

多用户协同无线网络中的中继选择的研究^①梁 慤^② 王亚峰 杨大成

(北京邮电大学无线理论与技术实验室 北京 100876)

摘 要 针对多用户协同无线网络中的中继选择问题,提出了两种基于不同系统开销的半分布式中继选择算法。这两种算法以中断概率为优化目标,充分利用多用户协同无线网络的特点,以较低的系统开销和计算复杂度获取使系统中中断概率达到最小的中继选择问题(指派问题)的次优解。仿真结果表明,两种算法均可以较好地逼近中断概率性能的下界,并保证用户公平性,而算法 2 以较大的系统开销换取优于算法 1 的容量性能。提出的两种半分布式算法在性能和系统开销之间获得了较好的折衷,可以大幅简化中继选择在实际无线通信系统中的应用,尤其适用于稠密人口地区的应用。

关键词 中继选择,调度,用户协作,机会中继,协同网络

0 引言

无线网络与有线网络不同,由于无线传输的广播特性,其源节点发送的信号不仅可以被目标节点接收,还可以被邻近节点接收。在传统的无线网络中,这些被邻近节点接收的信号被视为干扰。事实上,它们包含的信息与目标节点所接收的相同。如果这些信息可以转发给目标节点,接收质量势必可以得到提高。这种新技术就叫做协同通信,它可以用较低的成本来提升容量,扩大覆盖以及提高可靠性。

文献[1]证明了协同通信能够有效提升网络性能,同时指出该性能增益高度依赖于中继节点的选择。中继选择可分为多中继选择和单中继选择两类,前者的一个主要应用是基于分布式空时编码(space-time coded, STC)的协同方案^[2],后者亦称为机会中继,它可获得与分布式 STC 协同方案相同的分集-复用折中性能,且不需要复杂的 STC 设计。因此,本文所讨论的中继选择算法均基于机会中继。近年来,单用户场景下的中继选择算法得到了广泛的研究^[3-5],而多用户场景下的中继选择算法却少有人问津。文献[6]以中断概率为优化目标,提出了一种基于最小-最大(min-max)准则的中继选择算法。最小-最大准则旨在最小化所有用户中的最大中断概率,因此,该算法可看作是最为公平的算法。文献[7]以容量为优化目标,提出了一种正比公平

(proportional fairness, PF)算法,并与轮询(round-robin, RR)算法进行了性能比较,可同时提升容量和公平性。上述集中式中继选择算法都需要完整的信道状况信息(channel state information, CSI),如此庞大的反馈量在实际中是难以实现的。而分布式中继选择算法^[8]所需的节点间信息交换会同样引入大量系统开销,否则会导致严重的选择冲突。文献[9]以容量为优化目标,提出一种半分布式中继选择算法。该算法大幅减少了信息反馈量,但其调度准则和随机中继选择造成了不少的性能损失。

相对于集中式和分布式中继选择算法,半分布式中继选择算法无疑具有更大的吸引力。本文充分利用多用户协同无线网络的特点,在半分布式框架下,提出了两种基于不同开销的中继选择算法。这两种算法均以中断概率为优化目标,同时确保用户间的公平性,但在容量性能上有所差异。需要指出的是,本文提出的算法是针对静态或者准静态用户的,若用户处于移动状态,需要在本文提出算法基础上再增加后续算法以保证用户始终与最优中继协同通信。

1 模型

1.1 系统模型

本文采用单小区多用户模型,目标节点(D)位

① 863 计划(2007AA01Z211)和国家自然科学基金(60602060)资助项目。

② 男,1982 年生,博士生;研究方向:移动通信,无线资源管理;联系人, E-mail: liangmin1028@gmail.com (收稿日期:2009-08-26)

