

一种基于放大转发的中继选择策略

惠鏹^{1,2}, 朱世华¹, 李国兵¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 710048, 西安)

摘要: 针对传统多中继放大转发协作通信网络中所有潜在中继均参与协作, 导致系统的低资源利用率问题, 提出了一种中继节点选择策略. 该策略以最小化系统中断概率为目标, 引入了中继节点的选择门限, 并据此逐一令低于门限的中继节点不参与协作, 将其资源重新分配给其他节点, 从而提高系统资源利用率. 所提策略运算开销小, 且选择门限只与中继节点数、平均信道增益以及当前系统信噪比有关, 可在传输开始前事先确定而无需实时更新, 从而节省了系统开销. 仿真实验表明, 与所有潜在中继都参与协作的方法相比, 所提策略在中断概率为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 时可获得约 3~4 dB 的信噪比增益.

关键词: 协作通信; 放大转发; 中继选择

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)04-0450-04

Relay Selection Scheme in Cooperative Networks with Amplify-and-Forward Protocol

HUI Hui^{1,2}, ZHU Shihua¹, LI Guobing¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to avoid the resource inefficiency of all-participated cooperations in amplify-and-forward cooperative communication networks, a new relay selection scheme is proposed. A threshold for relay selection is introduced to minimize the outage probability and then relays below the threshold are excluded in turn from the cooperation so that their released resources can be reallocated to other relays to improve resource efficiency. The proposed scheme has low computation complexity and low system cost since the threshold is only determined by the number of the selected relays, the average channel state information and the signal-to-noise ratio, and can be given before transmission starts with no real-time updating. Simulation results show that the proposed relay selection scheme outperforms the conventional schemes in outage behavior.

Keywords: cooperative communication; amplify-and-forward; relay selection

协作通信技术利用多个不同用户的天线组成虚拟天线阵, 从而获得类似 MIMO 系统的性能增益, 其概念最早由 Sendonaris 等人^[1-2]提出. Laneman 等人^[3]研究了瑞利衰落环境下的各种协作通信协议, 如解码转发、放大转发等, 并将由协作带来的分集称为协作分集.

协作分集的基本思想是源节点通过中继的帮助

向目的节点传送信息, 近年来已有很多文献^[4-6]对多中继协作通信系统的功率分配策略进行了研究. 在这些文献中所有潜在的中继节点都参与协作传输, 这样做的缺点是信道条件恶劣的中继依然占用系统资源, 而对系统性能的提高十分有限. 因此, 如何选取中继, 从而有效利用系统资源, 成为一个值得关注的问题. 文献^[7-8]的中继选择策略要求已知实时信

道状态信息,这在实际系统中是很难满足的.为此,本文针对放大转发协作通信网络,以降低系统平均中断概率为目标,提出了一种基于平均信道状态信息的中继节点选择策略.

1 系统模型

考虑一个无线通信网络,将某时刻要发送信息的节点集合表示为 $S=\{1,2,\dots,K\}$,则 S 中每个节点都是源节点,向各自的目的节点 $D_i \notin S, (i=1,2,\dots,K)$ 发送信息,将每个源所传输的数据称为一个数据流,则根据源节点的不同,共有 K 个数据流.以下将源节点为 $i(i \in S)$ 的数据流简称为数据流 i .源节点可在 S 中选择除自己以外的任意一个或几个节点作为中继,帮助自己向目的节点传送信息,这样它最多可有 $K-1$ 个中继.

传输过程分为 2 个阶段:① 源向所有潜在中继及目的节点广播信息;② 被选中中继向目的节点转发信息,因为节点以半双工方式工作,所以中继接入控制要保证各节点不会在同一时间、同一子带上同时发送和接收信息.图 1 所示的是所有潜在中继都被选中时的传输过程,它满足了上述要求.



