



解码转发单向多中继网络的能效与谱效权衡

储梦杰^{1,2}, 仇润鹤^{1,2}

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

摘要: 为优化解码转发(DF)单向多中继网络的能量效率(EE)与频谱效率(SE), 提出一种中继选择与功率分配联合优化方法。在DF单向多中继传输网络中, 选择能够使EE最大的中继节点作为最佳中继并进行最优功率分配, 给出最优功率分配下EE和SE的表达式, 以提高SE为目标求出最优功率分配因子, 将其代入EE的计算表达式后, 将节点总功率作为优化变量以实现EE最大化, 在此基础上, 分析中继相对位置改变时EE和SE的变化趋势。仿真结果表明, 相比随机中继等功率分配以及仅最优功率分配等方法, 该方法具有更高的EE和SE。

关键词: 解码转发; 多中继网络; 单向中继; 中继选择; 能量效率; 频谱效率

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 储梦杰, 仇润鹤. 解码转发单向多中继网络的能效与谱效权衡[J]. 计算机工程, 2021, 47(6): 182-187, 196.

英文引用格式: CHU Mengjie, QIU Runhe. Tradeoff between energy efficiency and spectrum efficiency in decode-and-forward one-way multi-relay networks[J]. Computer Engineering, 2021, 47(6): 182-187, 196.

Tradeoff Between Energy Efficiency and Spectrum Efficiency in Decode-and-Forward One-Way Multi-Relay Networks

CHU Mengjie^{1,2}, QIU Runhe^{1,2}

(1. College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In order to optimize the Energy Efficiency (EE) and Spectrum Efficiency (SE) of Decode-and-Forward (DF) one-way multi-relay networks, this paper proposes a joint optimization method for relay selection and power distribution of DF one-way multi-relay networks. In the DF one-way multi-relay transmission network, the relay node that can maximize EE is selected as the best relay, and the optimal power distribution is carried out. The expression of EE and SE in the case of the optimal power distribution is given, and the optimal power distribution factor is calculated to improve SE. The obtained power distribution factor is then substituted into the EE expression, and the total power of the node is taken as the optimization variable to maximize the EE. On this basis, the changes of EE and SE along with the relative position of relay are analyzed. The simulation results show that the proposed method has higher EE and SE than the existing random selection-based equal power distribution method and the optimal power distribution method.

[Key words] Decode-and-Forward (DF); multi-relay network; one-way relay; relay selection; Energy Efficiency (EE); Spectrum Efficiency (SE)

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0058051

0 概述

随着绿色信息的推广以及通信技术的发展, 节能无线通信受到人们的广泛关注。能量效率(Energy Efficiency, EE)是指从发射端到接收端单位能耗成功传输的信息比特数。频谱效率(Spectrum Efficiency, SE)是指单位带宽的平均数据速率^[1-3]。协作通信提高了吞吐量、覆盖面和链路可靠性, 放大转发(Amplify-

and-Forward, AF)和解码转发(Decode-and-Forward, DF)是2种常用的中继协议^[4], 一般情况下, 当源节点到中继节点的链路信道质量足够好时, DF协议的通信性能优于AF协议, 因此, 本文对DF中继网络进行研究。

近年来, 学者们对各种中继网络的EE和SE进行了研究。文献[5-6]在传输电路功率不可忽略的情况下, 通过联合优化时间和传输功率以实现解码

基金项目: 国家自然科学基金(61671143)。

作者简介: 储梦杰(1997—), 女, 硕士研究生, 主研方向为协作中继网络; 仇润鹤, 教授、博士。

收稿日期: 2020-04-13 修回日期: 2020-06-07 E-mail: 1029668477@qq.com

转发双向中继系统的EE最大化,但是它们没有研究SE优化问题。文献[7]联合优化发射波束形成设计、用户分组、组间时间分配和功率分配,以最大化SE。文献[8]将机会模式选择和发射功率调整相结合,以最大限度地提高瞬时SE和平均SE。但是,文献[7-8]仅研究SE优化问题,未对EE进行分析。文献[9-10]对全双工中继信道不同中继协议下的SE和中继EE进行研究,但是它们仅研究中继的EE,没有对整个系统的EE进行分析。