于小区中心, M 个源节点(S)随机均匀分布在小区内, 如图1示。假设所有源节点均工作在放大转发

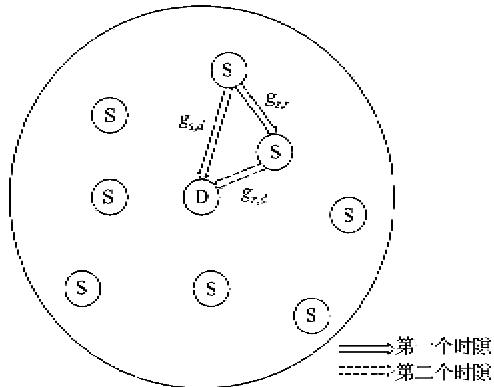


图1 多用户协同无线网络模型

(amplify-and-forward, AF)模式, 每个源节点均可以充当其他源节点的中继节点。在每个子帧(包含连续两个时隙), 每个源节点可以挑选另一个源节点作为中继节点帮助其转发数据, 并且可以充当另一个源节点的中继节点帮助其转发数据。接收机在每个子帧的第一个时隙接收直传信号, 第二个时隙接收中继节点转发的信号。然后, 将这两路信号做最大比合并, 以获得源节点的最大平均互信息。

$$I^{AF} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \gamma_{s,d} + \frac{\gamma_{s,r} \gamma_{r,d}}{\gamma_{s,r} + \gamma_{r,d} + 1} \right) = \frac{1}{2} \log \left(1 + \Gamma_T \left(g_{s,d} + \frac{g_{s,r} g_{r,d}}{g_{s,r} + g_{r,d} + 1/\Gamma_T} \right) \right) \quad (1)$$

其中, s, r 和 d 分别表示源节点、中继节点和目标节点, $g_{m,n}$ 是节点 m 和节点 n 之间的信道增益, $\gamma_{m,n}$ 是节点 m 和节点 n 之间物理信道的瞬时信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), 表示为

$$\gamma_{m,n} = \Gamma_{m,n} \cdot |h_{m,n}|^2 \quad (2)$$

其中, $|h_{m,n}|$ 是瑞利衰落的幅度, 且 $E\{|h_{m,n}|^2\} = 1$ 。 $\Gamma_{m,n}$ 表示为^[10]

$$\Gamma_{m,n} = \Gamma_T \Gamma'_{m,n} = \left(\frac{P}{N_0} \right) K S_{m,n} d_{m,n}^{-\beta} \quad (3)$$

其中, $\Gamma_T = P/N_0$, P 是发射功率, N_0 是接收机的加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)。这里, 我们假设所有源节点有相同的 Γ_T 。对于 $\Gamma'_{m,n}$ 项, K 是参考距离上的路径损耗, $S_{m,n}$ 是对数阴影衰落, 其均值为 0, 标准差为 σ_S , $d_{m,n}$ 是节点 m 和节点 n 之间的距离(用参考距离归一化), β 是路径损耗指数。

1.2 中断概率

对于目标速率 R , $I^{AF} < R$ 表示中断事件的发生, $P_{out,i}$ 表示源节点 i 的中断概率。

定义中断概率向量

$$\vec{P}_{out} = \{P_{out,1}, P_{out,2}, \dots, P_{out,M}\} \quad (4)$$

当不是所有用户采用直传方式时, 可达中断概率区域可以分别表示为 P_H^C , 其中 Π 是所有协作方案的集合。

定理 1 可达中断概率区域 P_H^C 是凸性的, 并包含所有协作方案的可达中断概率向量。

证明 假定 $\vec{P}_{out}^1$ 和 $\vec{P}_{out}^2$ 是两个可达中断概率向量, 分别由协作方案 Q^1 和 Q^2 实现。定义“合并”协作方案 Q , 如式

$$Q = \begin{cases} Q^1, A = 1 \\ Q^2, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

所示。其中, A 是随机变量, 且 $P\{A = 1\} = a$ 。

对任意 $0 \leq a \leq 1$, $\vec{P}_{out} = a\vec{P}_{out}^1 + (1-a)\vec{P}_{out}^2$ 可以由协作方案 Q 实现。得证。