图1 中继接入方式

设系统总带宽为 W ,则一个数据流所占用的带宽是 W/K .本文中某一数据流的传输速率 $\tilde{R}$ 由带宽归一化为 $R=\tilde{R}/W$,互信息量也由 W 归一化.用 $\tilde{p}_{ij} (i \neq j)$ 表示中继 i 为传输数据流 j 所使用的功率, $\tilde{p}_i$ 表示源节点 i 的发射功率.假设所有节点之间的信道为随机的、相互独立的频率非选择性信道,信道慢衰落,任意两节点 i, j 间的信道系数 h_{ij} 是 0 均值循环对称复高斯随机变量,其方差为 $E[|h_{ij}|^2] = \Omega_{ij}$,任意节点 i 与数据流 j 的目的节点 D_j 间的信道系数 h_{D_j} 也是 0 均值循环对称复高斯随机变量,其方差为 $E[|h_{D_j}|^2] = \Omega_{D_j}$.噪声为独立的 0 均值加性高斯白噪声,噪声功率为 σ^2 .假设各节点发射的基带信号是独立的高斯分布的随机变量,均值为 0,方差等于各自的平均发射功率,当源节点的发射功率为 $\tilde{p}_i$ 时,中继 j 和目的节点 D_i 的瞬时信噪比分

别为 $\gamma_{ij} = K\tilde{p}_{ij}|h_{ij}|^2/\sigma^2$ 和 $\gamma_{D_i} = K\tilde{p}_{ij}|h_{D_i}|^2/\sigma^2$.同理,当中继的发射功率为 $\tilde{p}_{ij}$ 时,目的节点的瞬时信噪比为 $\gamma_{D_j} = K\tilde{p}_{ij}|h_{D_j}|^2/\sigma^2$.为简化表达式,令 $p_{ii} = K\tilde{p}_{ii}, p_{ij} = K\tilde{p}_{ij}$.

2 中继节点选择策略

对某数据流 i ,令所选择的中继节点集合为 Φ_i ,在初始状态下所有潜在中继节点都参与协作通信.目的节点采用最大比合并的方法对接收信号进行处理,针对放大转发策略,其瞬时互信息量为

$$I_i = \frac{1}{K} \ln \left(1 + \gamma_{D_i} + \sum_{j \in \Phi_i} \frac{\gamma_{ij} \gamma_{jD_i}}{1 + \gamma_{ij} + \gamma_{jD_i}} \right) \quad (1)$$

数据流 i 的中断概率为

$$P_{\text{out}}^{(i)} = P_r(I_i < R) =$$

$$P_r \left(\gamma_{D_i} + \sum_{j \in \Phi_i} \frac{\gamma_{ij} \gamma_{jD_i}}{1 + \gamma_{ij} + \gamma_{jD_i}} < 2^{KR} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: $P_r(\cdot)$ 表示括号内事件发生的概率; $\gamma_{D_i} + \sum_{j \in \Phi_i} \frac{\gamma_{ij} \gamma_{jD_i}}{1 + \gamma_{ij} + \gamma_{jD_i}}$ 是一个分布函数十分复杂的随机变量^[4],导致中断概率的闭式表达很难进一步分析.不过在大信噪比条件下,由文献[4]可以得到中断概率的近似表达式

$$P_{\text{out}}^{(i)} \approx c^{(i)} \frac{1}{p_{ii} \prod_{j \in \Phi_i} (p_{ii} + \frac{\alpha_{ij}}{p_{ji}})} \quad (3)$$

其中 $\alpha_{ij} = \Omega_{ij}/\Omega_{jD_i}$, $c^{(i)} = [(2^{KR} - 1)\sigma^2]^K / (K! \cdot \Omega_{D_i} \prod_{j \in \Phi_i} \Omega_{ij})$.文献[4]已证明在大信噪比条件下,式(3)可以很好地逼近实际的中断概率.

