

文章编号: 1673-5196(2019)01-0107-05

基于信道质量和网络寿命的最优中继选择策略

薛建彬^{1,2}, 朱 恒¹, 邵 华¹

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对中继节点因剩余能量不足而不能长时间协作通信的问题, 在 HDAF 协作系统中, 提出了一种基于各中继节点信道状态信息(CSI)和剩余能量信息(REI)联合考虑的多中继集合选择方案. 该方案根据节点 CSI 和 REI 构造加权函数, 通过控制容量增益门限进行多节点选择. 仿真结果表明, 该方案在满足系统通信前提下, 很大程度上提升了系统的网络寿命; 与传统基于 CSI 中继选择方案相比, 该方案网络生存时间最高提升约 19.8%.

关键词: 协作通信; 混合译码放大转发; 中继选择; 网络寿命; 中断概率

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A

Optimal relay selection strategy based on channel quality and network lifetime

XUE Jian-bin^{1,2}, ZHU Heng¹, SHAO Hua¹

(1. School of Computer and Communication, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Lab of Mobile Communication, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aimed at the problem that the relay node can not perform the cooperative communication for long time in HDAF cooperative system due to the lack of residual energy, a multi-relay set selection scheme was proposed based on joint consideration of the channel state information (CSI) and residual energy information (REI) of every relay node. In this scheme a weighting function was constructed according to the CSI and REI of the nodes and the multiple nodes selection was performed by means of controlling the capacity gain threshold. The simulation result showed that the proposed scheme would improve the network lifetime of the system to a large extent on the premise of satisfaction to the system communication. Meanwhile, compared with the traditional relay selection scheme based on CSI, this scheme could increase the maximum network lifetime by about 19.8%.

Key words: cooperative communication; hybrid decoding-amplifying-and-forwarding; relay selection; network lifetime; outage probability

作为 5G 移动通信的关键技术之一, 协作通信能够利用虚拟天线阵列实现分集增益^[1], 具有速率快、可靠性强和传输距离远等特点, 现已成为无线通信领域研究的热点. 在不同的信道环境下, 如何从众多潜在的候选中继节点中选择一组最优中继集合参与通信, 对绿色通信^[2]的推广以及性能的提高都具有非常重要的意义. 目前, 协作中继技术采用的策略主要有放大转发(amplify-and-forward, AF)^[3]和译码转发(decode-and-forward, DF)^[4]两种主流的协作方式. DAI 等^[5]基于双向 AF 中继策略提出了联

合考虑信道统计特性及剩余能量的中继选择方案, 该方案在保证系统总速率处于较高前提下, 延长了网络运行时间. 王莹等^[6]针对双向认知无线网络, 对接收信号采用 DF 协议处理, 提出了一种优化的中继节点选择方案, 很大程度上提高了系统吞吐量并延长网络寿命.

以上研究均采用 AF 或 DF 单一中继协议提高了网络寿命, 但仍存在不足. 中继节点转发数据时, 采用 AF 协议, 指令开销少且复杂度较低, 然而中继放大有用信号的同时也放大了噪声, 一定程度上抑制了系统的性能; 采用 DF 策略, 中继将收到的数据符号译码后重新编码转发, 减小了噪声的影响, 然而中继译码错误会导致通信失败. 混合译码放大转发协作通信(HDAF, hybrid decode-amplify-and-for-

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61461026)

作者简介: 薛建彬(1973-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授.

ward) 结合二者的特点, 避免了采用单一协议的不足, 能更大化优化系统的性能. 肖海林等^[7-8] 研究了基于 HDAF 系统下多中继选择与功率分配, 与单一协作方式相比, 该方案很大程度上降低了通信被中断的概率. 该工作局限于一次数据传输, 未考虑节点是否剩余充足的能量, 无法保证系统长时间连续通信.

基于以上文献的考虑, 本文针对 HDAF 协作通信系统多中继场景提出了一种最优中继集合选择方案, 综合考虑节点信道状态信息 (channel state information, CSI) 和剩余能量信息 (residual energy information, REI). 仿真表明, 与传统基于 CSI 中继选择方案相比, 本文方案在保证系统中断概率较低的情况下同时延长了网络的生存时间.

1 系统模型

考虑一个多中继协作通信系统模型 (如图 1 所示), 该系统由一个源节点 S 、 N 个潜在候选中继节点和一个目的节点 D 组成. 考虑到实际通信, 中继节点在相同频段上很难同时收发数据. 因此, 本文所有中继节点均设置为单天线, 采用半双工通信模式传输数据, 即发送信号与接收信号不能同时进行. 本文侧重于研究中继链路的网络寿命情况, 假设源节点与目的节点之间不存在直接链路, 所有通信均借助于中继协作完成, 各节点之间的信道均为独立的服从瑞利平坦衰落信道.

