

动态多中继协同节点选择算法

覃琴^{1,2}, 曾志民², 张天魁², 张从青²

(1. 三峡大学计算机与信息学院 湖北 宜昌 443002; 2. 北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 海淀区 100876)

【摘要】为优化协同通信系统的性能,提出了一种动态多中继译码转发(DF)协同节点选择算法MRS-DF。该算法联合考虑节点的剩余能量信息和信道状态信息对网络生存时间进行优化,以获得更长的网络生存时间和更大的信道容量。仿真验证表明,动态分配中继功率时,选择4个中继性能已经达到最优。MRS-DF算法的网络生存时间和信道容量远大于仅考虑节点信道状态信息的中继选择算法。在10次仿真中,该算法网络生存时间平均延长201.1%,信道容量平均提高164.55%。

关键词 算法; 信道容量; 网络生存时间; 协作分集; 多中继选择; 优化; 剩余能量

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.04.005

Dynamic Multi-Nodes Relay Selection Algorithm

QIN Qin^{1,2}, ZENG Zhi-min², ZHANG Tian-kui², and ZHANG Cong-qing²

(1. College of Computer & Information Science, China Three Gorges University Yichang Hubei 443002;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract In order to optimize the performance of cooperative communication systems, a dynamic multi-relay decoded forwarding (DF) nodes selection algorithm MRS-DF is proposed. The algorithm jointly considers the residual energy information of nodes and channel state information (CSI) to optimize the network lifetime, to obtain longer network lifetime and greater channel capacity. Simulation results show that, for dynamic relay power distribution, the best performance can be reached by selecting 4 relays. The network lifetime and system channel capacity of MRS-DF algorithm are much larger than those only considering the channel state information nodes selection algorithm. In 10 simulations, the proposed algorithm can extend the network lifetime average of 201.1% and increase the channel capacity average of 164.55%.

Key words algorithm; channel capacity; cooperative diversity; multiple relay selection; network lifetime; optimization; residual energy

无线通信中,协同中继通过使特定区域内的用户形成虚拟天线阵列,达到空间分集的效果,从而有效抵抗多径衰落,显著提高用户的服务质量和系统吞吐量^[1]。在协作分集技术中,协同中继节点的选择以及源节点和中继节点间的功率分配是非常重要的^[2],即需从众多潜在在中继节点中选择最佳中继集合,既可使分集增益最大,又能够增加中继的可分配资源,减少系统复杂度和成本。

选取协同中继节点的关键是如何确定和管理中继节点数量。文献[3]提出机会中继(opportunistic relaying, OR)选择方法,分别讨论了译码转发和放大转发中协同通信的性能,主要是基于信道状态信息(channel state information, CSI)和网络拓扑进行中继选择;文献[4-5]分析了每个节点有自身独立功率

约束下的中继选择;文献[6]分析了在网络总发射功率约束下的中继选择。上述文献中,选择最佳单中继尽管可以提高系统性能,然而单个节点的处理能力和支持的能量是有限的,当信道处于深度衰落情况时,单个中继节点无法满足源节点的服务质量(QoS)需求。文献[7]讨论了采用穷举搜索法得到中继集合,选取集合中全部中继节点参与信息的转发,该方法的缺点是当中继数过多时,会产生严重的资源分散,而且由协同通信带来的性能增益将减小。针对选择中继集合中最优单中继和全部中继节点两种极端情况,文献[8]针对中继间功率分配,给出了中继选择和功率分配的联合优化实例。

协作分集应用于当前的无线网络时,由于终端大多使用电池供电,因此需要设计分布式且低功耗

的中继选择算法来最大化网络生存时间。通常网络生存时间采用网络中最先耗尽能量的节点生存时间来衡量,最大化网络生存时间即等价于最大化节点最小网络生存时间,故应尽可能均衡地消耗各节点的能量^[9]。文献[10]提出一种基于模糊评判的中继选择算法,对节点的剩余能量进行最佳单中继选择。文献[11]提出PARS的分布式中继选择协议,首先利用RTS/CTS机制交互所需信息,然后执行最佳功率分配算法(OPA),最后依据中继选择准则选择一个最佳中继。其中准则2和3采用节点剩余能量确定最佳中继,但仍局限为单中继选择。文献[12]同时考虑协同节点的信道状态信息CSI和剩余能量信息,选择一个最优的协同节点,并利用其完成协同传输,从而延长AF协同网络的生存时间。