由此问题转化为,当各数据流功率受限时,如何选择中继使网络的平均中断概率最小,即

$$\min P_{\text{out}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_{\text{out}}^{(i)} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \Phi_i} p_{ji} \leq p_{\text{tot}} \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中: p_{tot} 是各数据流所能使用的最大功率.显然,对此问题的求解可以转化为针对各数据流的子问题的求解.下面我们将针对各数据流进行中继选择.

由于功率分配问题超出了本文的研究范围,在此我们采用文献[4]针对单个数据流提出的次最优功率分配方案.对数据流 i ,当存在 M 个中继节点时,源节点所分配的功率为

$$p_{ii} = \delta_0 p_{\text{tot}} \quad 0 < \delta_0 < 1 \quad (6)$$

剩下的功率在各中继节点中平均分配

$$p_{ji} = (1 - \delta_0) p_{\text{tot}} / M \quad j \in \Phi_i \quad (7)$$

式中: $\delta_0 = \frac{1}{1-M\alpha} \left[1 - \frac{\alpha M}{2(M+1)} \left(1 + \left(1 + 4 \frac{M+1}{\alpha} \right)^{1/2} \right) \right]$,

其中 $\alpha = \frac{1}{M} \sum_{j \in \Phi_i} \alpha_{ij}$.

设数据流 i 有 M 个中继节点时的中断概率为 $P_{\text{out}}^{(i)}(M)$, 中继节点集合为 Φ_i , 各节点所分配的功率是 p_{ji} , 去掉其中某节点 l 后中继节点集合为 Φ'_i , 各节点所分配的功率为 p'_{ji} . 要使剔除节点后中断概率降低, 必须使

$$P_{\text{out}}^{(i)}(M)/P_{\text{out}}^{(i)}(M-1) > 1 \quad (8)$$

由式(3)可得

$$\frac{P_{\text{out}}^{(i)}(M)}{P_{\text{out}}^{(i)}(M-1)} = \frac{(2^{(M+1)R} - 1)^{M+1}}{(2^{MR} - 1)^M (M+1)} \frac{p'_{ii}}{p_{ii}} \prod_{j \in \Phi'_i} \frac{1/p_{ii} + \alpha_{ij}/p_{ji}}{1/p'_{ii} + \alpha_{ij}/p_{ji}} \frac{(1/p_{ii} + \alpha_{il}/p_{li})\sigma^2}{\Omega_{il}} \quad (9)$$

令式(9)右边的各项分别为

$$A = \frac{(2^{(M+1)R} - 1)^{M+1}}{(2^{MR} - 1)^M (M+1)}$$

$$B = \frac{p'_{ii}}{p_{ii}} \prod_{j \in \Phi'_i} \frac{1/p_{ii} + \alpha_{ij}/p_{ji}}{1/p'_{ii} + \alpha_{ij}/p_{ji}}$$

$$C = \frac{(1/p_{ii} + \alpha_{il}/p_{li})\sigma^2}{\Omega_{il}}$$

分析上述各项不难看出, 由于中继节点减少后剩余各节点所分配的功率增加, 即 $p'_{ii} \geq p_{ii}$, $p'_{ji} \geq p_{ji}$, 所以 $B \geq 1$. 因此, $AC > 1$ 是式(8)的充分条件.

将式(6)、式(7)代入表达式 C , 并令 $R_{\text{SN}} = p_{\text{tot}}/\sigma^2$ 为系统信噪比, 整理可得

$$C > \frac{4}{R_{\text{SN}}} \left(\frac{M}{\Omega_{il}\Omega_{li}} \right)^{1/2} \quad (10)$$

当中继节点 l 满足下式时, 就可将它剔除

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{il}\Omega_{li} &\leq T_r \\ T_r &= 16MA^2/R_{\text{SN}}^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 一个节点是否作为中继参与协作取决于源到该中继与该中继到目的节点的平均信道增益的乘积 $\Omega_{il}\Omega_{li}$. 另外, 节点选择的门限和当时的潜在中继节点个数、目标传输速率以及系统信噪比有关. 选择门限是中继节点个数的单调递增函数, 同时又随着 R_{SN} 的增加单调递减. 因此, 潜在中继的个数越少, 门限值就越低, 潜在中继就越难被去掉, R_{SN} 越高, 门限也越低, 会有更多节点作为中继被保留. 数据流 i 选择中继的具体步骤如下:

(1) 初始状态下认为所有潜在中继节点都参与协作, 此时 $M=K-1$, 中继节点集合 $\Phi_i = \{1, 2, \dots, K\} \setminus \{i\}$, 根据式(11)计算初始中继选择门限 $T_r^{(0)}$;

(2) 计算各潜在中继的 $\Omega_{il}\Omega_{li}$ 并排序, 找到最小

值 $g_{\min} = \min_{l \in \Phi_i} \{\Omega_{il}\Omega_{li}\}$;

(3) 若 $g_{\min} < T_r$, 则从集合 Φ_i 中去掉该中继, 更新 Φ_i , 否则转步骤(5);

(4) $M=M-1$, 更新门限值 T_r , 若 $M=1$, 转步骤(5), 否则转步骤(3);

(5) 结束.

由于上述步骤只利用了平均信道增益和节点数目等信息, 因此本文的中继选择门限可在传输开始前事先确定而无需实时更新, 从而节省了系统开销. 此外, 在完成上述步骤后, 为进一步提高系统资源利用率, 将被剔除节点所占用的资源分配给源到中继与该中继到目的节点的平均信道增益的乘积最大的中继节点. 这种资源分配方式的效果在随后的仿真中得到了验证.

3 仿真实验结果

本文对中继选择策略的效果进行了数值计算和蒙特卡罗仿真. 为使结果具有一般性, 网络节点在 2×2 的 XOY 直角坐标系内随机产生, 分布如图 2 所示, 源节点为 1~5, 其相应的目的节点分别为 6~10, 即每个源节点有 4 个潜在的中继节点. 仿真中假设信道环境为准静态瑞利平坦衰落信道, 任意两节点之间的信道衰落系数服从均值为 Ω_{ij} 的瑞利分布, Ω_{ij} 与两节点之间距离 d_{ij} 的关系为 $\Omega_{ij} = d_{ij}^{-\eta}$, 其中 $\eta=4$ 是路径损耗指数. 各数据流的目标速率相同, 均为 $R=1 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$.

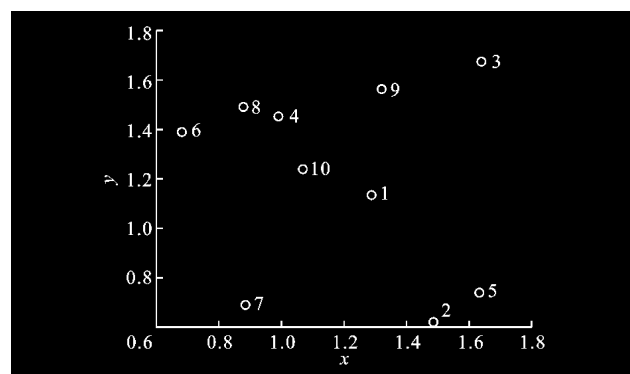


图2 节点分布图

表 1 给出了数据流 1 在不同 R_{SN} 情况下所选择的中继节点. 可以看到, 当 R_{SN} 较低时, 由于选择门限较高, 只有节点 4 参与协作, 随着 R_{SN} 的增加, 有更多的节点超过了选择门限, 于是按照平均信道增益

表 1 数据流 1 在不同 R_{SN} 下选择的中继节点

R_{SN}/dB	12	14	16	18	20	22	24
所选中继	4	4	4,5	4,5	4,5,2	4,5,2	4,5,2

益的乘积由大到小的顺序,潜在中继节点 4、5、2、3 依次参与协作. 结合图 2 可知,在小信噪比时,本文的中继选择策略将有限的功率和带宽资源分配给离源和目的节点较近的中继,避免偏远中继对整体性能的恶化,随着信噪比的增加,不断接纳更远的中继参与协作,从而获得大信噪比时的分集增益.

