

改进的集中式协作用户选择方法

王荆宁, 沙学军, 卢为党, 张中兆

(哈尔滨工业大学通信技术研究所, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对协作分集系统中协作用户选择方法计算复杂度较高的缺点, 提出了 2 种改进的协作用户选择方法——信道最优方法和非互惠信道最优方法. 信道最优方法首先为信道最差的用户选择一个与其信道最优的用户作为协作伙伴, 两用户互相作为对方的协作伙伴转发对方的信息, 并且引入了 2 个信噪比门限来避免不必要的协作过程; 非互惠信道最优方法是为信道最差的用户选择一个信道最优的用户作为协作伙伴, 为其转发信息, 而该协作伙伴则另外选择一个最优的用户作为自己的协作伙伴. 仿真表明, 在小区内的用户数达到 50 以上的时候, 这 2 种协作用户选择方法在能量增益与最差链路优先匹配算法相当的基础上, 可以省略复杂度为 $O(N^2)$ 的计算.

关键词: 协作分集系统; 协作用户选择; 信道最优; 非互惠

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)08-0064-04

Improved Selection Methods for Concentrative Cooperative Partners

WANG Jingning, SHA Xuejun, LU Weidang, ZHANG Zhongzhao

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Focusing on the high computational complexity of partner selection methods in cooperative systems, two improved partner selection methods are proposed. These are the best channel matching strategy and the non-reciprocal best channel matching strategy. The user with the worst link is firstly taken into account in the best channel matching strategy. Then the user with the best inter-user channel quality is selected by the method as his partner. The two users cooperate to relay information for each other, and unnecessary cooperative process is avoided by setting up two special thresholds of signal-to-noise. The non-reciprocal best channel matching strategy starts from the user with the worst link and then selects the user with the best inter-user channel as a partner for each user. Simulation results show that both the partner selection strategies can reduce $O(N^2)$ computation complexity, meanwhile keep the same energy gain as the existing worst-link-first algorithm.

Keywords: cooperative diversity system; partner selection; best channel matching; non-reciprocal

协作分集技术就是在不同的终端互相转发协作伙伴(partner)的信息, 彼此共享单天线以形成分布式多天线系统, 得到空间分集的增益^[1-2], 从而解决了无线网络的移动终端受体积和功耗等的限制不利于采用多天线技术的难题. 协作分集系统中协作用户的选择方法对系统的性能有很大的影响. 通常, 协作用户的选择方法可以分为分散式和集中式 2 类,

前者以 Bletsas 等人^[3-4]的机会选择方法为代表, 只是针对单个用户的最优, 后者对整个基站内的用户进行统一的分配, 以达到能量增益最大化. 最大权重(MW)方法^[5]、贪婪(Greedy)方法^[6]和最差链路优先(WLF)方法^[7]都是集中式协作用户选择方法, 其中 WLF 方法在能量增益损失较小的情况下的计算复杂度最低, 但仍旧存在缺点: ①选择过程中依旧需

要计算节点协作的能量增益,计算量依旧很大;②对基站覆盖的所有用户都进行分组协作,这对信道较好的用户或者距离较远的2个用户来说增益很小甚至没有增益. 为了进一步降低计算复杂度并避免不必要的协作,本文提出了信道最优方法和非互惠信道最优方法,相比较 WLF 方法基本没有能量增益损失,并有效降低了计算复杂度和系统开销.

1 系统模型和信道最优匹配算法

单基站模型如图1所示,用户之间的以及用户到基站的信道为相互独立的准静态瑞利衰落信道,基站已知用户之间以及用户到基站的信道信息. 这里采用固定的再生前向协作分集的方法,并且假定每个用户只能为一个其他的用户提供协作.