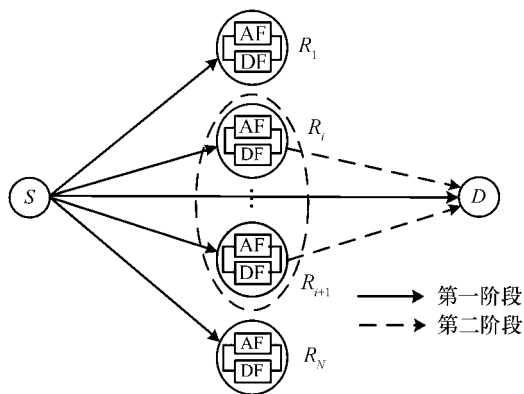


图 1 系统模型
Fig.1 System model

在本系统中, 由于中继的介入, 整个通信过程可以分为两个阶段. 在第一阶段, 源节点 S 向所有中继节点 R_i 广播信号 x , 中继节点 R_i 接收到的信息表达式为

$$y_{si} = \sqrt{P_s} h_{si} x + n_{si} \quad (1)$$

式中: P_s 表示源节点 S 的发射功率; h_{si} 表示 S 至中

继节点 R_i 链路之间的信道系数, 且服从均值为 0、方差为 Ω_{si} 的复高斯分布; n_{si} 表示均值为 0、方差为 N_0 的加性高斯白噪声 (additive gauss white noise, AGWN).

在第二阶段, 源节点不再发送任何信息, 从候选节点中选出 M 个构成最优中继集合, 被选择的中继均采用 HDAF 中继策略, 同时在二阶段末, 对目的节点采用最大比合并 (maximum ratio combine, MRC) 技术处理多路接收信号. 若中继采用 AF 策略转发数据, 此时目的节点接收到的信息为

$$y_{id} = \mu h_{id} y_{si} + n_{id} \quad (2)$$

式中: P_i 表示中继节点 R_i 的发射功率; h_{id} 表示该中继到目的节点的信道系数, 服从均值为 0、方差为 Ω_{id} 的复高斯分布; $\mu = \sqrt{P_i / (P_s |h_{si}|^2 + N_0)}$ 为功率放大因子; n_{id} 表示均值为 0、方差为 N_0 的加性高斯白噪声. 此时目的节点 D 的信噪比为

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{si} \gamma_{id}}{\gamma_{si} + \gamma_{id} + 1} \quad (3)$$

若中继节点 R_i 采用 DF 策略转发数据, 则目的节点接收到的信息可表示为

$$y_{id} = \sqrt{P_i} h_{id} \hat{x} + n_{id} \quad (4)$$

式中: \hat{x} 表示数据 x 译码后再编码的数据符号. 此时目的节点 D 的信噪比为

$$\gamma_d = \gamma_{id} \quad (5)$$

2 中继选择

HDAF 中继策略的思想是: 如果中继节点能正确译码源节点广播的信息, 则该中继采用 DF 策略; 反之采用 AF 策略. 本节主要描述如何从 N 个候选中继节点中选择一个最优集合参与协作.

基于信道质量中继选择策略, 能较大程度降低系统的中断概率, 提高系统的可靠性. 在协作通信系统中, 中继主要由电池供电, 电池由于其固定的总能量而具有一定的寿命. 不失一般性, 本文定义系统内中继节点最先耗尽剩余能量的时间来衡量网络的寿命. 如果参与协作的中继信道质量很好, 剩余能量却不足, 则无法保证长时间通信. 因此, 在选择中继时, 就需要考虑系统的网络寿命, 以保证通信能够顺利地进行. 为保证通信长时间稳定地进行, 本文针对 HDAF 通信系统提出联合考虑 REI 及 CSI 的中继选择方案.

