

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.006

引用格式: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 Li-yuan, QIN Lian, XIAO Hai-lin, LI Min-zheng. Power Allocation for Two Relays Cooperative Communication[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(2):145-150.]

双中继协作通信的功率分配改进方案*

王丽元**,覃莲,肖海林,李民政

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

摘要:为克服信息处于深度衰落情况下单中继协作困难,减少多中继协作目的端信号处理的复杂度,给出了双中继节点参与协作通信的功率分配方案。两个中继节点分别采用放大转发(AF)、译码转发(DF)以及混合译码放大转发(HDAF)3种协作方式进行通信。在满足一定的中断概率和节点功率限制情况下,利用MATLAB软件中的Fmincon优化函数,得到了各节点的最小发射功率。数值分析表明,在相同条件下,两个中继节点采用HDAF协作方式比采用AF协作方式、DF协作方式消耗的系统总功率分别少4~9 dBm、0.5~1 dBm,最大限度地节约了系统功率的消耗。

关键词:协作通信;功率分配;中断概率;双中继协作

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0145-06

Power Allocation for Two Relays Cooperative Communication

WANG Li-yuan, QIN Lian, XIAO Hai-lin, LI Min-zheng

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To overcome the difficulty of single relay cooperative communication in deep fading channels and reduce the complexity of destination signal processing for multi-relay cooperative communication, power allocation scheme for two relays cooperative communication is proposed. Amplify-and-forward (AF) strategy, decode-and-forward (DF) strategy and hybrid decode-amplify-and-forward (HDAF) strategy for two relays are investigated, respectively. Under certain outage probability and power constraint, minimum powers for nodes are obtained through the Fmincon function embedded in MATLAB. Numerical results show that, in the same condition, as compared with AF and DF, the proposed two-relay HDAF strategy can save total power up to 4~9 dBm and 0.5~1 dBm respectively, and minimize the total power consumption.

Key words: cooperative communication; power allocation; outage probability; two relays cooperative

1 引言

协作通信中单天线移动用户彼此共享天线资源协作发送信息,形成虚拟的MIMO^[1]系统,有效地提高了系统的有效性和可靠性。协作传输过程使用单

个中继节点,接收端的硬件简单易于实现,并且没有损失分集阶数。然而,单个节点的处理能力和功率是有限的,当信道处于深度衰落的情况下,单个中继节点无法完成用户服务质量(QoS)的需求。采用多

* 收稿日期:2013-09-03;修回日期:2013-12-04 Received date:2013-09-03;Revised date:2013-12-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2008CB317109);国家自然科学基金资助项目(61261018, 61362007);广西自然科学基金重点项目(2011GXNSFD018028);广西科学基金资助项目(桂科自0991241);广西无线宽带通信与信号处理重点实验室2012年度主任基金项目(12111)

Foundation Item: The National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program)(2008CB317109); The National Natural Science Foundation of China(No. 61261018, 61362007); The Natural Science Foundation of Guangxi(2011GXNSFD018028); Guangxi Science Foundation(0991241); The Opening Project of Guangxi Key Lab of Wireless Wideband Communication and Signal Processing(12111)

** 通讯作者:wly_0910@163.com Corresponding author:wly_0910@163.com

个中继节点进行协作通信,提高了系统的性能增益,然而系统的信令开销会随之增加,频谱效率也会降低^[2]。

根据中继节点对信息的处理方式不同,协作通信中最基本的协作方式包括放大转发(Amplify-and-Forward, AF)和译码转发(Decode-and-Forward, DF)。中继节点采用 AF 协作方式,信令开销及复杂度较低,然而中继节点在放大有用信号的同时也放大了噪声,造成系统性能的下降^[3]。采用 DF 协作方式,中继节点往往对信号进行非线性变换,将源节点信息解码后重新编码转发,有效地提高了系统的可靠性,然而中继节点译码错误会造成错误的传播^[4]。根据源与中继链路的信道质量,中继节点选择最优的协作方式可以有效地改善系统性能。在协作传输过程中,当中继节点正确译码源节点信息时,采用 DF 协作方式最优,否则,采用 AF 方式要优于直接传输方式^[5]。为了最大程度提高系统性能,联合 AF 方式和 DF 方式构成混合译码放大转发方式进行协作通信,既可以通过 AF 协作方式获得分集增益,又可以通过 DF 协作方式获得编码增益。