定理 2 在既定信道条件下, 可达中断概率区域 P_H^C 包含向量 $\vec{P}_{out}^D$, 其中 $\vec{P}_{out}^D$ 表示所有用户采用直传方式下的中断概率向量。

证明 直传用户的最大平均互信息可以表示为

$$I^D = \log(1 + \gamma_{s,d}) \quad (6)$$

当 $\Gamma_{m,n}$ 过低时, 有 $I^{AF} \leq I^D$, 因此, $P_{out}^D \leq P_{out}^C$ 。对任意用户 i , 若有 $P_{out,i}^D \leq P_{out,i}^C$, 则 $\vec{P}_{out}^D \in P_H^C$ 成立。

2 中继选择算法

本文研究如何给多个用户分配中继, 使得系统的中断概率最小化, 并保持用户之间的公平性。该问题可以描述为

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{out,i,j} a_{i,j} \quad s.t., \begin{cases} \sum_{i=1}^M a_{i,j} = 1, \forall j \\ \sum_{j=1}^M a_{i,j} = 1, \forall i \\ a_{i,j} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $a_{i,j} = 1$ 表示源节点 i 与源节点 j 协作通信, $a_{i,j} = 0$ 表示源节点 i 不与源节点 j 协作通信, $a_{i,i} = 1$ 表示用户 i 工作在非协作状态。需要注意的是, 如果源节点 j 是源节点 i 的中继节点, 源节点 i 未必是源节点 j 的中继节点。

该问题是一个复杂的非线性动态规划问题,

其最优解可以通过穷举法获得,在式(7)的约束条件下,所有可能的协作方案将有 $M!$ 种,对于所有这些方案,需要从中选出中断概率最小的那个协作方案。穷举法的计算复杂度随着源节点数 M 的增大而迅速增大,因此难以在实际系统中得到实时应用。本文提出一种次优的中继选择策略,以较低的复杂度来实现中断概率的最小化,同时保证用户的公平性。

根据式(1)和目标速率可以判断出源节点是否发生中断,因此使得系统中中断概率达到最小的中继选择问题实际上是一个指派问题,可以用双向图 $G = (S, R, Q)$ 来表示,如图 2 示。其中, $S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_M\}$ 是源集合, $R = \{s_1, \dots, s_j, \dots, s_M\}$ 是中继集合, $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{M!}\}$ 是协作方案集合。

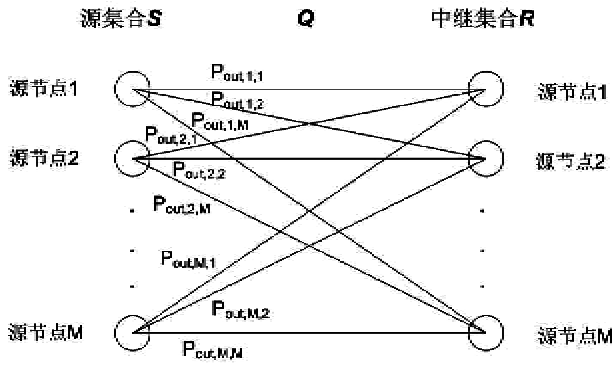


图 2 双向图表示的中继选择系统

在目标速率的限制下,即, $I^{AF} \geq R$, 每个源节点的中继集合收缩为可用中继子集 $R_i, R_i \subseteq R$, 其包含元素个数为 N_i 。一般而言,源节点拥有的中继子集越小,发生中断的概率就越大。因此,我们让拥有较小可用中继子集的源节点,有更高的优先权去选择中继节点。定义每个源节点的优先权

$$c_i = (P_{out,i})^\zeta / N_i, i = 1, \dots, M \quad (8)$$

其中, ζ 是用来调节中断概率和公平性折中关系的一个正整数。

所谓半分布式^[9]方式,就是每个中继节点先独立判定各自对源节点的可行性,再将有用信息反馈给目标节点,最后由目标节点根据反馈的信息做最终的中继分配。在半分布式框架下,本文提出两种基于不同开销的中继选择算法(算法 1 和算法 2),过程如下:

步骤 1 源节点向目标节点广播请求发送(request to send, RTS)信号,该信号可以同时被中继节点侦听到。目标节点和各个中继节点根据接收到的 RTS 信号估计出各自与源节点之间的信道增益 $\hat{g}_{s,d}$

和 $\hat{g}_{s,r}$ 。

步骤 2 目标节点返回可以发送(clear to send, CTS)信号给源节点进行确认,其中包含 $\hat{g}_{s,d}$ 信息。各个中继节点根据接收到的 CTS 信号估计出它们与目标节点之间的信道增益 $\hat{g}_{r,d}$ 。

步骤 3 各个中继节点根据估计出的信道增益 $\hat{g}_{s,d}, \hat{g}_{r,d}$ 和 $\hat{g}_{s,r}$, 利用式(1)计算出源节点的互信息,然后与目标速率进行比较,判断自己能否帮助源节点达到目标速率,如果可以,将源节点 ID 加入自己的帮助列表。算法 1 中,当各个中继节点对所有源节点的判决完成后,将生成的帮助列表反馈给目标节点。算法 2 中,与帮助列表所对应的互信息列表将会一并反馈给目标节点。

步骤 4 算法 1 中,目标节点根据接收到中继节点 s_j 的帮助列表 $S_j, j = 1, \dots, M$, 生成源节点 s_i 的可用中继列表 $R_i, i = 1, \dots, M$, 集合 R_i 和 S_j 中所包含的元素个数分别为 N_i 和 N_j 。算法 2 中,与可用中继列表 R_i 对应的互信息列表 I_i 也会一并生成。

步骤 5 更新 N_i 值和 N_j 值, $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M$ 。然后,根据式(8)计算出每个源节点优先权 $c_i, i = 1, \dots, M$ 。

步骤 6 将中继节点 s_k 分配给源节点 s_k

$$s_k = \arg \max_{s_i \in S} c_i \quad (9)$$

$$s_k = \begin{cases} \arg \min_{s_j \in R_k} N_j, \text{ 算法 1} \\ \arg \max_{s_j \in R_k} I_j, \text{ 算法 2} \end{cases} \quad (10)$$

步骤 7 将源节点 s_k 移出集合 S 和 S_j , 中继节点 s_k 移出每个源节点的可用中继子集 R_i 。如果源节点集合 S 非空,返回步骤 5。

步骤 8 目标节点广播分配信息。

算法 1 中,最多需要反馈 $M \times M$ 个源节点 ID; 算法 2 中,最多需要反馈 $M \times M$ 个源节点 ID, 以及与之对应的 $M \times M$ 个互信息。

当 $\zeta = 1$ 时,该算法的复杂度为 $\mathcal{O}(3M(M+1)/2)$, 其中包含 $M(M+1)/2$ 次除法运算和最多 $M(M+1)$ 次比较运算。

定理 3 当节点之间的信道状况无穷好,且 $\zeta = 1$ 时,本文算法退化为最小-最大算法。

证明 当节点之间的信道状况无穷好时,源节点与其他任意源节点协作均能满足目标速率需求,即,有相同的 N_i 。再令 $\zeta = 1$, 本文算法退化为最小-最大算法。

3 数值仿真

本小节评估了提出算法的中断概率、公平性和容量三种性能,并与已有算法进行对比,包括穷举法、最小-最大算法、最大信噪比算法、正比公平算法、轮询算法和 Cai 算法^[9]。在仿真中,目标速率 $R = 1/3$,参考距离下的路径损耗为 -24dB ,对数阴影衰落的标准差为 8dB ,路径损耗指数为 4。为了评价用户之间的公平性,我们定义如下最小-最大公平因子:

$$\frac{(\sum_i P_{\text{out},i}^* P_{\text{out},i})^2}{(\sum_i P_{\text{out},i}^{*2})(\sum_i P_{\text{out},i}^2)} \quad (11)$$