图 3 中的中断概率是系统中各数据流中断概率的均值,其中实线是按式(3)计算的数值结果,虚线则是蒙特卡罗仿真结果. 作为比较,我们还给出了传统算法和文献[4]提出的改进算法的中断概率性能曲线. 在这两种算法中,所有潜在的中继节点都参与合作,其中传统算法将功率在源与所有中继节点间平均分配,而改进算法则进行了功率的优化分配. 从图 3 中可以看出,在中断概率为 10^{-3} 处,本文算法比文献[4]改进算法带来 3 dB 左右的增益,比传统方法带来 4 dB 左右的增益.

此外,当信噪比较大时,蒙特卡罗仿真曲线与理论曲线几乎重合(图 3),这验证了式(3)在大信噪比条件下可以很好地逼近实际系统性能^[4],因此本文以该式为基础所提出的策略在大信噪比条件下有效. 同时,将仿真区间选择在 12~24 dB 之间,虽然在中低信噪比范围内式(3)的曲线与仿真曲线存在一定偏差,但本文策略在该范围内仍具有较高的性能增益. 因而说明,尽管本文提出的中继选择策略是根据高信噪比下的近似表达式推导得到,但在中低信噪比条件下依然有效.

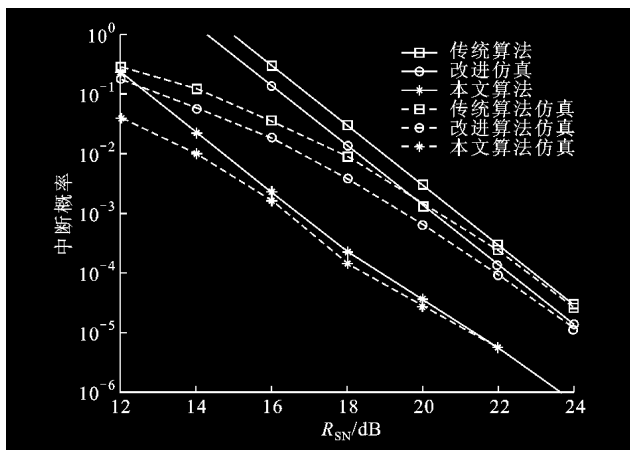


图3 中断概率的比较

4 结 论

本文针对多中继放大转发协作通信网络提出了一种中继节点选择策略,该策略在各数据流总功耗一定的条件下,根据信道平均状态信息对所有潜在

的中继节点进行动态选择,从而提高了系统资源的利用率. 本文策略运算开销小且无需实时更新. 仿真结果表明,采用本文策略对中继节点进行适当选择,能够有效提高系统的中断性能. 下一步的研究将考虑在本文策略的基础上进一步引入各节点间的功率分配策略.

参考文献:

- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity: part I: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [2] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity: part II implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [3] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [4] ANNAVAJALA R, COSMAN P C, MILSTEIN L B. Statistical channel knowledge-based optimum power allocation for relaying protocols in the high SNR regime [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 292-305.
- [5] HAMMERSTROM I, KUHN M, WITTNEBEN A. Impact of relay gain allocation on the performance of cooperative diversity networks [C]// IEEE Vehicular Technology Conference. Los Angeles, USA: IEEE Vehicular Technology Society, 2004: 1815-1819.
- [6] LI Y, VUCETIC B, ZHOU Z, et al. Distributed Adaptive power allocation for wireless relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(3): 948-958.
- [7] ZHAO Y, ADVE R, LIM T J. Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 3114-3123.
- [8] MADAN R, MEHTA N B, MOLISCH A F, et al. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay Selection [C]// IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, USA: IEEE Communications Society, 2006: 1-6.

(编辑 刘杨)