协作通信系统中源节点和中继节点发送信息都要消耗功率,由协作传输获得的分集增益是以消耗源节点和中继节点的功率为代价的。传统采用的等功率分配方案并不能最大程度利用节点的功率^[6],因此,研究协作通信中的功率分配方案,在提高通信质量的同时降低节点的功率消耗显得尤为重要。文献[7]研究了基于 AF 转发协议的中继选择准则,并给出了以总功率为约束条件下的最优功率分配方案。在最优功率分配方案下,系统的误码率显著下降,性能得到了提升。文献[8]研究了多用户 DF 协作网络的中继选择和最优功率分配方案。随着中继节点数的增加,采用基于增强冗余的协作分集编码合并技术消耗的总功率会明显增加。文献[9]分析了多中继 AF、DF 网络联合考虑中继节点数和中继位置的最优功率分配方案。在低信噪比区域,多个中继节点参与协作传输会降低系统性能,只有当信噪比增大到一定程度,多中继协作传输才能改善系统性能。文献[10]提出了 DF 协作网络中的最优功率分配方案,首先对源节点分配一定的功率,然后将剩余的功率平均分配给所有的中继节点。该文献采用多中继进行协作传输,系统性能略优于选择最优中继进行协作传输的系统性能。然而,在多中继协作传输过程中,目的端的处理复杂度会明显增加。文献[11]研究了两步双向中继网络中,以最大化最

小用户信噪比为准的功率分配和中继选择方案,中继节点采用不同的权重系数对两个用户的信息进行 AF。在功率分配时,由于没有对权重系数进行全局优化造成了系统性能的下降。以上文献都是针对 AF、DF 协作网络的功率分配进行研究,对于采用混合译码放大转发(Hybrid Decode-Amplify-and-Forward, HDAF)协作通信功率分配的研究较少。

综合考虑 AF 和 DF 协作方式的优缺点以及目的端的信号处理复杂程度,本文分析两个中继节点采用 AF、DF 以及 HDAF(一个中继节点采用 AF 协作方式,另一个中继节点采用 DF 协作方式)协作方式的系统性能,在满足一定中断概率条件和节点功率受限的情况下,进行功率分配,达到最小化系统总功率的目的。

2 系统模型

半双工模式的双中继协作通信系统模型如图 1 所示,系统中包含一个源节点、两个中继节点 R_1 和 R_2 、一个目的节点 D 。假设所有信道服从相互独立的平坦瑞利衰落分布,各节点已知信道状态信息,用户通过正交信道发送信息,且节点间理想同步。

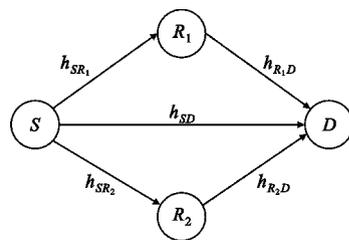


图 1 双中继协作通信系统模型

Fig. 1 Two relays cooperative communication system model

协作通信过程分为两个阶段:第 1 阶段,即第一时隙内,源节点广播信息,目的节点和两个中继节点接收到的信息分别为

$$y_{SD} = \sqrt{P_S} h_{SD} x + n_{SD} \quad (1)$$

$$y_{SR_1} = \sqrt{P_S} h_{SR_1} x + n_{SR_1} \quad (2)$$

$$y_{SR_2} = \sqrt{P_S} h_{SR_2} x + n_{SR_2} \quad (3)$$

第 2 阶段,两个中继节点在后续两个时隙内分别转发源节点信息,此时分 3 种协作方式对源节点信息进行转发。

(1) 两个中继节点均采用 AF 协作方式

$$y_{AF_1} = h_{R_1D} \beta_1 y_{SR_1} + n_{R_1D} \quad (4)$$

$$y_{AF_2} = h_{R_2D} \beta_2 y_{SR_2} + n_{R_2D} \quad (5)$$

(2) 两个中继节点均采用 DF 协作方式

$$y_{DF_1} = \sqrt{P_{R_1}} h_{R_1D} \hat{x} + n_{R_1D} \quad (6)$$

$$y_{DF_2} = \sqrt{P_{R_2}} h_{R_2D} \hat{x} + n_{R_2D} \quad (7)$$

(3) 两个中继节点采用 HDAF 协作方式 (中继节点 R_1 采用 AF 协作方式, 中继节点 R_2 正确译码源节点信息时采用 DF 协作方式, 否则转换为直接传输方式, 由于两个中继节点相互独立, 采用的协作方式可以互换, 分析方法相同)