2.1 联合 REI 和 CSI 的中继选择

假设选择 M 个中继组成的集合参与通信, 系统的性能最优. 根据香农公式^[9], 基于 HDAF 中继策

略的互信息量可以表示为

$$I_{\text{HDAF}} = \frac{1}{M+1} \log_2 \left(1 + \sum_{i \in C} \gamma_{id} + \sum_{i \notin C} \frac{\gamma_{si} \gamma_{id}}{\gamma_{si} + \gamma_{id} + 1} \right) \quad (6)$$

式中: $\gamma_{si} = \frac{P_s |h_{si}|^2}{N_0}$ 和 $\gamma_{id} = \frac{P_i |h_{id}|^2}{N_0}$ 分别为链路 $S \rightarrow R_i$ 及 $R_i \rightarrow D$ 信噪比; 系数 $1/(M+1)$ 因通信需要 $M+1$ 个不同时隙; C 表示参与协作的中继能正确译码的集合, $|C|$ 为该集合的势. 在 $P_s = P_i = P$ 等功率下, 令 $P/N_0 = \gamma$, 且在高信噪比下, 式(6)可以简化为

$$I_{\text{HDAF}} = \frac{1}{M+1} \times \log_2 \left(1 + \gamma \sum_{i \in C} |h_{id}|^2 + \gamma \sum_{i \notin C} \frac{|h_{si}|^2 |h_{id}|^2}{|h_{si}|^2 + |h_{id}|^2} \right) \quad (7)$$

传统中继选择方案大多为基于信道质量和基于中继剩余能量, 前者是基于 CSI 找出一组满足式(7)的最大中继集合, 而忽略了节点剩余能量; 后者仅考虑中继剩余能量而忽略了信道的质量状况, 在信道衰落严重情况下, 通信不理想甚至失败. 本文方案综合考虑信道质量以及节点的剩余能量, 对这两参数构造加权函数寻找最优中继集, 其具体算法步骤如下:

1) 根据所有中继节点的瞬时信噪比值 γ_{si} 是否大于给定的信噪比门限值 γ_{th} , 将中继分为 DF 策略候选集合 ψ_{DF} 和 AF 策略候选集合 ψ_{AF} , 具体表示如下:

$$\psi_{\text{DF}} = \{R_i \mid \gamma_{si} > \gamma_{th}\} \quad (8)$$

$$\psi_{\text{AF}} = \{R_i \mid \gamma_{si} \leq \gamma_{th}\} \quad (9)$$

2) 归一化信道系数, 使信道系数与剩余能量比值在同一数量级上. 按照以下准则, 每个中继根据各自的信道系数计算信道函数 $H(i)$:

$$H(i) = |h_{id}|^2, \quad i \in \psi_{\text{DF}} \quad (10)$$

$$H(i) = |h_{si} h_{id}|^2 / (|h_{si}|^2 + |h_{id}|^2), \quad i \in \psi_{\text{AF}} \quad (11)$$

3) 假设已知每个中继的剩余能量为 E_{ci} 及初始能量 E_{oi} , 转发信息需要消耗能量为 $P_i \times T$ (T 为一个时间单位), 参与通信后节点剩余能量的比值为

$$E_{ri} = (E_{ci} - P) / E_{oi} \quad (12)$$

4) 设中继节点信道函数的加权因子为 W , 则剩余能量比值的加权因子为 $(1-W)$, 计算所有中继节点的加权函数 $Q(i)$ 值:

$$Q(i) = W \times H(i) + (1-W) \times E_{ri} \quad (13)$$

并对 $Q(i)$ 值按降序排列, 此时中继为 $R_i (i=1', 2', \dots, N')$.

5) 中继集合选取过程: 初始化容量 $I_1 = \log_2(1 + \gamma_{s1'})$, 初始最优中继集合 $S_0 = \emptyset$. 根据排序公式依次检测中继, 选择 $S_i = R_i \cup \{S_{i-1}\}$, 此时容量更新为

$$I_i = \log_2 \left(1 + \sum_{i \in C} \gamma_{i'd} + \sum_{i \notin C} \frac{\gamma_{si'} \gamma_{i'd}}{\gamma_{si'} + \gamma_{i'd} + 1} \right)$$

若信道容量增益大于预设门限值 Δ_1 时, 则将中继 R_i 加入协作中继集合 S_i , 并从候选中继剔除 R_i . 接着检测加权函数值次之的中继, 否则结束, 具体流程如图 2 所示.

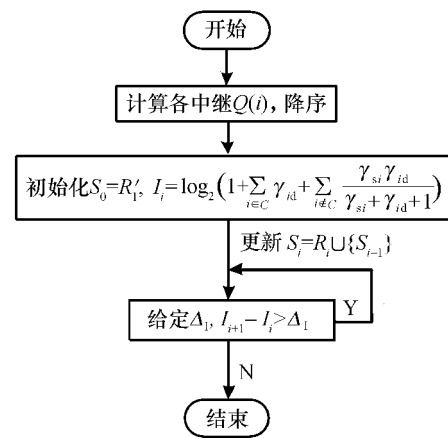


图 2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flowchart

2.2 性能分析

本小节主要推导了在高信噪比条件下, 本方案的平均中断概率理论近似表达式. 中断概率定义为接收端信息速率小于目标速率. 基于 HDAF 系统, 本方案平均中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = \sum_C P_r(C) P_r(I_{\text{HDAF}} < R_{th} \mid C) \quad (14)$$