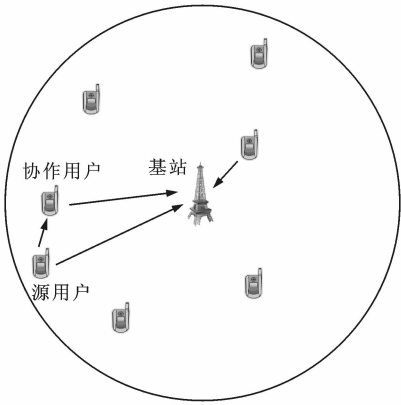


图1 协作分集式基站模型

对任意的2个用户 i 和 j , $i \neq j$, $i, j = 1, 2, \dots, M$, M 为基站内的用户总数,它们进行合作的能量增益记作 $w(i, j)$. WLF 方法就是首先找到信道最差的用户 i , 计算 i 与所有其他用户进行协作的能量增益 $w(i, j)$, 选择其中能量增益最大的用户 j 作为协作用户, 二者相互协作, 然后重复这样的操作, 继续为剩下的信道最差的用户匹配一个能量增益最大的用户, 直到结束^[7]. 本文采用最差链路优先的准则提出了协作用户选择的信道最优方法, 该方法的特点是选择与用户 i 之间信道最好的用户 j 作为协作用户, 不再需要计算用户 i 与其他用户协作的能量增益. 假设 γ_i 、 γ_j 和 γ_{ij} 分别表示用户 i 、用户 j 到基站的接收信噪比以及用户 i 到用户 j 的接收信噪比, S_1 和 S_2 分别为用户到基站和用户之间的信噪比门限, 如果低于门限就不协作, 从而可以避免低能量增益的协作过程, 提高协作的效率. 如果有多个用户到用户 i 的信噪比 γ_{ij} 相同或者相近, 则应该选

择其中信噪比 γ_j 最差的用户作为用户 i 的协作用户, 而如果用户 j 的信噪比 $\gamma_j > S_1$, 则用户 i 不需要为用户 j 转发信息. 信道最优方法的匹配流程如图2所示.

信道最优方法不需要能量增益过程, 有效地降低了计算复杂度, 但是在选择过程中只考虑了用户 j 为用户 i 协作, 而未考虑用户 i 为用户 j 协作. 因此, 本文在非互惠协作方法^[8]的基础上提出了一种非互惠信道最优协作用户选择方法, 就是为每个需要协作的用户分别寻找一个相对最优的协作用户, 基本流程如下:

(1) 从源用户列表中选择信道最差的用户 i , 如果其信噪比大于门限 S_1 , 则结束, 否则进入步骤(2);

(2) 从协作用户列表找出比用户 i 信道状态好 ($\gamma_j > \gamma_i$)、且与用户 i 之间信道最好的用户 j , 如果用户 j 与用户 i 之间的信噪比 $\gamma_{ij} > S_2$, 则将用户 j 作为用户 i 的协作用户, 并且从源用户列表中去掉用户 i , 从协作用户列表中去掉用户 j , 然后重复步骤(1), 否则执行步骤(3);

(3) 从协作用户列表中比用户 i 信噪比低的用户 ($\gamma_j < \gamma_i$) 当中找出与用户 i 之间信道最好的用户 j , 如果用户 j 与用户 i 之间的信噪比 $\gamma_{ij} > S_2$, 则将用户 j 作为用户 i 的协作用户, 并且从源用户列表中去掉用户 i , 从协作用户列表中去掉用户 j , 否则