$$y_{HDAF_1} = h_{R_1D} \beta y_{SR_1} + n_{R_1D} \quad (8)$$

$$y_{HDAF_2} = \sqrt{P_{R_2}} h_{R_2D} \hat{x} + n_{R_2D} \quad (9)$$

式中, \hat{x} 表示采用 DF 协作方式时中继节点转发给目的节点的信息。信道增益 h_{ij} ($i \in \{S, R_1, R_2\}, j \in \{R_1, R_2, D\}$) 是服从均值为 0、方差为 Ω_{ij} 的复高斯随机变量; 信道噪声 n_{ij} 是服从均值为 0、方差为 N_0 的加性复高斯白噪声; P_S, P_{R_1} 和 P_{R_2} 分别表示源节点和两个中继节点的发射功率; β 为中继节点采用 AF 协作方式时的放大增益因子,

$$\beta_i \leq \sqrt{\frac{P_{R_i}}{P_S |h_{SR_i}|^2 + N_0}}, \quad i \in \{1, 2\} \quad (10)$$

目的节点采用最大比合并 (MRC) 技术处理接收的信息。在直传链路 (S-D)、采用 AF 和 DF 协作方式的两条中继链路中, 目的节点的接收信噪比分别为

$$\gamma_{SD} = \frac{P_S |h_{SD}|^2}{N_0} \quad (11)$$

$$\gamma_{AF} = f\left(\frac{P_S |h_{SR_1}|^2}{N_0}, \frac{P_{R_1} |h_{R_1D}|^2}{N_0}\right) \quad (12)$$

$$\gamma_{DF} = \frac{P_{R_2} |h_{R_2D}|^2}{N_0} \quad (13)$$

式(12)中, $f(x, y)$ 是 2 个满足指数分布随机变量的调和函数, 且满足

$$f(x, y) = \frac{xy}{x+y+1} \quad (14)$$

在高信噪比下, $f(x, y)$ 是一个近似的指数分布随机变量^[12]。

3 中断概率分析

中断概率是衡量无线通信系统性能的重要标准之一。为了在满足用户 QoS 要求的同时降低系统的发射功率, 双中继协作通信的功率分配方案是在中断概率小于某一特定值, 节点功率受限的情况下, 对各节点进行合理地功率分配, 实现最小化系统总功率的目标。

(1) 双中继协作基于 AF 协作方式

在协作传输过程中, 两个中继节点均采用 AF 协作方式中继源节点信息, 源与目的节点的最大互信息量为

$$I_{AF} = \frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{AF_1} + \gamma_{AF_2}) \quad (15)$$

式中, $\gamma_{AF_1}, \gamma_{AF_2}$ 分别表示采用 AF 协作方式的两条中继链路的信噪比。协作传输的互信息量为

$$I_{\text{coop}} = \frac{1}{M+1} \text{lb}(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{\text{coop}})$$

其中, M 为中继节点个数。本文为双中继协作通信, 故系数取 1/3。

当源与目的节点的最大互信息量小于给定频谱利用率 R 时, 系统发生中断。系统的中断概率为

$$\begin{aligned} P_{AF}^{\text{out}} &= \Pr\{I_{AF} < R\} = \\ &\Pr\left\{\frac{P_S |h_{SD}|^2}{N_0} + f\left(\frac{P_S |h_{SR_1}|^2}{N_0}, \frac{P_{R_1} |h_{R_1D}|^2}{N_0}\right) + \right. \\ &\left. f\left(\frac{P_S |h_{SR_2}|^2}{N_0}, \frac{P_{R_2} |h_{R_2D}|^2}{N_0}\right) < 2^{3R} - 1\right\} = \\ &\frac{g(R)}{3P_S \Omega_{SD}} \left(\frac{1}{P_S \Omega_{SR_1}} + \frac{1}{P_{R_1} \Omega_{R_1D}}\right) \left(\frac{1}{P_S \Omega_{SR_2}} + \frac{1}{P_{R_2} \Omega_{R_2D}}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $g(R) = [(2^{3R} - 1)N_0]^3$ 。

