

Outage Minimization with Optimal Power Allocation Based Cooperative Relaying and Partner Selection

WANG Dong-yu¹, LI Jian-xiong², CAI Xi-biao³

1, 2 School of Information and Communication Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, China;

3 Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China

E-mail: 1. dy_wang@bupt.cn, 2. lijianxiong@tjpu.edu.cn, 3. xbc1111@126.com

Abstract: One of the essential design issues in cooperative communication is partner selection mechanism in cellular or wireless data networks. In this paper, considering the effect that large-scale fading in cellular mobile communication system has on the cooperative diversity, we present a novel algorithm for partner selection and optimal power allocation in the Decode-and-Forward (DF) cooperative diversity, under a certain power constraint to achieve the maximum channel capacity. The formed cooperative communication system is analyzed theoretically and it can improve the channel capacity and reduce the outage probability. The simulation results further show that the proposed method is feasible.

Keywords: cooperative transmission, partner selection, decode-and-forward (DF), optimal power allocation, outage probability

基于最优功率分配下最小中断概率协作中继的伙伴选择策略

王冬宇¹, 李建雄², 蔡希彪^{3,4}

1, 2. 天津工业大学, 信息与通信工程学院, 天津, 中国, 300160

3. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京, 中国, 100876

4. 泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学), 北京, 中国, 100876

E-mail: 1. dy_wang@bupt.cn, 2. lijianxiong@tjpu.edu.cn, 3. xbc1111@126.com

【摘要】在蜂窝和无线数据网络中, 中继节点选择技术是协作通信关键技术之一, 决定了协作能否带来性能增益。在本文中, 考虑蜂窝移动通信系统中大尺度衰落对协作分集技术的影响, 在总功率一定的情况下, 为达到系统容量最大的中继系统的最优功率分配, 我们提出了在瑞利衰落信道下协作通信中多协作中继功率分配的分析模型, 并提出了在解码转发(DF)的模式下, 以最优功率分配为依据的一种新的中继伙伴选择算法。从理论上对由此形成的协作通信系统进行了分析, 可以降低系统的中断概率, 仿真结果进一步验证了该方法的可行性。

【关键词】协作通信; 伙伴选择; 解码转发; 最优功率分配; 中断概率

1. 引言

衰落是影响通信质量的主要因素, 而分集技术是抗衰落的有效措施, 它通过在发射端发射多个信号样本, 接收端对收到的多个衰落特性相互独立的信号进行特定的处理, 以对抗无线信道中的衰落。多输入多输出MIMO(multiple input multiple output)天线技术通过在发射端和接收端安置多个天线形成MIMO信道, 利用空

间资源大幅度的提高了信道的容量。但从实际工程角度考虑, 对于蜂窝通信系统上行信道而言, 由于受到移动终端尺寸、功耗、天线设置等因素的限制, 很难在一个移动终端上装置多根天线, MIMO技术很难直接应用到实际通信系统中。

Cover和Gamal曾提出中继信道模型^[1], sendonaris等人受到中继信道的启发, 首先提出了协作分集的概念^{[2][3]}, 使具有单根天线的移动台获得类似于MIMO系统

中的空间分集增益。其基本思想是在多用户环境中，具有单根天线的移动台可以按照一定的方式来共享彼此的天线，从而产生一个虚拟 MIMO 系统，以获得分集增益。

现有的研究表明:协作分集可以扩大系统容量，提高网络服务质量，改善系统性能。由于协作分集中的协作伙伴共享彼此的天线，构成了虚拟的 MIMO 多天线系统，并利用分布式传输和信号处理获得分集增益，从这个意义上讲，协作分集为 MIMO 技术走向实用提供了一条新的途径^{[4][5]}。协作分集的思想具有非常广阔的应用前景，可应用于蜂窝移动通信系统、无线 Ad hoc 网络、无线局域网以及无线传感器网络等多种场合^[6]。

协作伙伴选择是影响协作增益的重要因素，选择好的协作伙伴节点能进一步提高协作增益。对于一条协作链路，伙伴选择问题是从小候补中继节点中，选出能带来最大增益的节点。而针对存在多个中继节点的无线网络，随着参与协作的节点数增多，伙伴选择的主要目标变为合理地取舍协作节点，使系统中更多的链路能获得协作增益。目前，对于协作通信的研究正逐渐从经典的三点模型的研究分析，转移到多中继模型乃至多点通信网络模型的研究分析上，这对伙伴选择的研究带来了更多的挑战。

本文针对建立的相关阴影衰落模型以及具体的实际通信网络场景，提出了已有伙伴选择算法的改进方案，由此给出相关系数来选择协作伙伴，并对此模型下三点协作通信系统的性能进行了仿真分析。