上述文献均对单中继网络进行研究,在中继网络中,通常在源节点和目的节点之间存在多个中继节点。文献[11]研究模拟网络编码的双向多中继系统中EE和SE之间的关系,在条件约束下寻找最佳双向SE以获得最大的EE。文献[12-13]研究AF多中继网络EE和SE之间的最佳平衡问题,但是其以牺牲SE来提高EE。文献[11-13]没有进行中继选择,在多中继网络中,中继选择可以降低多中继网络的功耗进而优化EE。文献[14]将中继选择和功率分配相结合从而提高无线AF网络的EE,首先选择最优的中继节点,然后分配所有节点的最优功率从而优化EE。上述文献大多基于AF进行研究,较少有研究人员分析DF。文献[15]研究在中继发射功率约束以及最小SE约束下全双工和半双工DF的EE最大化问题,但是其未分析EE和SE之间的关系。文献[16-18]研究DF多中继网络,但是其未分析EE和SE问题而是对中断概率进行探析。文献[19]研究DF多跳中继的中断概率最小化问题。文献[20]对采用DF和AF协议的多用户多中继网络中用户的最小EE最大化问题进行研究,通过联合优化中继分配和发射功率来最大化用户的最小EE。

本文研究DF单向多中继网络的EE和SE均衡问题,提出中继选择和功率分配的联合优化方法,并分析节点相对位置不同情况下的EE和SE变化趋势。

1 系统模型

如图1所示,本文单向多中继传输网络由基站、用户和 n 个中继组成,为便于表述,将基站称为源节点 S ,用户称为目的节点 D ,中继称为中继节点 R_i ,其中, $i=1,2,\dots,n$ 。

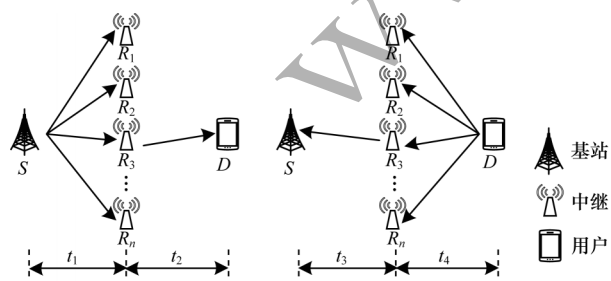


图1 基于DF的单向多中继传输网络模型

Fig.1 One-way multi-relay transmission network model based on DF

源节点 S 、最佳中继节点 R_a 和 R_b 、目的节点 D 都为半双工传输。假设源节点 S 和目的节点 D 之间不存在直连链路,必须通过中继进行数据传输,所有的信道为独立平坦瑞利衰落信道, S 到中继 R_i 的信道衰落系数为 h_{si} ,中继 R_i 到 D 的信道衰落系数为 h_{id} 。假设信道满足互易性,即 $h_{si}=h_{is}$, $h_{id}=h_{di}$ 。各节点处的噪声为高斯噪声,独立同分布,均值为0,方差为 σ^2 ,其中,源节点 S 、中继节点 R_i 和目的节点 D 处的噪声分别表示为 n_s 、 n_i 和 n_d 。

在第一时隙 t_1 ,源节点 S 发送信号 x_s 给 n 个中继,中继 R_i 接收到的信号为:

$$y_{ri} = \sqrt{p_s} h_{si} x_s + n_i \quad (1)$$

其中, p_s 为源节点 S 处的发送功率。

在第二时隙 t_2 ,从 n 个中继中选取最佳中继 R_a ,最佳中继 R_a 将从源节点 S 处接收到的信号解码,解码后的信号为 x_{ra} ,将其转发给目的节点 D ,目的节点 D 接收到的信号为:

$$y_d = \sqrt{p_r} h_{ra} x_{ra} + n_d \quad (2)$$

其中, p_r 为中继节点 R_a 处的发送功率,假设 n 个中继的发送功率相等,均用 p_r 表示。

在第三时隙 t_3 ,目的节点 D 将信号 x_d 发送给 n 个中继,中继 R_i 接收到的信号为:

$$y_{ri} = \sqrt{p_d} h_{di} x_d + n_i \quad (3)$$

其中, p_d 为目的节点 D 处的发送功率。

在第四时隙 t_4 ,从 n 个中继中选取最佳中继 R_b ,最佳中继 R_b 将从目的节点 D 处接收到的信号解码,解码后的信号为 x_{rb} ,将其转发给源节点 S ,源节点 S 接收到的信号为:

$$y_s = \sqrt{p_r} h_{rb} x_{rb} + n_s \quad (4)$$

其中, p_r 为中继节点 R_b 处的发送功率, $E\{x_s^2\}=E\{x_{ri}^2\}=E\{x_d^2\}=1$, $E\{\cdot\}$ 代表期望。