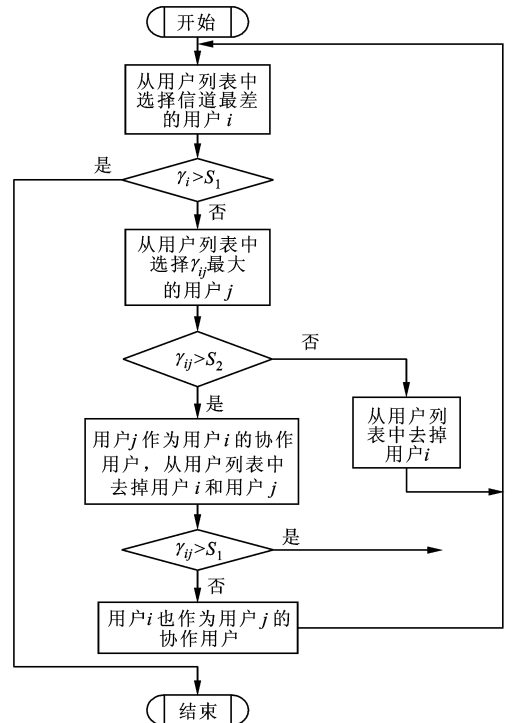


图2 信道最优匹配流程图

仅从源用户列表中去掉用户 i , 然后重复步骤(1)。

这里如果有多个用户到用户 i 的信噪比 γ_{ij} 相同或者相近, 则应该选择其中信噪比 γ_j 最优的用户作为用户 i 的协作用户。

2 协作能量增益分析

2.1 非协作能量计算

在非协作的情况下, 瑞利衰落信道的二相相移键控(BPSK)的平均误码率可以表示如下^[9]

$$P_e = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{\gamma_i}{1 + \gamma_i} \right)^{1/2} \right) \quad (1)$$

式中: $\gamma_i = \sigma_i^2 \frac{E_{bi, no}}{N_0}$, 为用户 i 的接收信噪比, 其中 $E_{bi, no}$ 为非协作的情况下传送 1 b 信息所需的能量, σ_i^2 为信道衰落系数的方差, N_0 为加性高斯白噪声的单边功率谱密度。这样传输 1 b 信息所需的能量可以表示为

$$E_{bi, no} = \frac{N_0}{\sigma_i^2} \left[\frac{(1 - 2P_e)^2}{1 - (1 - 2P_e)^2} \right] \quad (2)$$

2.2 固定再生前向协作分集能量计算

用户 i 选择了用户 j 作为协作用户, 采用固定的再生前向方法, 在用户到基站以及用户之间信噪比较高时的时候, 准静态瑞利信道下的平均误码率表示如下^[10]

$$P_{e, c} = \frac{1}{2\gamma_{ij}} \frac{\gamma_j}{\gamma_i + \gamma_j} + \frac{3}{4\gamma_i\gamma_j} + \frac{1}{2\gamma_{ij}} \frac{\gamma_i - \gamma_j}{(\gamma_i + \gamma_j)^2} - \frac{1}{2\gamma_{ij}} \frac{3}{4\gamma_i\gamma_j} \quad (3)$$

式中: $\gamma_i = \sigma_i^2 \frac{2E_{bi, S}}{N_0}$, 其中 $E_{bi, S}$ 为用户 i 发射 1 b 信息时源用户 i 所耗费的能量; $\gamma_j = \sigma_j^2 \frac{2E_{bj, R}}{N_0}$, 其中 $E_{bj, R}$ 为用户 i 发射 1 b 信息时协作用户 j 所耗费的能量; $\gamma_{ij} = \sigma_{ij}^2 \frac{2E_{bi, S}}{N_0}$. 令 $k = E_{bi, S}/E_{bj, R}$, 则式(3)可以写作

$$P_{e, c} E_{bi, S}^3 - \left[\frac{k\sigma_j^2 N_0}{4\sigma_{ij}^2 (\sigma_i^2 + k\sigma_j^2)} \right] E_{bi, S}^2 + \frac{3N_0^3}{64k\sigma_{ij}^2 \sigma_i^2 \sigma_j^2} - \left[\frac{3}{16k\sigma_i^2 \sigma_j^2} + \frac{\sigma_i^2 - k\sigma_j^2}{8\sigma_{ij}^2 (\sigma_i^2 + k\sigma_j^2)^2} \right] \cdot N_0^2 E_{bi, S} = 0 \quad (4)$$