其中, $P_{\text{out},i}^*$ 是最小-最大算法下用户 i 的中断概率。

图 3 给出了不同信噪比下,各种中继选择算法的中断概率性能比较,其中,用户数为 10, $\zeta = 1$ 。由于穷举法是式(7)所描述优化问题的最优解,因此,穷举法所获得的中断概率曲线可以看作是中断概率性能的下界。从图中可以看出,本文提出的两种算法均可较好的逼近性能下界,其中算法 1 的性能要略优于算法 2。当中断概率为 10^{-2} 时,本文算法相对于下界的性能损失不到 1dB ,而相对于最小-最大算法有 8dB 左右的性能增益。由于最大信噪比算法、正比公平算法和 Cai 算法的优化目标为容量,轮询算法的优化目标为公平性,因此它们的中断概率性能较差。

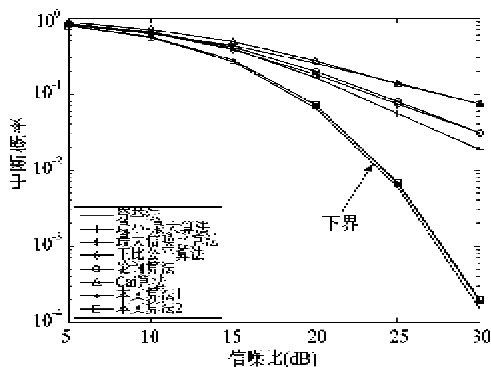


图 3 不同信噪比下的中断概率性能

图 4 给出了不同信噪比下,各种中继选择算法的公平性比较,其中,用户数为 10, $\zeta = 1$ 。若公平性指数越贴近 1,则表示公平性越好。从图中可以看出,本文提出的两种算法和轮询算法具有近似于最

小-最大算法的公平性,而 Cai 算法的公平性最差。穷举法虽然有最优的中断概率性能,但公平性较差。在最大信噪比算法和正比公平算法中,信噪比较好的用户始终拥有较高的优先级选择中继,因此,它们的公平性也较差,尤其在较高信噪比处。

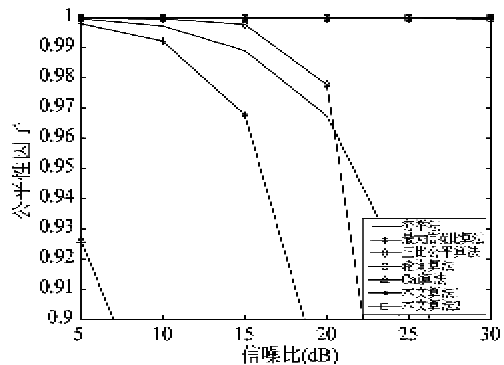


图 4 不同信噪比下的公平性

图 5 给出了不同用户数下,各种中继选择算法的中断概率性能比较,其中,信噪比为 20dB 。随着用户数的增加,本文提出的两种算法的性能曲线急剧下降,而其他算法的性能基本保持不变。随着 ζ 的增大,本文提出算法的中断概率性能下降,公平性上升,反之亦然。还可以看出,参数 ζ 对算法 2 的影响大于算法 1。

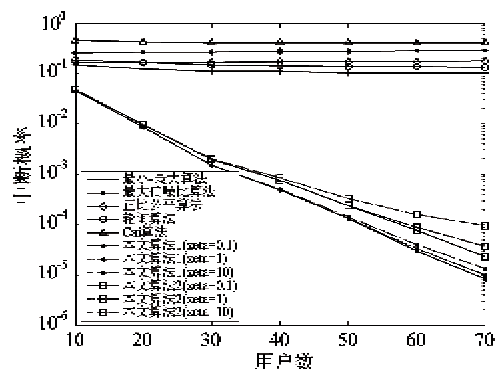


图 5 不同用户数下的中断概率性能

图 6 给出了不同信噪比下,各种中继选择算法的容量性能比较,其中,用户数为 10, $\zeta = 1$ 。从图中可以看出,随着用户数的增加,容量性能呈上升趋势。其中,Cai 算法性能最差,算法 1 与穷举法的性能相当,略优于 Cai 算法。算法 2 在反馈的互信息帮助下,获得了最好的容量性能。其他算法容量性能介于算法 1 和算法 2 之间。