2 中继选择与功率分配的联合优化

源节点 S 到目的节点 D 的可实现传输速率表示为 R_{sd} ,目的节点 D 到源节点 S 的可实现传输速率为 R_{ds} ,选择 R_a 和 R_b 作为最佳中继,根据假设得 $p_{ra}=p_{rb}=p_r$ 。参考文献[15],选择了最佳中继的单向多中继系统端到端的可实现传输速率为:

$$R_{sd} = \min \left\{ \frac{1}{4} \log \left(1 + \frac{p_s |h_{si}|^2}{\sigma^2} \right), \frac{1}{4} \log \left(1 + \frac{p_r |h_{ra}|^2}{\sigma^2} \right) \right\}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

$$R_{ds} = \min \left\{ \frac{1}{4} \log \left(1 + \frac{p_d |h_{di}|^2}{\sigma^2} \right), \frac{1}{4} \log \left(1 + \frac{p_r |h_{rb}|^2}{\sigma^2} \right) \right\}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

其中,设置 $\frac{1}{4}$ 是因为该系统有4个时隙。

参考文献[15],单向中继传输系统的总功率 P_T 表示为:

$$P_T = \frac{P_s}{\zeta_s} + \frac{P_{r_a}}{\zeta_{r_a}} + \frac{P_{r_b}}{\zeta_{r_b}} + \frac{P_d}{\zeta_d} + P_c + P_s = \frac{P_s}{\zeta_s} + 2\frac{P_r}{\zeta_r} + \frac{P_d}{\zeta_d} + P_{ct} + \rho R + P_s \quad (7)$$

其中, $\zeta_s, \zeta_{r_a}, \zeta_{r_b}, \zeta_d$ 分别为源节点 S 、最佳中继 R_a 、最佳中继 R_b 和目的节点 D 的功率放大器效率,均为常数。假设各中继节点的功率放大器效率相等,即 $\zeta_{r_a} = \zeta_{r_b} = \zeta_r$, P_c 为电路功率消耗,且 $P_c = P_{ct} + \rho R$, P_{ct} 为静态功耗, ρR 为动态功耗, ρ 为常数,表示每单位数据传输速率所消耗的功率, R 表示总传输速率, P_s 表示最佳中继选择过程所消耗的功率,为常数。为了简化表示,标记 $P_{jd} = P_T - P_c - P_s$ 。

假设系统带宽为单位带宽,单向多中继传输系统的频谱效率SE用 η_{SE} 表示,其为系统的总传输速率,即:

$$\eta_{SE} = R = R_{sd} + R_{ds} \quad (8)$$

单向多中继传输系统的能量效率EE用 η_{EE} 表示,定义为:

$$\eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}}{P_T} \quad (9)$$

单向多中继传输系统联合中继选择和功率分配的EE优化问题表示为:

$$\max_{P_s, P_r, P_d, a, b} \eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}}{P_T} = \frac{R_{sd} + R_{ds}}{\frac{P_s}{\zeta_s} + 2\frac{P_r}{\zeta_r} + \frac{P_d}{\zeta_d} + P_{ct} + \rho(R_{sd} + R_{ds}) + P_s} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_s \leq P_s^{\max} \quad (11)$$

$$0 \leq P_r \leq P_r^{\max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_d \leq P_d^{\max} \quad (13)$$

$$\eta_{SE} \geq r^{\min} \quad (14)$$

其中,约束条件式(11)~式(13)是传输功率约束, $P_s^{\max}, P_r^{\max}, P_d^{\max}$ 分别为源节点 S 、最佳中继 R_a 和 R_b 、目的节点 D 的最大发射功率。约束条件式(14)是频谱效率约束, r^{\min} 是满足服务质量(Quality of Service, QoS)的最小频谱效率。

EE优化需要解决如下2个问题:

1) 选出最佳中继节点 R_a 和 R_b 。

2) 完成源节点 S 、中继节点 R_i 和目的节点 D 的功率分配。

上述联合优化问题等效为:先对源节点 S 、中继节点 R_i 和目的节点 D 进行最优功率分配,再选出最佳中继节点。优化问题式(10)的功率优化变量有

3个,分别为源节点、中继节点和目的节点的传输功率。为了简化该优化问题,本文引入功率分配因子,各节点的功率分别为:

$$\frac{P_s}{\zeta_s} = uP_{jd} \Rightarrow p_s = u\zeta_s P_{jd} \quad (15)$$

$$\frac{P_d}{\zeta_d} = vP_{jd} \Rightarrow p_d = v\zeta_d P_{jd} \quad (16)$$

$$\frac{P_r}{\zeta_r} = \frac{1}{2}(1-u-v)P_{jd} \Rightarrow p_r = \frac{1}{2}(1-u-v)\zeta_r P_{jd} \quad (17)$$

其中, $0 < u, v < 1, 0 < u+v < 1$ 。

将式(15)~式(17)代入式(5)、式(6)得到:

$$R_{sd} = \min \left\{ \frac{1}{4} \text{lb} \left(1 + \frac{u\zeta_s P_{jd} |h_{sr_i}|^2}{\sigma^2} \right), \frac{1}{4} \text{lb} \left(1 + \frac{(1-u-v)\zeta_r P_{jd} |h_{ra_d}|^2}{2\sigma^2} \right) \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$R_{ds} = \min \left\{ \frac{1}{4} \text{lb} \left(1 + \frac{v\zeta_d P_{jd} |h_{dr_i}|^2}{\sigma^2} \right), \frac{1}{4} \text{lb} \left(1 + \frac{(1-u-v)\zeta_r P_{jd} |h_{rb_s}|^2}{2\sigma^2} \right) \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

同样,为了简化表示,标记:

$$\min \{|h_{sr_i}|^2\} = |h_{sr_c}|^2 \quad (20)$$

$$\min \{|h_{dr_i}|^2\} = |h_{dr_d}|^2 \quad (21)$$

本文目标是实现EE和SE的均衡优化,为了优化SE,令:

$$\frac{u\zeta_s P_{jd} |h_{sr_c}|^2}{\sigma^2} = \frac{(1-u-v)\zeta_r P_{jd} |h_{ra_d}|^2}{2\sigma^2} \quad (22)$$

$$\frac{v\zeta_d P_{jd} |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} = \frac{(1-u-v)\zeta_r P_{jd} |h_{rb_s}|^2}{2\sigma^2} \quad (23)$$

优化问题能够被求解需要满足约束条件 $R_{sd} = R_{ds}$,联合式(22)、式(23)求出功率分配因子 u 和 v 之间的关系,进一步求得:

$$v = \max \left\{ \frac{\zeta_r |h_{ra_d}|^2}{2\zeta_d |h_{dr_d}|^2 + \zeta_r |h_{ra_d}|^2 + \frac{\zeta_d |h_{dr_d}|^2 \zeta_r |h_{ra_d}|^2}{\zeta_s |h_{sr_c}|^2}}, \frac{\zeta_r |h_{rb_s}|^2}{2\zeta_d |h_{dr_d}|^2 + \zeta_r |h_{rb_s}|^2 + \frac{\zeta_d |h_{dr_d}|^2 \zeta_r |h_{rb_s}|^2}{\zeta_s |h_{sr_c}|^2}} \right\} \quad (24)$$

当满足式(24)时,单向多中继传输系统的SE取最大值,此时,在最优功率分配下SE的最优值 η_{SE}^* 为:

$$\eta_{SE}^* = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{v\zeta_d P_{jd} |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (25)$$

其中, v 满足式(24)。

在最优功率分配下,优化问题式(10)转换为:

$$\max_{P_{jd}} \eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}^*}{P_T} = \frac{\frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d P_{jd} |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right)}{P_{jd} + P_{ct} + \rho \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d P_{jd} |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right) + P_s} \quad (26)$$

$$\text{s.t. 式 (24)} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{jd} \leq P_{jd}^{\max} \quad (28)$$

$$\eta_{SE}^* \geq r^{\min} \quad (29)$$

$$\text{其中, } P_{jd}^{\max} = \frac{P_s^{\max}}{\zeta_s} + 2 \frac{P_r^{\max}}{\zeta_r} + \frac{P_d^{\max}}{\zeta_d}。$$