(2) 双中继协作基于 DF 协作方式

双中继采用 DF 进行协作通信时, 系统发生中断有 4 种情况: 第一, 两个中继节点都正确译码源节点信息而采用 DF 协作方式, 目的节点不能正确译码源节点和中继节点的信息; 第二, R_1 正确译码源节点信息采用 DF 协作方式, R_2 错误译码源节点信息采用直接传输方式, 目的节点不能正确译码两阶段接收到的信息; 第三, 与第一种情况相反; 第四, 两个中继节点都错误译码源节点信息转化为直接传输方式, 目的节点不能正确译码源节点发送的信息。在第一阶段的信息传输过程中, 中继节点正确译码源节点的概率为

$$\begin{aligned} P_{c_i} &= \Pr\left\{\frac{1}{3} \text{lb}\left(1 + \frac{P_S |h_{SR_i}|^2}{N_0}\right) > R\right\} = \\ &\exp\left[-\frac{(2^{3R} - 1)N_0}{P_S \Omega_{SR_i}}\right], \quad i \in \{1, 2\} \end{aligned} \quad (17)$$

则系统的中断概率可表示为

$$\begin{aligned} P_{DF}^{\text{out}} &= (1 - P_{c_1})(1 - P_{c_2}) \Pr\left\{\frac{1}{3} \text{lb}(1 + 3\gamma_{SD}) < R\right\} + \\ &(1 - P_{c_1})P_{c_2} \Pr\left\{\frac{1}{3} \text{lb}(1 + 2\gamma_{SD} + \gamma_{DF_2}) < R\right\} + \end{aligned}$$

$$P_{c_1}(1-P_{c_2})\Pr\left\{\frac{1}{3}\text{lb}(1+2\gamma_{SD}+\gamma_{DF_1})<R\right\} + P_{c_1}P_{c_2}\Pr\left\{\frac{1}{3}\text{lb}(1+\gamma_{SD}+\gamma_{DF_1}+\gamma_{DF_2})<R\right\} \quad (18)$$

在高信噪比下,有如下等式成立^[5]:

$$1-\exp\left(-\frac{(2^{3R}-1)N_0}{P_S\Omega_{SR_i}}\right) \approx \frac{(2^{3R}-1)N_0}{P_S\Omega_{SR_i}} \quad (19)$$

$$\exp\left(-\frac{(2^{3R}-1)N_0}{P_S\Omega_{SR_i}}\right) \approx 1 \quad (20)$$

将式(20)和(21)代入式(19)可以得到

$$P_{DF}^{\text{out}} = \frac{g(R)}{4P_S^2\Omega_{SD}}\left(\frac{1}{P_{R_1}\Omega_{SR_2}\Omega_{R_1D}} + \frac{1}{P_{R_2}\Omega_{SR_1}\Omega_{R_2D}}\right) + \frac{g(R)}{3P_S^3\Omega_{SD}\Omega_{SR_1}\Omega_{SR_2}} + \frac{g(R)}{6P_S P_{R_1} P_{R_2}\Omega_{SD}\Omega_{R_1D}\Omega_{R_2D}} \quad (21)$$

(3) 双中继协作基于 HDAF 协作方式

在双中继 HDAF 协作通信系统中,中继节点 R_1 采用 AF 协作方式,中继节点 R_2 正确译码源节点信息时采用 DF 协作方式,否则转换为直接传输方式。系统的中断概率为

$$P_{HDAF}^{\text{out}} = P_{c_2}\Pr\left\{\frac{1}{3}\text{lb}(1+\gamma_{SD}+\gamma_{AF_1}+\gamma_{DF_2})<R\right\} + (1-P_{c_2})\Pr\left\{\frac{1}{3}\text{lb}(1+2\gamma_{SD}+\gamma_{AF_1})<R\right\} = \frac{g(R)}{P_S\Omega_{SD}}\left(\frac{1}{P_S\Omega_{SR_1}} + \frac{1}{P_{R_1}\Omega_{R_1D}}\right) \cdot \left(\frac{1}{4P_S\Omega_{SR_2}} + \frac{1}{6P_{R_2}\Omega_{R_2D}}\right) \quad (22)$$

