率分配比的条件下可以得到最大的和速率。同时也说明了在用户总功率一定的情况下,和速率与中继天线数成正比,与用户对数成反比。另外,在用户总功率一定,能量转换效率不太低时,能量收集技术可以提升中继系统的性能,且最佳中继功率分配比可以获得比固定中继功率分配比更好的性能。

参考文献

- [1] Rankov B, Wittneben A. Spectral efficiency protocols for half duplex fading relay channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 379–389.
- [2] 邓单, 周雯. 不可信无线中继网络中基于用户选择的安全通信研究[J]. 电子学报, 2017, 45(7): 1593–1600. DENG Dan, ZHOU Wen. Secure selection for decode and forward cooperative networks with untrusted relay[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1593–1600. (in Chinese)
- [3] Silva S, Amarasuriya G, Tellambura C, et al. Relay selection strategies for MIMO two-way relay networks with spatial multiplexing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(12): 4694–4710.
- [4] Chen X, Lei L, Zhang H, et al. Large scale MIMO relaying techniques for physical layer security: AF or DF? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(9): 5135–5146.
- [5] Amarasuriya G, Tellambura C, Ardakani M. Sum rate analysis of two-way MIMO AF relay networks with zero forcing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4456–4469.
- [6] Ngo H Q, Larsson E G. Large scale multipair two-way relay networks with distributed AF beamforming[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 1–4.
- [7] Wang J, Yu H, Wu Y P, et al. Pilot optimization and power allocation for OFDM based full duplex relay networks with IQ imbalances[J]. IEEE Access, 2017, 5: 24344–24352.
- [8] Suraweera H A, Ngo H Q, Duong T Q, et al. Multi-pair amplify and forward relaying with very large antenna arrays [A]. IEEE International Conference on Communications [C]. Budapest, Hungary: IEEE, 2013. 4635–4640.
- [9] Cui H Y, Song L Y, Jiao B L. Multi-pair two-way amplify and forward relaying with very large number of relay antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2636–2645.
- [10] Liu M M, Zhang J H, Zhang P. Multipair two-way relay networks with very large antenna arrays [A]. IEEE 80th Vehicular Technology Conference [C]. Vancouver, Canada: IEEE, 2014. 1–5.
- [11] Jin S, Liang X S, Wong K K, et al. Ergodic rate analysis for multipair massive MIMO two-way relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1480–1491.
- [12] Dai Y Y, Dong X D. Power allocation for multi-pair massive MIMO two-way AF relaying with linear processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 5932–5946.
- [13] Shu F, Lu Y Z, Chen Y, et al. High-sum-rate beamformers for multi-pair two-way relay networks with amplify and forward relaying strategy[J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(2): 1–11.
- [14] 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.
- [15] Medepally B, Mehta N B. Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3543–3553.
- [16] Xu J, Zhang R. Throughput optimal policies for energy

- harvesting wireless transmitters with nonideal circuit power[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 322 – 332.
- [17] Ho C K, Zhang R. Optimal energy allocation for wireless communications with energy harvesting constraints[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(9): 4808 – 4818.
- [18] Luo S, Zhang R, Lim T J. Optimal save then transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1196 – 1207.
- [19] Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously[A]. IEEE International Symposium on Information Theory[C]. Toronto, Canada: IEEE, 2008. 1612 – 1616.
- [20] 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.
- [21] Men J J, Ge J H, Zhang C S, et al. Joint optimal power allocation and relay selection scheme in energy harvesting asymmetric two-way relaying system[J]. IET Communications, 2015, 9(11): 1421 – 1426.
- [22] 丁长文, 杨霖, 李高祥. 能量收集双向中继网络的高能效联合中继选择和功率分配算法[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1124 – 1129.
DING Chang-wan, YANG Lin, LI Gao-xiang. Energy efficient relay selection and power allocation for energy harvesting two-way relay network[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1124 – 1129. (in Chinese)
- [23] Yin S X, Qu Z W, Zhang L L. Wireless information and power transfer in cooperative communications with power splitting[A]. IEEE Global Communications Conference[C]. San Diego, USA: IEEE, 2015. 1 – 6.
- [24] Liu Y, Wang X. Information and energy cooperation in OFDM relaying: protocols and optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5088 – 5098.
- [25] Salem A, Hamdi K A. Wireless power transfer in multipair two-way AF relaying networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4578 – 4591.
- [26] Wang X H, Liu J, Zhai C. Wireless power transfer based multipair two-way relaying with massive antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7672 – 7684.
- [27] Liang Y C, Zhang R. Optimal analogue relaying with multi-antennas for physical layer network coding[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China: IEEE, 2008. 3893 – 3897.

作者简介



李高祥 男, 1993 年生于山西临汾. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室硕士研究生. 研究方向为双向中继系统的性能优化.
E-mail: 571299065@qq.com



杨霖 男, 1977 年生于四川宜宾. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室副教授. 研究方向为无线与移动通信、现代通信中的信号处理.
E-mail: eelyang@uestc.edu.cn



林旭彬 男, 1993 年生于福建漳州. 本科就读于电子科技大学通信与信息工程学院, 现于电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室攻读硕士研究生. 主要研究方向为稀疏码多址接入、正交频分复用技术.