2. 系统模型

如图 1 所示为三节点两跳中继网络系统模型，该模型包含源节点 S、中继节点 R 和目的节点 D 组成。该系统模型下中继节点工作于半双工模式，源节点 S 和中继节点 R 以正交方式共享整个信道。整个信号的发射分为两个阶段，在第一阶段源节点 S 发射数据，而在第二阶段源节点不发射数据，而中继节点占有信道转发数据到目的节点 D。图中的各节点之间的无线链路的信道衰弱系数分别为 $a = |h_{sd}|^2$, $b = |h_{sr}|^2$, $c = |h_{rd}|^2$ ，且分别服从 Rayleigh 衰弱特性，各衰弱系数幅度的平方 a 、 b 、以及 c 分别表示对应无线链路的信道增益，且分别满足均值为 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 指数分布，它们指示了信道的小尺度衰弱、大尺度衰弱以及阴影衰弱强度。假设接收机端引入的噪声为加性高斯白噪声(AWGN)^[7]。

为了进一步研究中继节点位置对协作策略的影

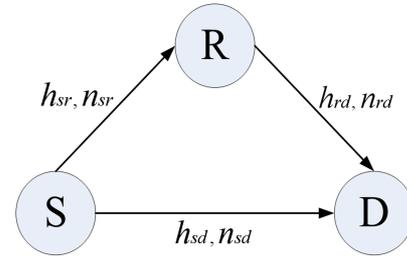


Figure 1. A simple model of cooperative relaying networks
图 1. 中继协作网络的简单模型

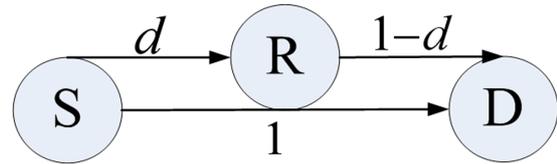


Figure 2. Layout of the relay network with the relay node located along a straight line from the source to the destination
图 2. 中继节点位于源节点与目的节点的系系统模型

响，如图 2 所示，R 在 S 与 D 之间，并定义 S 和 D 的距离归一化为 1，S 与 R 的距离为 d ，而 R 与 D 的距离为 $1-d$ 。由瑞利分布信道性质可知 $\lambda_a = 1$, $\lambda_b = 1/d^a$, $\lambda_c = 1/(1-d)^a$ ，这里也假设路径损耗因子为 3。对于现有技术，R 接收 S 发射的数据的同时转发数据到 D 对于现有的技术是难以实现的，因此中继节点 R 工作于全双工模式。

以 DF 为发射模式，发射速率 R_{DF} 可表示为：

$$R_{DF} = \frac{1}{2} \min\{\log(1+2bP_s), \log(1+2aP_s+2cP_R)\}, \quad (1)$$

在直接发送 (DT) 模式下，发射速率 R_{DT} 可表示为：

$$R_{DT} = \frac{1}{2} \log(1+2bP), \quad (2)$$

对于 DF 和 DT 两种模式下，为了实现发射速率最小，我们定义 R_{SEL} 为：

$$R_{SEL} = \max\{R_{DF}, R_{DT}\}, \quad (3)$$

设 P_s 为发射功率， P_r 为接收功率， P 为系统的总功率，对于 DF 模式，最大平均互信息可以表示为：

$$I_{DF} = \frac{1}{2} \text{MIN}\{\log(1+SNR|h_{sr}|^2), \log(1+SNR|h_{sd}|^2+SNR|h_{rd}|^2)\}, \quad (4)$$

DF 模式的中断概率为：

$$P_{DF}^{out} = P\{I_{DF} < R\} = P\{|h_{sr}|^2 < g\} + P\{|h_{sr}|^2 \geq g\}P\{|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2 < g\}, \quad (5)$$

S 和 R 之间的信道的干扰概率为:

$$P_r[|h_{sr}|^2 \geq g] = \int_0^g \frac{1}{\sigma_{sr}} \exp(-\frac{h}{\sigma_{sr}}) dh \quad (6)$$

$$= 1 - \exp(-\frac{g}{\sigma_{sr}}),$$

此时 DF 模式的中断概率为:

$$P_{DF}^{out} = 1 + \frac{\exp(-\frac{g}{\sigma_{sr}})}{\sigma_{sd} - \sigma_{rd}} [\sigma_{rd} \exp(-\frac{g}{\sigma_{rd}}) - \sigma_{sd} \exp(-\frac{g}{\sigma_{sd}})] \quad (7)$$