本文在译码转发(decoded forwarding, DF)协同环境中,将单中继选择的思想推广到多中继选择中,针对节点的CSI和剩余能量信息,通过对参与协同的节点进行中继选择和动态功率分配,选择最大限度延长网络生存时间的中继集合,使节点间资源(信道、能量)得到共享,仿真结果证实该算法能有效提高网络生存时间和系统信道容量。

1 系统模型和问题描述

系统模型如图1所示。系统有1个源节点 S , 1个目的节点 D , N 个中继节点。假设每个中继仅有一个天线, S 和 D 之间无直连链路。

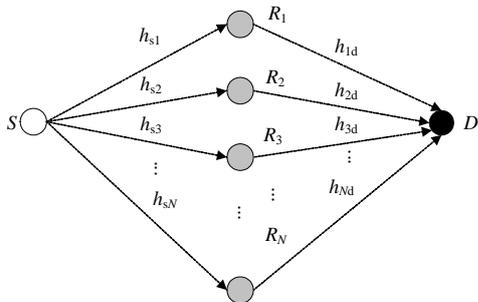


图1 系统模型

假设第 i 个中继节点仅知道自身两跳信道系数 h_{si} 、 h_{id} , 目的节点知道全部中继两跳信道系数。所有信道系数是i.i.d归一化瑞利随机变量。假设采用两阶段DF中继协议: 1) 源节点 S 以发射功率 P_s 广播发射, 发射范围内所有节点收到携带噪声的信号, 中继 i 接收功率为 $h_{si}P_s$ 。2) 假设有 M 个中继节点能够正确解码, 中继端能获得良好的同步。 K 个被选中继节点($K \leq M \leq N$)同时向目的节点发送信号, 目的端对接收到的多路信号进行最大比合并(maximal rate

combining, MRC)。 M 个中继节点首先估计自己的节点剩余能量 $E_r(i)$ 及源节点到它的CSI, 同时携带节点的剩余能量信息和源节点到中继的CSI, 向目的节点发送训练序列。目的节点通过接收的训练序列, 估计中继到目的端的CSI, 根据中继两跳CSI和每个中继节点的剩余能量进行综合评判, 并将结果报告给被选中继集合。

2 动态多中继协同节点选择算法

多中继协作是为增加分集增益和网络生存时间, 平衡中继上的资源利用^[13]。在每个中继链路经历严重衰落时, 由于衰落是随机独立的, 中继数量增加直接导致每个中继消耗的能量下降, 因此使网络生存时间更长。显然用户选择的中继越多, 该用户传输速率会越大, 但功耗和成本会增加。研究表明, 中继个数增加到一定值后, 性能增益会变小, 因此中继节点数量的选取有一个最佳值^[8]。针对节点剩余能量进行中继选择可以避免过度使用信道条件好的中继节点, 使网络的公平性不会受到损害。

2.1 算法设计

1) 每个中继节点根据两跳信道信息, 采用最小准则或调和平均准则计算信道函数^[13]:

$$\text{最小准则为 } H(i) = \min \{ |h_{si}|^2, |h_{id}|^2 \}。$$

$$\text{调和平均准则为 } H(i) = 2(|h_{si}|^2 + |h_{id}|^2)^{-1}。$$

2) 每个中继节点根据其当前剩余能量计算发射后剩余能量占每个节点总能量的比值 $E_r(i)$ 。假设中继节点发射需要消耗的能量为 $P \times T$ (T 为单位时间), 发送前剩余能量为 E_{ri} , 节点初始能量为 E_{0i} , 则中继节点剩余能量比值为:

$$E_r(i) = (E_{ri} - P) / E_{0i} \quad (1)$$

3) 设节点信道函数所占的权值为 W , 则剩余能量权值为 $(1-W)$, 计算所有 $i \in N$ 节点的信道能量加权函数有:

$$Q(i) = H(i) \times W + E_r(i) \times (1-W) \quad (2)$$

按降序排列, 用公式可描述为:

$$S_i = \arg \max_{i \in N} Q(i) \quad (3)$$

2.2 DF协议多中继节点选取步骤

考虑无直连情况, 假设 M 个中继节点能够正确解码。多中继选择过程为:

- 1) 将中继节点按 $Q(i)$ 降序排列, 即 $\{1, 2, \dots, M\}$;
- 2) 选择排在第1的中继节点, 比较其第1跳速率和第2跳速率, 如 $R_{s1} \leq R_{1d}$, 结束; 如 $R_{s1} > R_{1d}$, 则再选取次之的中继节点, 计算两个中继节点第2跳速

