

一种正交混合空时网络编码的中继通信算法

刘 艳 王子荣 朱性伟

(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

摘 要 针对无线网络中频谱利用效率较低以及网络吞吐量不足等问题,提出一种正交混合空时网络编码的中继通信算法(QHNR)。该算法通过系统模型分析了在传输周期中的 MAC 阶段和 BC 阶段中的中继通信方式以及节点发送数据的出错率,采用分级增益的方法来提高信道利用效率,提升系统性能,并通过中继概率来选择较好的中继节点。通过网络吞吐量和网络功率分配情况来分析 QHNR 算法的性能。实验仿真结果表明,QHNR 算法在提高网络吞吐量,提升信道利用效率上,相比采用 TWR 通信方案和 MWR 通信方案具有更好的效果。

关键词 中继通信,正交混合空时网络编码,分级增益,中继概率

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.11.038

Relay Communication Algorithm of Orthogonal Mixed Space-time Network Coding

LIU Yan WANG Zi-rong ZHU Xing-wei

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract Aiming at the problem of low spectral efficiency and insufficient network throughput in wireless communication network, a space-time quadrature hybrid relay communication network coding algorithm (QHNR) was proposed. The algorithm analyzes the relay communication mode on the MAC phase and BC phase during transmission cycle through the system model and the error rate while the nodes send data. The method of grading gain is used to improve channel utilization efficiency and promote the system performance, and then chooses the better relay nodes via relay probability. The performance of QHNR algorithm was analyzed by both network throughput and network power allocation. The experimental simulation results show that, compared with the TWR communication scheme and MWR communication scheme, QHNR algorithm has better results in improving the network throughput and promoting channel utilization efficiency.

Keywords Relay communication, Orthogonal mixed space-time network coding, Classification of gain, Probability of a relay

1 引言

随着无线通信技术的发展,人们对无线频谱资源的需求越来越大,这造成了频谱资源短缺,以及由于分配不合理导致频谱资源利用效率低等问题^[1]。为了提高无线频谱的利用效率并加快数据传输速率,越来越多的研究者开始采用网络间协作通信的中继技术来共享有限的传输资源,减小信道衰落的影响,提高系统通信的频谱效率^[2]。在协作通信网络中,中继节点采用半双工方式和网络编码技术来减少频谱损失,典型的中继方式包括了放大转发以及解码转发,中继节点功率分配以及中继节点选择都是研究中继算法的重要方向。

在中继算法的研究上, Van Der Mullen 和 Cover 等人^[3,4]较早取得成果,他们提出采用中继节点与其他节点之间的协作通信关系来构建网络模型,通过广播信道以及多址信道来提高通信效率。文献^[5]提出一种中断概率的协作通信中继选择与功率分配算法,该算法通过结合中继节点功率分配方法和当前信噪比来选择最优的中继节点。文献^[6]基于双向

不均等速率场景结合解码转发网络编码,提出一种双向机会中继通信模型,通过对模型的分析提出一种功率优化分配方法,以提高网络编码效率。文献^[7]提出在协作通信网络中,采用 MWR 通信方案与网络编码相结合的方法,考虑 MAC 阶段的数据传输和检测问题,来有效提高蜂窝中继通信系统的信道利用效率。

网络编码由 Ahlswede 等人^[8]于 2000 年提出,这是一种融合了路由技术和编码技术的信息交换方式,它基于图论的最大流-最小分割原理,来提高信息的传输效率。文献^[9]提出一种基于软信息网络编码的中继算法,该算法基于对数似然比并将估计-转发方法应用于中继通信网络中,降低了网络的平均误码率和功率消耗。文献^[10]提出基于网络编码的一种 P2P 流媒体算法,其通过网络编码来最大化组播吞吐量,提高带宽容量的利用率。

本文在系统模型中重点分析了 MAC 阶段和 BC 阶段的信号交互方式,针对 TWR 等通信方案信道增益情况不理想的问题, QHNR 算法根据节点发送出错率的情况,采用分级