式中: 参数 k 可以根据用户 i 和用户 j 的信道质量来设置不同的数值, 从而得到更大的能量增益^[11]。如果给定系统所要求的平均误码率 $P_{e, c}$, 求解上面的方程就可以得到源用户所需的能量 $E_{bi, S}$, 从而得到协作用户所需的能量 $E_{bj, R}$ 。

2.3 能量增益计算与计算复杂度分析

整个基站内协作分集的平均能量增益定义为^[7]

$$G_{CD} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^M E_{bi, no}}{\sum_{i=1}^K (E_{bi, S} + E_{bj, R}) + \sum_{i=K+1}^M E_{bi, no}} \right] \quad (5)$$

式中: M 为基站内的用户总数; K 为存在协作用户的用户数。那么, 剩下的 $M-K$ 个用户就是没有进行协作的用户。

原来的 WLF 方法, 在选择协作伙伴的时候, 需要用式(2)和式(4)计算用户 i 与剩下所有用户协作的能量增益, 然后选择其中能量增益最大的用户 j 作为用户 i 的协作用户, 计算次数为 $O(N^2)$, 而本文提出的 2 种算法直接根据用户间信道状态选择协作伙伴, 不需要计算式(2)和式(4)的结果, 从而极大地降低了计算复杂度。

3 仿真结果与分析

假设小区半径为 R , 用户 i 到基站 BS 的距离为 d_i , 源用户 i 、协作用户 j 之间的距离为 d_{ij} 。平均信道衰落系数 $\sigma^2 \propto d^{-\alpha}$, 距离衰落因子 α 的取值一般在 2 到 6 之间, 这里取 $\alpha=3$ 。其他的参数设置: $k=1$, $P_e=10^{-3}$, $N_0=1$ 。图 3 所示为能量增益随着用户到基站距离 d_i 和用户之间距离 d_{ij} 变化的曲线, 这里用户 i 和用户 j 到基站的距离是相等的。由图 3 可以看出, 当用户距离基站的距离较小或者用户之间距离较大的时候, 协作的能量增益很小, 而建立协作分集是需要系统开销的, 所以本文设置了用户到基站的信噪比门限 S_1 和用户之间的信噪比门限 S_2 , 仿真中就是距离门限 d_1 和 d_2 。这 2 个门限是协作增益与协作开销的折中: d_1 越大开销越小, 但是增益也会变小; d_2 越大, 找不到协作用户的可能性越小, 但是开销也就越大。这 2 个门限的最佳取值与系统模型以及系统要求等有关, 一般要保证 $d_2 \leq d_1$, 这里选择 $d_1 = d_2 = 0.4R$ 。

当基站中用户总数为 N 时, 信道最优方法和非互惠信道最优方法中需要协作而找不到协作伙伴的用户平均个数分别为 m_1 和 m_2 , 仿真结果如表 1 所示。可以看出: 信道最优方法随着用户数上升, 需要协作而找不到协作伙伴的用户逐渐减少, 当用户数达到 100 的时候就基本没有找不到协作伙伴的用户了; 非互惠信道最优方法需要协作而找不到协作伙伴的用户随着用户数的上升基本没有变化, 持续在 2 个左右, 属于可以接受的范围。

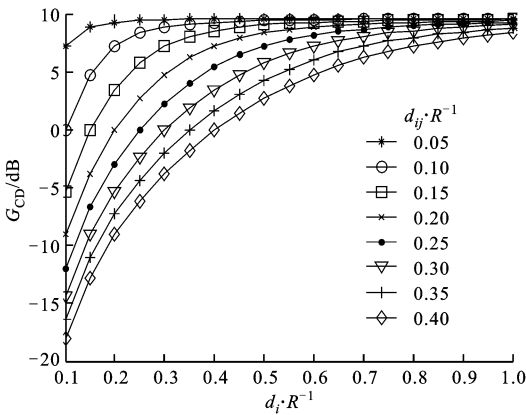


图 3 能量增益随用户到基站距离及用户之间的距离变化曲线

表 1 总用户数为 M 的情况下找不到协作用户的用户个数

M	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
m_1	2.26	1.60	0.96	0.57	0.37	0.30	0.22	0.06	0.03	0.00
m_2	2.41	2.28	2.11	2.01	2.42	2.42	2.25	2.78	2.57	2.38