通过约束条件,求出 P_{jd} 的取值范围为 $[(2^{2r^{\min}} - 1) \cdot \frac{\sigma^2}{v \zeta_d |h_{dr_d}|^2}, P_{jd}^{\max}]$, 在该范围内,通过 η_{EE} 对 P_{jd} 求导,对比较值与边界值,可以得出最大值 η_{EE}^{\max} 。具体步骤如下:

1) 通过 η_{EE} 对 P_{jd} 求导,寻找区间 $[(2^{2r^{\min}} - 1) \cdot \frac{\sigma^2}{v \zeta_d |h_{dr_d}|^2}, P_{jd}^{\max}]$ 上的驻点及对应的极值,极值满足 $\frac{\partial \eta_{EE}}{\partial P_{jd}} = 0$ 。求出的驻点为:

$$P_{jd}^* = \frac{e^{(1 + \ln \sigma^2)} e^{\frac{w \left(\frac{(P_{ct} + P_s) (v \zeta_d |h_{dr_d}|^2 - \sigma^2)}{e^{1 + \ln \sigma^2}} \right)}{v \zeta_d |h_{dr_d}|^2}}}{v \zeta_d |h_{dr_d}|^2}$$

其中, $w(\cdot)$ 为朗伯函数。

2) 计算 η_{EE} 在边界点上的取值。

3) 对比较值和边界点取值,两者中取值较大的即为最优解。

假设步骤1)获得了最终的最优解,标记为 \hat{P}_{jd}^* , 将其代入式(26),可以得出:

$$\eta_{EE}^{\max} = \frac{\frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d \hat{P}_{jd}^* |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right)}{P_{jd} + P_{ct} + \rho \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d \hat{P}_{jd}^* |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right) + P_s} \quad (30)$$

此时最优解中 a, b 仍是未知的,比较不同中继的最佳EE值,可以选出最优中继,如下:

$$a = \operatorname{argmax}_{i=\{1, 2, \dots, n\}} \eta_{EE}^{\max} = \frac{\frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d \hat{P}_{jd}^* |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right)}{P_{jd} + P_{ct} + \rho \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d \hat{P}_{jd}^* |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right) + P_s} \quad (31)$$

$$\text{其中, } v = \frac{\zeta_r |h_{ris}|^2}{2 \zeta_d |h_{dr_d}|^2 + \zeta_r |h_{ris}|^2 + \frac{\zeta_d |h_{dr_d}|^2 \zeta_r |h_{ris}|^2}{\zeta_s |h_{sr_c}|^2}}。$$

$$b = \operatorname{argmax}_{i=\{1, 2, \dots, n\}} \eta_{EE}^{\max} =$$

$$\operatorname{argmax}_{i=\{1, 2, \dots, n\}} \frac{\frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d \hat{P}_{jd}^* |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right)}{P_{jd} + P_{ct} + \rho \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{v \zeta_d \hat{P}_{jd}^* |h_{dr_d}|^2}{\sigma^2} \right) + P_s} \quad (32)$$

$$\text{其中, } v = \frac{\zeta_r |h_{ris}|^2}{2 \zeta_d |h_{dr_d}|^2 + \zeta_r |h_{ris}|^2 + \frac{\zeta_d |h_{dr_d}|^2 \zeta_r |h_{ris}|^2}{\zeta_s |h_{sr_c}|^2}}。$$

联合优化的实现步骤为:

- 1) 根据式(31)和式(32)选出最优中继。
- 2) 根据式(15)~式(17)以及优化问题式(26)完成功率分配。

3 仿真结果与分析

本文采用 MATLAB 进行仿真实验,在单向多中继网络中,设置不同的平均信噪比和不同的节点之间相对位置,将本文所提中继选择与功率分配联合优化方法与现有优化方法进行性能对比,对比方法包括最佳中继等功率分配、随机中继等功率分配和仅最优功率分配3种方法。各节点处功率放大器效率的合理范围为0.311~0.388^[21],因此,将 ζ_s, ζ_r 和 ζ_d 均设置为0.35。仿真相关参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters setting