式中, P_{c_2} 表示节点 R_2 正确译码源节点信息的概率。

4 功率分配方案

协作通信通过资源共享来改善通信质量。如果对源节点和中继节点分配相等的功率,实现比较简单,但是由于信道的时变性,不同的信道质量会对系统性能产生不同的影响,采用等功率分配不能有效地利用节点的发射功率。因此,有必要对节点的发射功率进行分配,提高资源利用率。双中继协作通信功率分配方案的约束问题为

$$[P_S^*, P_{R_1}^*, P_{R_2}^*] = \arg \min_{[P_S, P_{R_1}, P_{R_2}]} (P_S + P_{R_1} + P_{R_2}) \quad (23)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} P_{\text{coop}}^{\text{out}} \leq \eta \\ 0 \leq P_k \leq P_{\text{max}} \end{cases}, \quad k \in \{S, R_1, R_2\} \quad (24)$$

其中, η 为满足系统中断概率要求的上限, $P_{\text{coop}}^{\text{out}}$ 表示协作通信的中断概率, P_{max} 表示节点的最大功率值。由于目标函数是一个凸函数,约束条件构成了一个

凸集,而且各节点分配的功率必须为非负数,因此式(23)存在最优解。解决凸优化问题最直接的方法就是采用 Lagrange 数乘法,则最优化问题表示为

$$L(P_S, P_{R_1}, \lambda) = P_S + P_{R_1} + P_{R_2} + \lambda(P_{\text{coop}}^{\text{out}} - \eta) \quad (25)$$

其中, λ 为拉格朗日算子 ($\lambda \geq 0$)。根据 KKT^[13] (Karush-Kuhn-Tucker) 最优化条件可得式(25)的二阶导数 $\partial^2 L(P_S, P_{R_1}, \lambda) / \partial P_S^2 > 0$, 则目标函数在 $[0, P_{\text{max}}]$ 上连续,且为凸函数。因此,目标函数存在最优解。相应的最优解决方案需要满足以下方程:

$$\frac{\partial L(P_S, P_{R_1}, \lambda)}{\partial P_S} = \frac{\partial L(P_S, P_{R_1}, \lambda)}{\partial P_{R_1}} = \frac{\partial L(P_S, P_{R_1}, \lambda)}{\partial P_{R_2}} = 0 \quad (26)$$

$$\lambda(P_{\text{out}}^{\text{opt}} - \eta) = 0 \quad (27)$$

5 数值分析

通过数值分析,对比 3 种协作传输方式的功率分配情况。在满足用户中断概率要求和节点功率限制的情况下,借助 MATLAB 优化工具箱,采用 Fmincon 函数来计算求解,分别得到 3 种协作方式各节点的功率和系统的总功率,降低了运算复杂度,并分析信道系数对 HDAF 协作方式总功率的影响。

图 2 对比了双中继节点采用 AF、DF 和 HDAF 协作方式时中断概率对源节点功率的影响。各节点的最大发射功率为 $P_{\text{max}} = 35$ dBm, 中断概率变化范围 η 为 0.005 ~ 0.05, 信道系数分别设置为 $\Omega_{SD} = 1$, $\Omega_{SR_1} = 5$, $\Omega_{R_1D} = 2$, $\Omega_{SR_2} = 3$, $\Omega_{R_2D} = 4$, 频谱利用率 $R = 1$ b/s · Hz⁻¹。从图 2 可以看出,随着中断概率的增大,各协作方式源节点的发射功率逐渐减少。当中断概率为 0.005 时,采用 3 种协作方式源节点的发射功率分别为 28.9 dBm、26.2 dBm、25.1 dBm。