率之和, 与这两个节点第1跳速率的最小值进行比较。如果与第1跳速率相当, 则中继选择结束; 否则继续选取下一个中继, 直到第2跳速率之和与第1跳速率匹配为止, K 是最终选定的中继数。即:

$$\min_{i \in K} \{R_{si}\} \approx R_{\text{sum}} \quad (4)$$

$$R_{\text{sum}} = \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^K P'h_{id} / \sigma^2 \right) \quad (5)$$

由于可能有信道质量差但剩余能量高的节点被优先选择, 所以针对节点剩余能量的MRS-DF算法是次优的, 可保证健壮性差的中继不会参与协作, 虽然可能损失总的容量, 但其计算复杂度较低。

2.3 信道容量比较

比较仅考虑CSI的中继选择方案和考虑节点剩余能量RP的动态多中继选择方案的信道容量。在网络生存时间内, 分别计算两种方案在DF协议下目的端的总信道容量:

$$I_{\text{DF}}^{\text{total}} = 1/2 \min \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_s h_{si}}{\sigma^2} \right), \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^K \frac{P'h_{id}}{\sigma^2} \right) \right\} \quad (6)$$

式中, P_s 为源节点发射功率; σ^2 为噪声功率; 假设中继节点和目的节点噪声功率相同。

3 仿真结果和性能分析

在MRS-DF算法验证中, 使用网络生存时间作为主要指标来评价动态多中继选择算法的性能, 同时考虑采用该次优方案对系统总信道容量的影响。仿真中动态分配中继功率, 比较基于节点剩余能量的多中继选择方案和仅根据CSI进行中继选择方案的性能。另外对 W 权值的大小进行仿真, 选取最优权值。

假设有10个节点随机分布在以源节点和目的节点距离为直径的圆内。考虑大尺度路径损耗和小尺度衰落, 假设 h_{sj} (h_{jd}) 是零均值, 循环对称的复高斯随机变量, 路径损耗指数为2, 信道准静态变化, 即每隔一定数目的TTI信道才变化一次, 有利于比较网络的生存时间。噪声是均值为0, 方差为 N_0 的加性高斯白噪声。

假设所有中继都有相同的初始能量 E , 被选中继采用动态中继功率进行发射。动态中继功率指对每个选择的中继, 发射功率是“动态”变化的, 即每次发射总功率 P_{total} 一定, 为了简化算法, 总功率在每次选择的中继之间平均分配, 即:

$$P' = (P_{\text{total}} - P_s) / K \quad (7)$$

3.1 权值的选取对性能的影响

通过对比权值大小对网络生存时间和信道容量的影响, 确定权值的选取。首先归一化信道系数, 使得信道系数与剩余能量比例在同一个数量级上。

总信道容量与网络生存时间随权值的变化关系如图2所示。由图可知, 网络生存时间随权值的增大呈下降趋势, 而总信道容量随权值增大呈上升趋势, 这是因为权值增大, 意味着更多考虑信道的CSI, 当 $W=1$ 时, 基于RP和CSI的方案等同于仅基于CSI的方案。当 $W=0.47$ 时, 两条曲线相交, 此时总信道容量和网络生存时间获得折中。

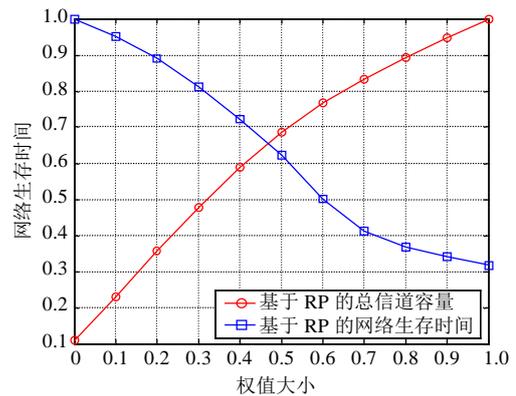


图2 总信道容量与生存时间随权值的变化关系

3.2 网络生存时间与中继个数的关系

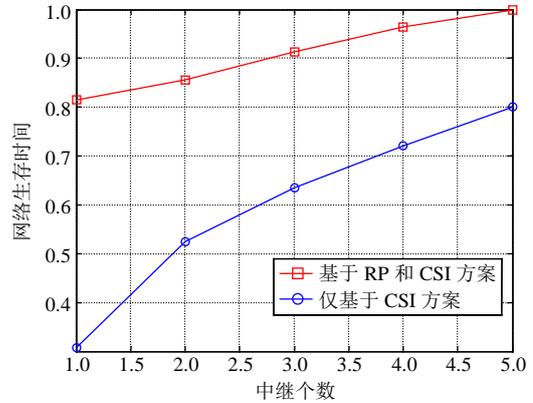


图3 网络生存时间与中继数目的关系(W=0.5)