参数	参数值
信道带宽 W/Hz	1
噪声功率 σ^2/W	1
路径损耗衰减因子 v	4
源节点和目的节点距离 d_{sr}	1
电路功率(静态) P_{ct}/W	0.5
电路功率动态因子 $\rho/(\text{W} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.2
中继选择功耗 P_s/W	0.1
各节点功率放大系数	0.35
中继数量 n	3
各节点功率上限/ W	0.875
频谱效率下限 $r^{\min}/(\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.2

图2所示为各节点的相对位置,考虑一个包含3个中继节点的多中继网络,为便于分析,用坐标来表示各个节点的位置,源节点 S 的位置坐标为(0, 0.5),目的节点 D 的位置坐标为(1, 0.5),3个中继节点 R_1, R_2 和 R_3 的位置坐标分别为 $(x, 0.5)$ 、 $(x, 0.25)$ 和 $(x, 0)$ 。

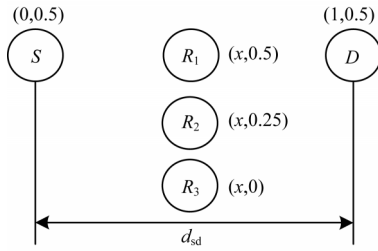


图2 节点位置部署示意图

Fig.2 Schematic diagram of nodes location deployment

图3所示为系统EE与平均信噪比的关系。设置中继节点的横坐标 $x=0.6$,从图3可以看出,当平均信噪比增大时,系统EE先增大后减小,且存在一个最大值,平均信噪比和节点总功率呈线性关系,即存在一个最优的节点总功率使EE达到最大,与理论分析一致。

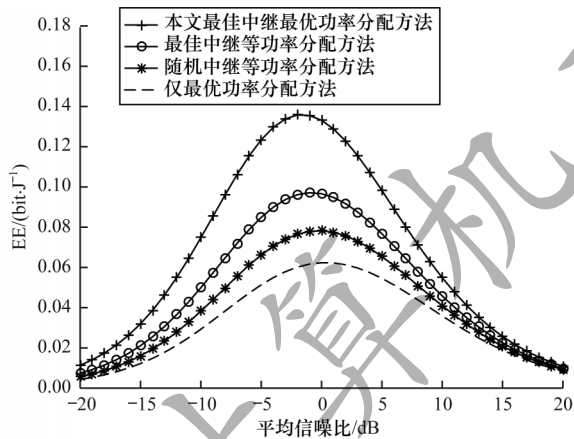


图3 系统EE与平均信噪比的关系

Fig.3 Relationship between system EE and average SNR

图4所示为系统SE与平均信噪比的关系。从图4可以看出,当平均信噪比增大时,SE一直增大,即SE会随着节点总功率的增大而增大。

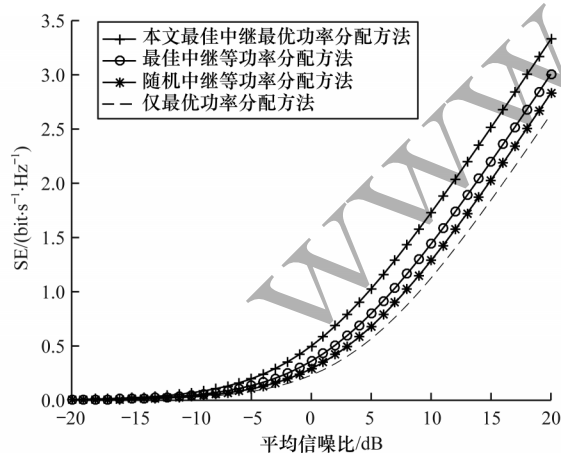


图4 系统SE与平均信噪比的关系

Fig.4 Relationship between system SE and average SNR

从上述实验结果可以看出,本文中中继选择与功率分配联合优化方法可以达到最优的分配性能,最

佳中继等功率分配方法次之,仅最优功率分配方法性能最差。

图5所示为不同中继位置情况下单向多中继系统的EE随SE的变化情况。从图5可以看出,随着SE的增大,EE先增大后减小,当中继节点距离源节点越近时,EE越高。EE和SE之间的关系表明,当增大节点总功率时,SE会增大,但是超过最优节点总功率时,EE会减小,此时虽然改善了SE但是损失了EE,若要系统最优,则通常会损失一些SE来优化EE。