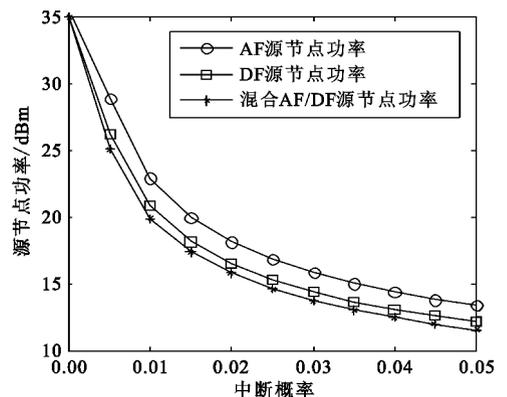


图 2 源节点功率随中断概率的变化情况

Fig. 2 Source node power changes with outage probability

图 3 描述了 3 种协作方式中继节点的功率分配情况。从图 3 可以看出,中继节点 R_1 采用 DF 协作方式时消耗的功率最少,其次是采用 HDAF 协作方式,采用 AF 协作方式消耗的功率最多。中继节点 R_2 采用 HDAF 协作方式时消耗的功率最少,采用 DF 协作方式消耗的功率低于 AF 协作方式消耗的功率。

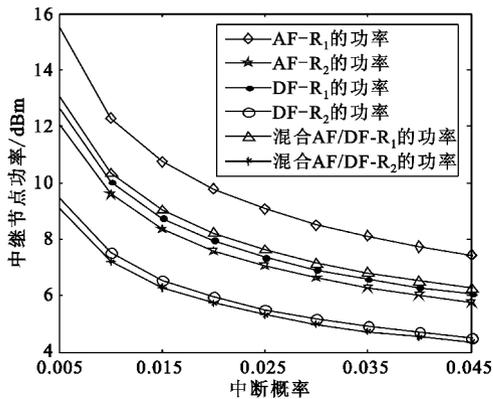


图 3 中继节点功率分配情况

Fig. 3 Distribution of relay node power

图 4 对比了 3 种协作方式的总功率变化情况。从图 4 可以看出,3 种协作方式消耗的系统总功率随着中断概率的增大而减少。两个中继节点采用 HDAF 协作方式消耗的系统总功率最少,采用 DF 协作方式消耗的系统总功率比 AF 协作方式消耗的总功率少。当中断概率为 0.02 时,两个中继节点采用 HDAF、DF 和 AF 方式进行协作通信,消耗的系统总功率分别为 29.8 dBm、30.5 dBm、35.6 dBm。采用 HDAF 协作方式降低了系统功率的消耗。

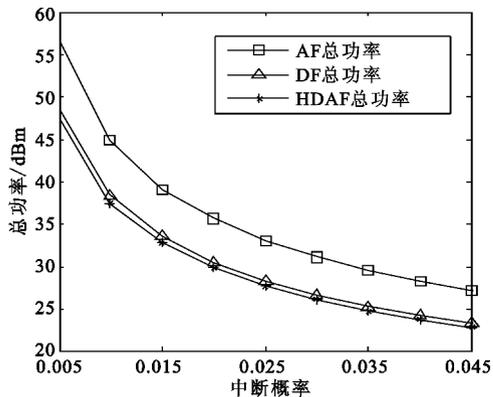


图 4 3 种协作方式消耗的总功率情况

Fig. 4 The total power consumption of three cooperation approaches

不同的信道系数对系统消耗的总功率也会产生影响,图 5 分析了不同信道条件下两个中继节点采用 HDAF 协作方式时,系统的总功率变化情况。从图 5 可以看出,增大 $S-R_1-D$ 链路的信道系数,系统消耗

的总功率减少较大。当中断概率为 0.02 时,在 3 种不同的信道系数下,采用 HDAF 协作方式消耗的系统总功率分别为 29.76 dBm、27.39 dBm、23.02 dBm。