到稿日期:2014-01-15 返修日期:2014-02-21

刘 艳(1987-),女,硕士生,主要研究方向为计算机网络,E-mail:liuyan6736@163.com;王子荣(1971-),男,硕士,高级工程师,硕士生导师,主要研究方向为计算机网络与分布式计算;朱性伟(1989-),女,硕士生,主要研究方向为计算机网络。

增益的方式来减少出错率,并实现信道增益。对于中继节点的选择,则采用比较节点中继概率大小的方法。在性能分析上,主要关注网络吞吐量和信道利用效率。在实验中也针对这两方面的性能进行了仿真测试和对比。

2 系统模型

假设有 N 个节点通过一个中继节点 K 来执行信息交互的任务,节点之间可以互相获取信息,节点通过天线可以收发信息,信息的传输周期包括了 MAC 以及 BC 阶段。假设在 MAC 阶段中,节点 T_1 和 T_2 分别向中继节点发送带有自身特征符号的信息 S_{T_1} 、 S_{T_2} ,此时中继节点 K 接收到的信号为:

$$y_K = \sum_{i=1}^N F_{T_1} S_{T_1} \cdot \sqrt{P_{T_1}} + \sum_{i=1}^N F_{T_2} S_{T_2} \cdot \sqrt{P_{T_2}} + \phi_{AB} \quad (1)$$

其中, F_{T_1} 、 F_{T_2} 表示节点 T_1 、 T_2 到中继节点的信道增益, P_{T_1} 、 P_{T_2} 分别表示节点 T_1 和 T_2 的发射功率, ϕ_{AB} 代表加性高斯白噪声。中继节点接收到信息 S_{T_1} 、 S_{T_2} 后,以功率 P_K 发送信号 S_K 至节点 T_1 和 T_2 :

$$S_K = \frac{\sum_{i=1}^N F_{T_1} S_{T_1} \cdot \sqrt{P_{T_1}} + \sum_{i=1}^N F_{T_2} S_{T_2} \cdot \sqrt{P_{T_2}}}{\sum_{i=1}^N \sqrt{P_K} (F_{T_1} + F_{T_2})} + \phi_{AB} \cdot \exp(N-1) \quad (2)$$

此时节点 T_1 和 T_2 的接收信噪比分别为:

$$\varphi_{T_1} = \frac{P_{T_1} P_K \cdot |S_{T_1} - S_K| + \lg \sqrt{F_{T_1} F_{T_2}}}{\sigma^2 (S_{T_1} + S_K - 1)} \quad (3)$$

$$\varphi_{T_2} = \frac{P_{T_2} P_K \cdot |S_{T_2} - S_K| + \lg \sqrt{F_{T_1} F_{T_2}}}{\sigma^2 (S_{T_2} + S_K - 1)} \quad (4)$$

其中, σ^2 表示 y_K 的方差。

在 BC 阶段,节点 T_1 和 T_2 从中继节点 K 处接收到的信号表示为:

$$y_T = \sum_{i=1}^N \lambda^{N-i} S_K \sqrt{P_K} + \sum_{i=1}^N \lambda^{N-i} S_K \frac{\sqrt{P_K} \zeta}{e^{\varphi} \cdot \lg P_K} + \phi_{AB} \quad (5)$$

其中, λ 指中继放大系数, ζ 指增益因子,由节点与中继节点之间的信道增益情况决定。 λ 可以表示为:

$$\lambda = u(P_K) / [1 + \zeta \frac{\sqrt{u(P_K)^3 \sigma^2}}{S_K} |e^{-\varphi}|] \quad (6)$$