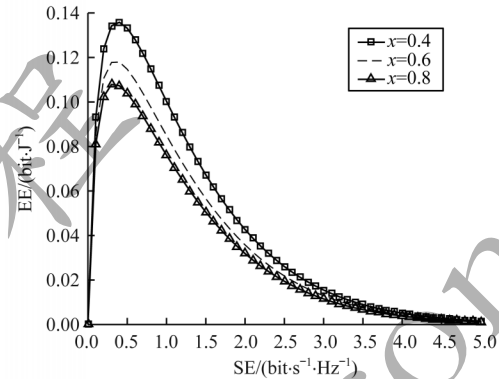


图5 不同中继位置情况下EE和SE的关系

Fig.5 Relationship between EE and SE under different relay locations

图6和图7所示分别为单向多中继系统各节点相对位置不同情况下的EE和SE。将中继网络中源节点S和目的节点D的位置固定,3个中继节点 R_1 、 R_2 和 R_3 的位置为变量,分别表示为 $(x,0.5)$ 、 $(x,0.25)$ 和 $(x,0)$ 。当 x 改变时,中继节点与源节点和目的节点之间的相对位置会发生改变。从图6和图7可以看出,在本文中中继选择与功率分配联合优化方法下,当中继从源节点和目的节点的中间向两端移动时,EE和SE均先增大后减小,并且中继选择与功率分配联合优化方法下的EE和SE,总是优于最佳中继等功率分配、随机中继等功率分配以及仅最优功率分配3种方法下的EE和SE。

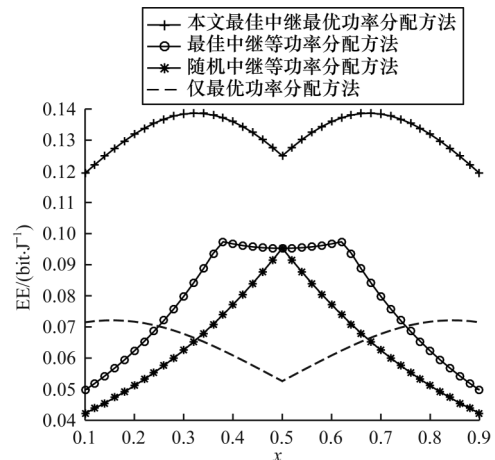


图6 系统EE与中继位置的关系

Fig.6 Relationship between system EE and relay locations

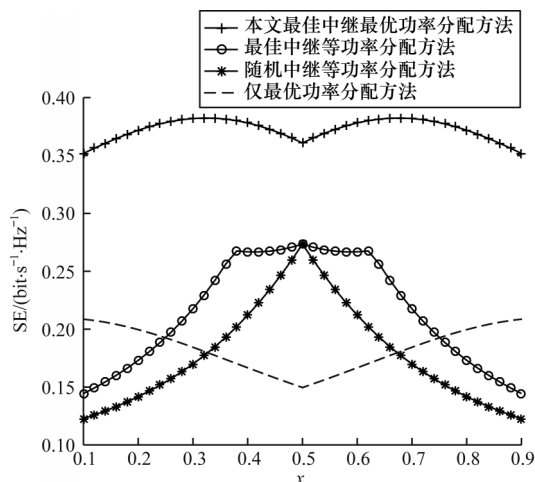


图7 系统SE与中继位置的关系

Fig.7 Relationship between system SE and relay locations

4 结束语

本文研究解码转发单向多中继网络,提出一种中继选择与功率分配的联合优化方法,通过最优功率分配和最佳中继选择实现EE和SE的均衡优化。实验结果表明,相比最佳中继等功率分配、随机中继等功率分配以及仅最优功率分配3种方法,该方法能够有效提高系统的EE和SE。下一步将研究解码转发全双工多中继系统EE和SE的均衡优化问题,通过节点发射功率与中继选择的迭代优化方法实现系统的EE和SE最大化。