从图3可以看出, 网络生存时间随中继数目的增加呈上升趋势, 但不论是基于剩余能量的动态多中继选择方案还是仅基于CSI的中继选择方案, 随着中继个数增加, 网络生存时间增长趋缓。由图3可知, 当选择4个中继时, 基于RP和CSI方案的性能已达到最佳, 再多选中继对性能的增益已影响很小。两个方案相比, 基于RP和CSI方案比仅基于CSI方案在中继个数为4时的网络生存时间提高了34%以上。

3.3 网络生存时间和信道容量的关系

表1说明两种方案的10次仿真中, 网络生存时间和信道容量的关系, 取权值 $W=0.47$, 信道准静态变

化。由于每次选择不同中继，因此网络生存时间不同。总体上，网络生存时间越长，系统能够达到的信道容量也越大。而且RP方案的网络生存时间和信道容量远大于CSI方案的网络生存时间和信道容量，RP方案的信道容量比CSI方案平均提高了164.55%，其网络生存时间平均延长201.1%。

表1 对网络生存时间和信道容量的比较

仿真次数	RP生存时间 /s	CSI生存时间 /s	RP信道容量 /bit·s ⁻¹	CSI信道容量 /bit·s ⁻¹
1	155	59	400.29	166.77
2	149	49	333.04	117.54
3	141	29	298.56	71.145
4	144	49	321.14	106.90
5	125	94	314.31	247.02
6	152	50	397.51	170.39
7	126	49	304.03	122.73
8	154	55	327.26	128.54
9	147	30	380.38	106.96
10	158	79	385.31	209.87

4 结束语

为优化协同通信系统的性能，提出了一种动态DF多中继协同节点选择算法MRS-DF，综合考虑节点的CSI和节点剩余能量进行排序，按照两跳速率匹配原则，选择最大限度延长网络生存时间的中继集合，提高了网络节点生存时间。本文采用动态中继功率分配，在信道准静态变化条件下，考察了权值的选取对系统信道容量和网络生存时间的影响，以及网络生存时间和信道容量的关系。仿真验证表明，所提算法能以较低的复杂度显著提高网络生存时间，使系统在总吞吐量和能量效率上有可观的增益。

参 考 文 献

- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part I, II[J]. IEEE Transactions Communications, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [2] IBRAHIM A S, SADEK A K, SU W F, et al. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with?[J]. IEEE Transactions on Wireless communications, 2008, 7(7): 814-2827.
- [3] BLEYSAS 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] CHIU Y N T, YU W. Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 328-339.
- [5] JING Y, JAFARKHANI H. Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders[J]. IEEE Transactions on Wireless communications, 2009, 8(3): 1414-1423.
- [6] MARIC I, YATES R D. Bandwidth and power allocation for cooperative strategies in Gaussian relay networks[C]//Asilomar Conference on Signals, Systems, Computers. Pacific Grove, CA: [s.n.], 2004: 1907-1911.
- [7] 彭木根, 王文博, 等. 协同无线通信原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 245-246.
PENG Mu-gen, WANG Wen-bo, et al. Cooperative Wireless Communication Theory and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 245-246.
- [8] 高伟东, 王文博, 袁广翔, 等. 协作通信中的中继节点选取和功率分配联合优化[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 68-71.
GAO Wei-dong, WANG Wen-bo, YUAN Guang-xiang, et al. Joint relay selection and power allocation optimization in cooperative communications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 68-71.
- [9] SANKAR A, LIU Z. Maximum Lifetime Routing in Wireless Ad-hoc Networks[C]//Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004). Hong Kong: IEEE, 2004: 1089-1097.
- [10] YANG W D, CAI Y M, XU Y Y. An energy-aware relay selection algorithm based on fuzzy comprehensive evaluation[C]//2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Wuhan: IEEE, 2009: 144-146.
- [11] CHEN Y, YU G D, QIU P L. Power-aware cooperative relay selection strategies in wireless Ad-hoc networks[C]//The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06). Helsinki: IEEE, 2006: 1-5.
- [12] HUANG Wan-jen, HONG Yao-win, KUO C C J. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks[C]//Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Hong Kong: IEEE, 2007: 814-818.
- [13] JING Y, JAFARKHANI H. Single and multiple relay selection schemes and their diversity orders [C]//In the ICC 2008 Workshop Proceedings. Beijing: IEEE, 2008: 349-353.

编辑 张俊