3. 一种新的伙伴选择算法

如表格 1 所示, 根据衰减信道的信道状态信息 (CSI), 在 DF 发射模式下, 我们合理的平均分配 S 和 R 之间的发射功率, 就能够在一直信道状态信息的条件下, 进一步的减小中断概率。

因此, 算法只需知道现在的发射区域的信道状态信息就能给出最优的发送模式, 只要反馈一个参数 M, 就能在最优的功率分配下选择最优的发射模式。当系统工作在 DF 模式下, 在一个时隙内, 节点 S 和 R 的平均发射功率满足:

$$P = P_S + P_R \quad (8)$$

假设 P_S, P_R 满足:

$$P_R = kP_S (0 < k < \infty) \quad (9)$$

我们能够按照以下的方法通过计算, 可以得出最小传输速率 R_{SEL} 的表达式。

当 $R_1 = R_2, a, b, c$ 和 k 满足 $b = a + bc$, 传输速率 R_{DF} 可以表示为:

$$R_{DF} = \begin{cases} R_1, a + kc \geq b \\ R_2, a + kc < b \end{cases} \quad (10)$$

通过式(3)和式(8)由 $b = a + bc$, 可以推出

$$R_{DF} = \frac{1}{2} \log(1 + 2a(k+1)P_S) \quad (11)$$

这时, 发射速率的最大值表示为:

$$R_{SEL} = \begin{cases} R_{DF}, (c \geq a, a \leq \frac{b}{1+k}) \\ R_{DT}, (else) \end{cases} \quad (12)$$

由式 (8) , 我们分别定义 $R_1 = \log(1 + 2bP_S)$, $R_2 = \log(1 + 2aP_S + 2cP_R)$, 此时 R_1 的最大值问题就转化为了最优化解问题:

$$\arg \max_{0 < k < +\infty} R_{SEL} = \log(1 + \frac{2b}{1+k} P) \quad (13)$$

约束条件为 $a \leq \frac{b}{1+k}, a + kc \geq b$, 当 $k = k_{\min}$ 时, R_{SEL} 能够达到最大值

Table 1. An improved algorithm based on optimal power allocation
表 1. 基于最优功率的伙伴选择算法

算法步骤
(1) 在节点 D 比较瞬时信道参数 a, b, c, 然后在最小的中断概率的发射范围内选择最优模式下的参数;
(2) 然后, 在总功率受限的条件下, 计算当时的最优功率分配参数 k^* , 然后反馈一个参数 M (1 或 0);
(3) 如果最优模式选择为 DT 模式, 则反馈一个参数 $M = 0$; 如果为 DF 模式, 则反馈 $M = k^*$;
(4) 根据反馈的 M 值节点 S 和 R 能够分别的计算各自的发射功率。

$$\frac{b-a}{c} \leq k \leq \frac{b}{a} - 1 \quad (14)$$

由式 (13), 最优解可以表示为

$$k^* = k_{\min} = (b-a)/c \quad (15)$$

R_2 的最大值问题同样可以转化为以下求最优解问题:

$$\arg \max_{0 < k < +\infty} R_{ESL} = \log(1 + \frac{2aP}{1+k} + \frac{2ckP}{1+k}) \quad (16)$$

在约束条件 $c \geq a, a + kc \leq b$ 下, 极值问题可以转化为求解最优函数 $f(k)$:

$$\arg \max_{0 < k < +\infty} f(k) = \frac{a+ck}{1+k} \quad (17)$$

对式 (17) 进行求导:

$$f(k)' = \frac{c-a}{(1+k)^2} \geq 0 \quad (18)$$

当 $k = k_{\max}$, R_{SEL} 达到最大值

$$0 \leq k \leq \frac{b-a}{c} \quad (19)$$

最优解式 (16) 可以表示为

$$k^* = k_{\max} = (b-a)/c \quad (20)$$

因此, 在最优功率分配条件下, 我们能够实现系统最小的发射中断概率, 而且只需反馈一个参数 M。

4. 仿真分析

图 3 给出了系统总的平均发射功率 $P = 10$ dB, 系统发射数据率 $R = 1$, 距离参数 d 在 0.05 到 0.95 之间变化时, 不同算法中断率性能比较。由图可知我们提出的算法明显优于^[8]提出的 DF 发射模式。这是因为本算法能精确给出任何信道增益条件下最佳发射模式, 而不是简单的估计值。本章提出的算法在最优功率分配时的性能得到更大的改善, 明显优于等功率分配, 因此对于给定的系统总的平均功率下, 最优功率分配对提高系统的性能有非常重要的意义。