图 4 是在基站中总用户数不同情况下几种选择方法的平均能量增益比较. 从图中可以看出:当用户数达到 50 的时候,信道最优方法的能量增益就超过了 8 dB,接近文献[7]中的 WLF 方法;当用户数达到 70 时,与 WLF 方法相当甚至超过了 WLF 方法;非互惠信道最优方法在用户数达到 60 之前能量增益好于信道最优方法,之后性能也接近 WLF 方法. 可见,本文提出的 2 种协作伙伴选择方法在用户密集区域(单基站内用户数超过 50 的情况)都能得到与 WLF 方法等同的能量增益.

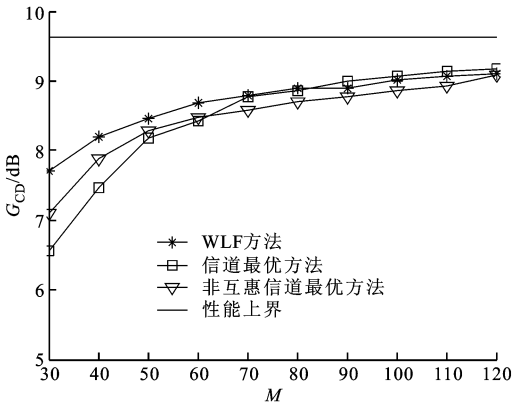


图 4 几种协作用户选择方法的平均能量增益

4 结 论

本文研究了协作通信中集中式的协作用户选择方法,提出了信道最优和非互惠信道最优 2 种方法.

这 2 种方法都遵循最差链路优先的原则,选择用户间信道最优的用户作为协作伙伴,并且设置了 2 个信噪比门限,减少了不必要的协作通信建立过程,从而降低了系统开销. 仿真表明,信道最优方法在小区内用户达到 50 以后的能量增益与原来的 WLF 匹配算法相当甚至更高,而非互惠信道最优方法可以有效改善最优信道匹配在用户数较少的时候的性能损失,用户数较多的时候性能与原来 WLF 方法相当,并且可以为协作伙伴提供更灵活的选择,对分散式的用户选择方法有一定指导意义. 本文所提出的 2 种方法在能量增益损失较少的前提下可以省略 $O(N^2)$ 次的能量增益计算,有效降低计算复杂度. 同时,如果合理的分配源用户和协作伙伴的能量(也就是调整参数 k),协作分集的能量增益还会有进一步的提高.

参考文献:

[1] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451-1458.

[2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity, part I: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.

[3] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.

[4] BLETSAS A, SHIN H, WIN M Z, et al. Cooperative diversity with opportunistic relaying [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006:1034-1039.

[5] GABOW H N. An efficient implementation of Edmonds' algorithm for maximum matching on graphs [J]. Journal of the ACM, 1976, 23(2): 221-234.

[6] AVIS D. A survey of heuristics for the weighted matching problem [J]. Networks, 1983, 13(4): 475-493.

[7] MAHINTHAN V, CAI L, MARK J W, et al. Maximizing cooperative diversity energy gain for wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(7): 2530-2539.

[8] NOSRATINIA A, HUNTER T E. Grouping and partner selection in cooperative wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 369-378.

[9] ZHANG Xiaojuan, GONG Yi. Power allocation for

- regenerative cooperative systems with multi-antenna destination [C] // IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3755-3759.
- [10] MAHINTHAN V, MARK J W, SHEN X. A cooperative diversity scheme based on quadrature signaling [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(1): 41-45.
- [11] MAHINTHAN V, CAI L, MARK J W, et al. Partner selection based on optimal power allocation in cooperative-diversity systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1): 511-520.

(编辑 刘杨)