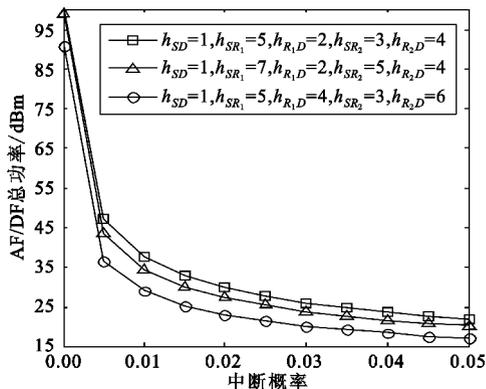


图 5 信道系数对 HDAF 协作方式总功率的影响
Fig. 5 Channel coefficient for total power of HDAF

6 结束语

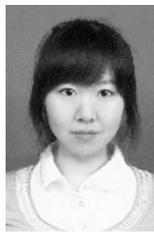
本文分析了双中继协作通信系统的功率分配方案。在满足中断概率要求和节点发射功率受限的情况下,为各节点分配最小的发射功率,使得系统消耗的总功率最小。在相同条件下,两个中继采用 HDAF 协作方式比采用 AF 协作方式消耗的总功率少 4 ~ 9 dBm,比采用 DF 协作方式消耗的总功率少 0.5 ~ 1 dBm。因此,采用双中继 HDAF 协作传输具有通信可靠性高、消耗系统功率少等优点,并且本文为多中继协作的进一步研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Xiao H L, Ouyang S. Capacity of multiple-input multiple-output quantum depolarizing channels [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(3): 1-5.
- [2] Woradit K, Quek T Q S, Suwansantisuk W, et al. Outage behavior of selective relaying schemes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(8): 3890-3895.
- [3] Chen Y F, Shi R, Long M. Performance Analysis of Amplify-and-Forward Relaying With Correlated Links [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2344-2349.
- [4] Lee I H, Lee H, Choi H H. Exact Outage Probability of Relay Selection in Decode-and-Forward Based Cooperative Multicast Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(3): 483-486.
- [5] Su W F, Liu X. On optimal selection relaying protocols in cooperative wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(1): 52-57.

- [6] Fang H R, Lin X Q, Lok T M. Power Allocation for Multiuser Cooperative Communication Networks Under Relay-Selection Degree Bounds[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2991-3001.
- [7] 王涛, 全厚德, 崔佩璋. 一种基于非正交信道的分布式中继选择及功率分配方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(5): 574-578.
WANG Tao, QUAN Hou-de, CUI Pei-zhang. Distributed relay selection and power allocation based on non-orthogonal channel [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(5): 574-578. (in Chinese)
- [8] Vardhe K, Reynolds D, Woerner B D. Joint power allocation and relay selection for multiuser cooperative communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1255-1260.
- [9] Zhang X J, Gong Y. Joint power allocation and relay positioning in multi-relay cooperative systems [J]. The Institution of Engineering and Technology Communications, 2009, 3(10): 1683-1692.
- [10] Luo J, Blum R S, Cimini L J. Decode-and-forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(3): 793-799.
- [11] Talwar S, Jing Y, Shahbazpanahi S. Joint relay selection and power allocation for two-way relay networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(2): 91-94.
- [12] Hasna M O, Alouini M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-Fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1126-1131.
- [13] Krikidis I, Thompson J S, Mclaughlin S. Relay selection for secure cooperative networks with jamming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5003-5011.

作者简介:



王丽元(1987—),女,黑龙江佳木斯人,2009年于黑龙江大学获学士学位,现为桂林电子科技大学信息与通信学院硕士研究生,主要研究方向为协作通信;

WANG Li-yuan was born in Jiamusi, Heilongjiang Province, in 1987. She received the B. S. degree from Heilongjiang University in 2009. She is now a graduate student. Her research direction is cooperative communication.

Email:wly_0910@163.com

覃 莲(1986—),女,湖北荆州人,2012年于桂林电子科技大学信息与通信学院获硕士学位,主要研究方向为协作通信;

QIN Lian was born in Jingzhou, Hubei Province, in 1986. She received the M. S. degree from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2012. Her research direction is cooperative communication.

Email:qinlianql@163.com

肖海林(1976—),男,湖北黄冈人,1998年于武汉大学获学士学位,2004年于广西师范大学获硕士学位,2007年于电子科技大学获博士学位,现为桂林电子科技大学信息与通信学院教授,主要研究方向为智能天线、MIMO移动通信系统、协同通信技术。

XIAO Hai-lin was born in Huanggang, Hubei Province, in 1976. He received the B. S. degree from Wuhan University, the M. S. degree from Guangxi Normal University, and the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1998, 2004 and 2007, respectively. He is now a professor. His research interests include smart antenna techniques, MIMO wireless communications and cooperative communications.

Email:xhl_xiaohailin@163.com