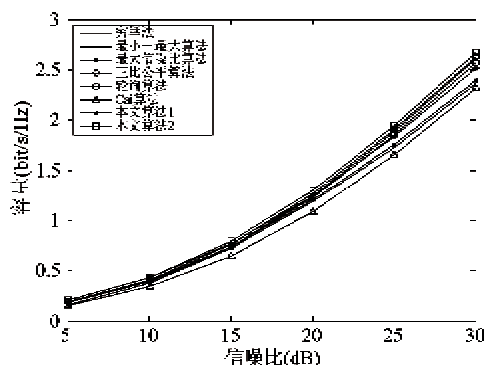


图6 不同信噪比下的容量性能

4 结 论

本文在分析了多种应用于多用户协同无线网络下的中继选择算法之后,提出两种基于不同系统开销的半分布式中继选择算法。这两种算法提供了以中断概率为优化目标的中继选择问题的次优解,但较提供最优解的穷举法,大幅降低了系统开销和计算复杂度。仿真结果表明,本文提出的半分布式中继选择算法较其他几种算法,可以较好地逼近中断概率性能下界,保证公平性,在适当增加系统开销的前提下,可以提升一定的容量性能。这两种算法在性能和系统开销之间获得的较好的折衷,可以大幅简化中继选择在实际无线通信系统中的应用,尤其是稠密人口地区的应用。

随着研究的深入,中继选择算法将会不断完善,譬如,支持动态用户。目前,这一领域鲜有人涉及,这也是我们下一步的研究方向与重点。中继选择这一关键技术的完善与发展将会直接促进协同无线网络的发展与应用。

参考文献

- [1] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080
- [2] Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415-2525
- [3] Zhao Y, Adve R, Lim T J. Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 3114-3123
- [4] Ibrahim A S, Sadek A K, Su W, et al. Cooperative communications with relay selection: when to cooperate and whom to cooperate with. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2814-2827
- [5] Michalopoulos D S, Karagiannidis G K. PHY-layer fairness in amplify and forward cooperative diversity systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(3): 1073-1083
- [6] Shi J, Yu G, Zhang Z, et al. Partial channel state information based cooperative relaying and partner selection. In: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Hong Kong, China, 2007. 976-980
- [7] Song S, Son K, Lee H, et al. Opportunistic relaying in cellular network for capacity and fairness improvement. In: *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference*, Washington, D.C., USA, 2007. 4407-4412
- [8] Bletsas A, Khisti A, Reed D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659-672
- [9] Cai J, Shen X, Mark J W, et al. Semi-distributed user relaying algorithm for amplify and forward wireless relay networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1348-1357
- [10] Nosratinia A, Hunter T E. Grouping and partner selection in cooperative wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(2): 369-378

Research on relay selection in multi-user cooperative wireless networks

Liang Min, Wang Yafeng, Yang Dacheng

(Wireless Theories and Technologies Laboratory, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

The paper proposes two novel semi-distributed relay selection algorithms based on different system overheads in multi-user cooperative wireless networks. The algorithms formulate the relay selection problem as an assignment problem of making the outage probability of the system minimal, and obtains the sub-optimal matching with the low system overhead and computational complexity by utilizing the characteristics of the multi-user cooperative networks. The simulations show that the proposed algorithms can press the outage probability close to the lower bound and ensure the fairness for users. Moreover, the algorithm 2 gets the better capacity performance than the algorithm 1 with the more system overhead. The proposed algorithms achieve good tradeoff between the performance and the system overhead, which can simplify the application of relay selection in practical wireless communication networks, especially in the densely populated areas.

Key words: relay selection, scheduling, user cooperation, opportunistic relaying, cooperative networks