式中: R_{th} 为系统目标信息速率; 由泰勒公式, 当 $x \rightarrow 0$ 时, 有 $\exp(-x) = 1, 1 - \exp(-x) = x$, 即在高信噪比下, $P_r(C)$ 可近似表示为

$$P_r(C) = \prod_{i \in C} P_r(\gamma_{si} > \gamma_{th}) \times \prod_{i \notin C} P_r(\gamma_{si} < \gamma_{th}) \approx \prod_{i \in C} \frac{\gamma_{th}}{\gamma \Omega_{si}} \quad (15)$$

$$P_r(I_{\text{HDAF}} < R_{th}) = \frac{[R(M)]^M}{\gamma^M M!} \prod_{i \in C} \frac{1}{\Omega_{id}} \prod_{i \notin C} \left(\frac{1}{\Omega_{si}} + \frac{1}{\Omega_{id}} \right) \quad (16)$$

γ_{th} 为中继译码正确所需的信噪比门限; 在高信噪比下, $f(x, y) = xy/(x+y)$ 是一个近似的指数分布^[10]; $R(M) = 2^{(M+1)R_{th}} - 1$.

将式(15,16)代入式(14), 系统的平均中断概率

可以近似表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{HDAF}} = \sum_C \left\{ \left(\prod_{i \in C} \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma \Omega_{si}} \right) \frac{[R(M)]^M}{\gamma^M M!} \prod_{i \in C} \frac{1}{\Omega_{id}} \prod_{i \notin C} \left(\frac{1}{\Omega_{si}} + \frac{1}{\Omega_{id}} \right) \right\} = \frac{[R(M)]^M}{\gamma^M M!} \prod_{i=1}^L \left[\frac{1}{\Omega_{id}} + \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma \Omega_{si}} \left(\frac{1}{\Omega_{si}} + \frac{1}{\Omega_{id}} \right) \right] \quad (17)$$

3 仿真分析

本节采用 MATLAB 工具对 HDAF 协作系统中断概率和网络寿命性能参数进行相应的数值评估.仿真实验中,假设所有的节点都处于同一个二维平面上,源节点 S 与目的节点 D 的距离为归一化 1,10 个候选中继节点均处于 S 与 D 之间的中心位置,信道系数呈准静态变化,且路径衰落因子为 3.仿真采用蒙特卡洛方法进行模拟,仿真通信次数为 10^5 ,主要仿真参数如表 1 所列.

表 1 仿真参数值

Tab.1 Simulation parameter value

参数	数值
固定发射功率 P/W	2
噪声功率 N_0/W	1
初始能量 E_{oi}/J	200
剩余能量 E_{ci}	[110;10;200]
加权因子 W	0.5
译码信噪比门限 γ_{th}	2
目标信息速率 $R_{\text{th}}/(bit \cdot s \cdot Hz^{-1})$	1.5

图 3 给出了在相同容量增益门限 Δ_1 下,本文方案与传统基于 CSI 中继选择的归一化网络寿命性能比较.从图中可以看出,两条曲线的网络寿命都随着 Δ_1 值的增大而有所提升.这是因为门限值的增大,使得参与协作的中继数量变少,同时在传输功率一定的情况下,系统内剩余能量更少的中继被排除

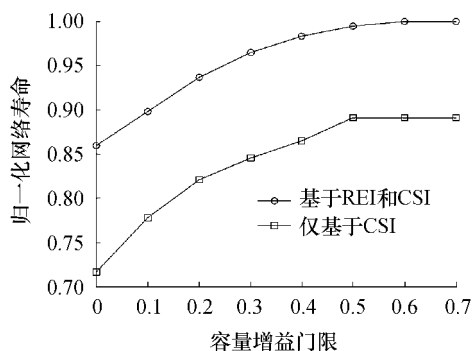


图 3 网络寿命与能量增益门限之间的关系

Fig.3 Relationship of network lifetime to energy gain threshold

掉,所以网络寿命增加.本方案联合考虑 REI 和 CSI,网络寿命明显高于仅考虑 CSI.且在 $\Delta_1=0.2$ 时,本方案较基于 CSI 中继策略相比,最高提升网络的寿命性能约为 19.8%,同时在 $\Delta_1>0.5$ 时,仅初始中继参与协作,两条曲线逐渐趋于水平.