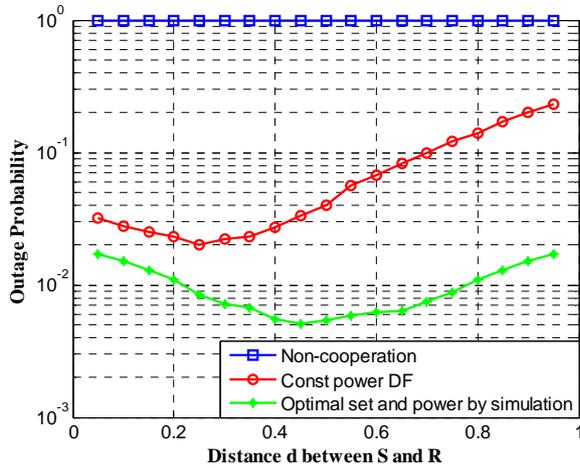


Figure 1. Outage probabilities of different strategies. Simulated for: $P = 10$ dB, $R = 1$ bits/Hz

图 1. 不同伙伴选择算法的中断概率, 仿真值: $P = 10$ dB, $R = 1$ bits/Hz

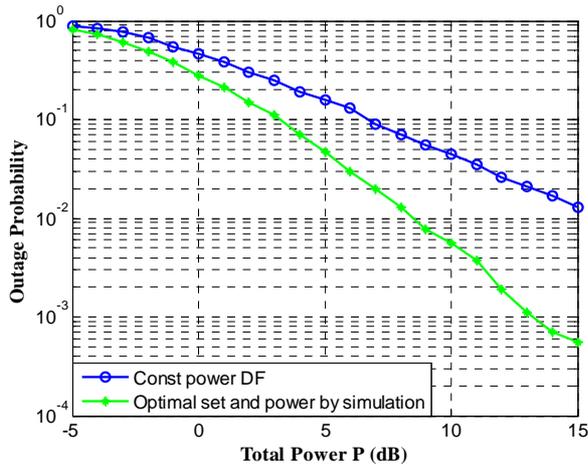


Figure 1. Outage probabilities of different strategies. Simulated for: $d = 0.5$, $P = 10$ dB, $R = 1$ bits/Hz

图 1. 不同伙伴选择算法的中断概率, 仿真值: Simulated for: $d = 0.5$, $P = 10$ dB, $R = 1$ bits/Hz

图 4 给出了 $d = 0.5$ 时, 系统发射数据率 $R=1$ 时, 中断率与系统总的平均发射功率 P 的性能曲线。由图

可知, 本章所提出的最优功率分配算法, 对于 DF 算法有 5 dB 的性能增益, 本章所提出的算法极大的降低了计算复杂度和反馈量, 并可以精确地与理论最小中断率吻合。

5. 结论

在本文中, 为了有效的减小在无线信道下的中断概率, 我们提出了一种新的算法, 这个算法是基于最优的功率分配下。在总功率受限的条件下, 考虑了最优功率分配下的伙伴选择算法对中断概率的影响。算法的仿真结果接近于优化设置。仿真结果显示本文所提出的算法能够有效的减小系统的中断概率。

References (参考文献)

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang, "User Cooperation Diversity, Part I: System Description," IEEE Trans. Commun., Vol. 51, pp. 1927-1938, Nov. 2003.
- [2] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang, "User Cooperation Diversity, Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis," IEEE Trans. Commun., Vol. 51, pp. 1939-1948, Nov. 2003.
- [3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G.W.Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 50, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [4] Yin qinye, Zhang Ying, Cooperative diversity: a new spatial diversity. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 37(2), P195-197.
殷勤业, 张莹等.协作分集:一种新的空域分集技术.西安交通大学学报, 2005, 39(6):551-557.
- [5] Zhang xianjing, Zheng baoyu, Qian xiacong, Cooperative diversity system and the analysis of BER performance. Journal on Communications, 2007, 28(1): 40-56.
赵贤敬, 郑宝玉, 钱小聪等.协作发射分集系统及其误码性能分析.通信学报, 2007, 28(1): 40-56.
- [6] Qiu guanghui, Wireless communication technology and the design and simulation cooperation protocol. [Master's Thesis] 丘广晖.无线通信网中协作分集技术和协议的设计和仿真.[硕士学位论文].北京:北京邮电大学, 2007
- [7] A.StefanovandE.Erkip,"Cooperative coding for wireless networks,"IEEETrans.Commun.,Vol.52,No.9,pp.1470-1476,Sep .2004.
- [8] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 24, pp. 659-672, Mar. 2006.