参考文献

- [1] YANG Jie, CHEN Rui, GUO Lihong, et al. Energy efficiency analysis and optimization for decode-and-forward relay transmission system[J]. Computer Engineering, 2017, 43(2): 163-170. (in Chinese)
杨洁,陈瑞,郭丽红,等. 解码转发中继传输系统能量效率的分析与优化[J]. 计算机工程, 2017, 43(2): 163-170.
- [2] CHEN H, LI G, CAI J. Spectral-energy efficiency tradeoff in full-duplex two-way relay networks[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 583-592.
- [3] TIAN Jiaqiang, CHEN Yong, ZHANG Jianzhao, et al. Trade-off analysis of spectral efficiency and energy efficiency in cognitive radio[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 136-140, 145. (in Chinese)
田家强,陈勇,张建照,等. 认知无线电中频谱效率与能量效率的折中分析[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 136-140, 145.
- [4] SINGH K, KU M, YU C. Joint subcarrier pairing and power allocation for achieving energy-efficient decode-and-forward relay networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [5] CUI Qimei, ZHANG Yuhao, NI Wei, et al. Energy efficiency maximization of full-duplex two-way relay with non-ideal power amplifiers and non-negligible circuit power[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 6264-6278.
- [6] CUI Qimei, YUAN Tianpeng, TAO Xiaofeng, et al. Energy efficiency analysis of two-way DF relay system with non-ideal power amplifiers[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1254-1257.
- [7] NGUYEN V, NGUYEN H V, NGUYEN C T, et al. Spectral efficiency of full-duplex multi-user system: beamforming design, user grouping, and time allocation[J]. IEEE Access, 2017, 5: 5785-5797.
- [8] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(9): 3074-3085.
- [9] CHEN Z, QUEK T Q S, LIANG Y. Spectral efficiency and relay energy efficiency of full-duplex relay channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(5): 3162-3175.
- [10] CHEN Z, QUEK T Q S, LIANG Y. On the spectral efficiency and relay energy efficiency of full-duplex relay channel[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [11] QINGQUAN L, YINJUN L, XUEFEI Z, et al. Tradeoff between energy efficiency and spectral efficiency in two-way relay network[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communication Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 929-934.
- [12] KHALIL M I, BERBER S M, SOWERBY K W. Energy efficiency and spectrum efficiency balance of wireless relay networks[C]//Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Communication Software and Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 397-401.
- [13] KHALIL M I, BERBER S M, SOWERBY K W. Energy efficiency and spectrum efficiency trade-off over optimal relay location in bidirectional relay networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 298-302.
- [14] KHALIL M I, BERBER S M, SOWERBY K W. Energy-efficient design for combined relay selection and power allocation AF-relay network[C]//Proceedings of the 20th Asia-Pacific Conference on Communication. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 417-422.
- [15] SHEN Hong, HE Zhenyao, XU Wei, et al. Is full-duplex relaying more energy efficient than half-duplex relaying?[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 841-844.
- [16] YUAN Jingzhen. Joint relay selection and antenna selection optimization algorithm based on DF relay strategy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 184-189. (in Chinese)
袁静珍. 基于DF中继策略的联合天线选择和中继选择优化算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 184-189.

(下转第196页)

(上接第 187 页)

- [17] WANG Mingwei, ZHANG Huisheng, LI Lixin, et al. Cooperative communication system with directional antennae and opportunistic DF strategy [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(13): 74-81. (in Chinese)
王明伟, 张会生, 李立欣, 等. 基于定向天线和机会中继的节点解码转发协作通信系统性能分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 74-81.
- [18] JI Shilong, GUO Hui, MA Changdong, et al. Performance analysis of cognitive decode-and-forward system based on best relay selection [J]. Computer Engineering, 2015, 41(7): 153-156. (in Chinese)
姬士龙, 郭辉, 马长栋, 等. 基于最佳中继选择的认知译码转发系统性能分析[J]. 计算机工程, 2015, 41(7): 153-156.

- [19] YANG Jie, RUI Xiongli, CAO Xuehong. Improved decode-and-forward multihop relay system and optimal power allocation [J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 82-86. (in Chinese)
杨洁, 芮雄丽, 曹雪虹. 改进的解码转发多跳中继系统及最优功率分配[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 82-86.
- [20] ZAPPONE A, ATAPATTU S, RENZO M D, et al. Energy-efficient relay assignment and power control in multi-user and multi-relay networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(6): 1070-1073.
- [21] SHUGUANG C, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-constrained modulation optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5): 2349-2360.

编辑 吴云芳