图 4 给出了在不同数目的中继参与协作下,本文方案与基于 CSI 策略的网络寿命性能曲线.从图中可以看出,两种方案曲线随中继数目的增加同时呈现下降趋势.由于参与协作的中继数增加,越来越多剩余能量低的中继被选择进来参与协作,在发射功率一定的情况下,最先耗尽能量的时间变短,致使网络寿命不长.无论参与协作的中继数为多少,本文方案始终优于基于 CSI 策略.且在中继个数为 3 时,本文方案较基于 CSI 策略相比,最高提升了 12.3%.

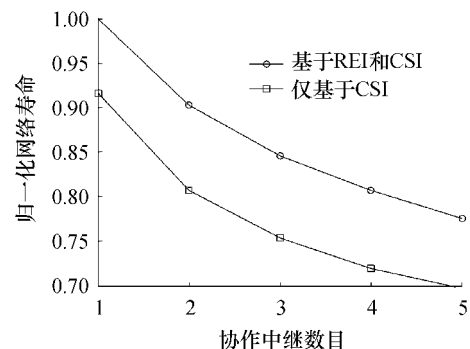


图 4 网络寿命与协作中继数的关系

Fig.4 Relationship of network lifetime to number of cooperative relays

图 5 给出了在不同中继数目参与协作下,本文方案与基于 CSI 的最优中继选择、基于 REI 的最优中继策略中断概率性能仿真曲线.从图中可以看出,随着参与协作的中继数目增加,三种方案中断概率呈上升趋势.由于基于 CSI 的中继选择以选择信道质量最好的一组中继参与协作,所以中断概率最小.

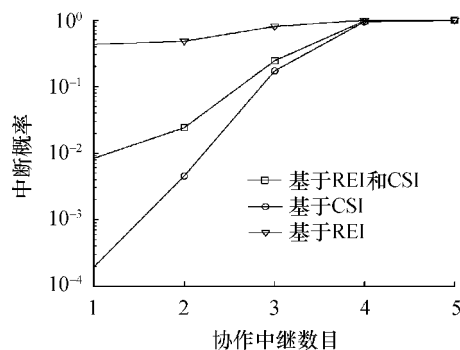


图 5 不同方案的中断概率性能比较

Fig.5 Performance comparison of outage probability of different schemes to each other

而本文算法综合考虑了信道质量与节点剩余能量,中断概率次之.而仅基于 REI 的中继选择算法忽略了信道质量的影响,仅仅考虑了节点的剩余能量,从而通信中断的概率最高.

4 结论

本文针对 HDAF 协作通信系统,提出了信道质量和网络寿命联合考虑的中继选择方案.该方案通过对节点的 CSI 及 REI 构造加权函数,计算各节点的加权函数值并降序排列,合理选择靠前的一组中继.仿真表明,本文方案在较低中断概率下,保证系统正常通信的同时延长了网络寿命,对节约成本及绿色通信具有非常重要的意义.本文方案所有节点均在固定功率下转发数据,对参与通信的各节点进行功率再分配,能进一步提高系统性能,在后续工作中将对这方面进行研究.

致谢:本文得到东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金项目(2014D13)的资助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] 孙立悦,赵晓晖,魏明.基于中断概率的协作通信中继选择与功率分配算法[J].通信学报,2013(10):84-91.
- [2] MAPHAPATRA R, NIJSURE Y, KADDOUM G, *et al.* Energy efficiency tradeoff mechanism towards wireless green communication: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 686-705.
- [3] HE Z, JIANG W, RONG Y. Robust design for amplify-and-forward MIMO relay systems with direct link and imperfect channel information [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 353-363.
- [4] HO-VAN K, SOFOTASIOS P C, ALEXANDROPOULOS G C, *et al.* Bit error rate of underlay decode-and-forward cognitive networks with best relay selection [J]. Journal of Communications & Networks, 2015, 17(2): 162-171.
- [5] DAI C, LI F, ZHANG Z. Residual energy based multi-relay selection and power allocation scheme in two-way relay network [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(4): 39-45.
- [6] 王莹,徐明月,张纬栋.认知双向中继系统下优化系统生存时间的中继选择策略[J].北京邮电大学学报,2013,36(6):102-107.
- [7] 肖海林,王丽元,闫坤,等.基于最优中继集合选择的 HDAF 算法[J].系统工程与电子技术,2015(2):400-405.
- [8] XIAO H L, HU Y, YAN K, *et al.* Power allocation and relay selection for multisource multirelay cooperative vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(11): 3297-3305.
- [9] 王琪,李茂富,洪梅,等.通信原理[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [10] HASNA M O, ALOUINI M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1126-1131.