其中, $u(\cdot)$ 表示修正贝塞尔函数, φ 表示信道系数。

为了提高信道增益,选择较好的中继节点改善系统的性能,采取正交混合的传输方案来实现分级增益,并选择最佳的中继节点。用 PER 表示节点 T_i 的误包率,通过切比雪夫界^[11,12]可以得到节点 T_i 的 PER 范围:

$$PER(T_i) = E_{AB} \left\{ \sum_{n=1}^L \left| \frac{\lambda \sqrt{P_{T_i}}}{2S_{T_i} + 1} \right|^L \cdot d + \exp[-p_{T_i} \frac{\zeta^2 \lambda^{3/2} d}{4S_{T_i}}] \right\} \leq \sum_{n=1}^L \frac{\lambda^2 \sqrt{P_{T_i}}}{4S_{T_i}} + \exp[-p_{T_i} d \sqrt{\frac{\zeta^2 \lambda^3}{3S_{T_i}}}] \quad (7)$$

其中, L 指分级增益阶数。可以看出,为了减少 PER ,需要适当减小传输距离中继放大系数,采用分级增益的传输距离与中继放大系数的关系可以定义为:

$$d = \sum_{S_{T_i} \neq 0} \lim_{k \rightarrow \infty} \left[\frac{\log PER(T_i)}{|\log \lambda| + 1} \right] \quad (8)$$

通过式(7)、式(8)可以实现分级增益,提高信道效益。

为了进行中继节点的选择,中继节点会根据信道增益情况进行排序,根据信道效益情况来决定某一节点的中继概率,

对于 T_i ,信道增益为 F_{T_i} ,发射功率为 P_{T_i} ,则中继概率为:

$$\rho(T_i) = \frac{\prod_{i \in N} (\log(F_{T_i} + \zeta) - \frac{1}{\lambda^2 + 1})}{\prod_{i+1 \in N} (\log(F_{T_{i+1}} + \zeta) - \frac{1}{\lambda^2 + 1})} P_{T_i} \quad (9)$$

中继网络再根据节点的中继概率大小来选择合适的中继节点,提升通信系统的性能。

3 性能分析

3.1 网络吞吐量分析

根据式(1)、式(5),可以得到节点 T_i 的吞吐量情况,采用香农公式^[13,14]可以求得:

$$G(T_i) = \sqrt{3} \cdot \lg \left(\frac{\lambda S_{T_i} |u(P_{T_i})|^2 (L-1)}{(1-PER(T_i))L + \zeta^2 \psi} \right) \quad (10)$$

引入正交混合的传输方案来实现分级增益时,可以得到 N 个节点和一个中继节点 K 组成的中继通信网络的吞吐量为:

$$G(N) = \frac{N-1}{2} \cdot \lg \left(\frac{\lambda^{N-1} \sum_{i=1}^N S_{T_i} \cdot |u(P_{T_i})|^2 (L-1)}{(N-1)^2 ((1-PER(T_i))L + \zeta^2 \psi)} \right) \quad (11)$$

相比基于 TDD 的单向中继通信方案以及双向中继通信方案,本文采用正交混合的传输方案实现分级增益,所得到的网络吞吐量更大。

3.2 网络功率分配

在整个中继通信网络中,由于通信过程包括了 MAC 和 BC 两个通信部分,节点的发射功率主要是分配给这两个通信部分,用于实现放大转发以及解码转发。当这两个阶段所分配的功率相等时,系统的性能达到最优;当某个阶段分配的功率过小时,则整个系统的通信性能也会随之下降。假设系统的总发射功率为 P_N ,节点数量为 N ,为了在通信系统的节点数量和总发射功率不变的情况下尽可能地提高系统性能,则分配给 MAC 阶段的功率为:

$$P_{MAC} = \frac{P_N}{N-1} \cdot \left(\log \frac{\sum_{i=1}^N \lambda P_{T_i} (\zeta^2 + 1)}{2\beta + 1} \cdot \exp \left[1 - \sum_{n=1}^N F_{T_i} \right] \right) \quad (12)$$

其中, β 表示功率增益因子,它的取值区间为(0.5,1)。

分配给 BC 阶段的功率为:

$$P_{BC} = \frac{P_N}{N-1} \cdot \left(\log \frac{\sum_{i=1}^N (\lambda^2 + 1) P_{T_i} (2\zeta - 1)}{2\theta} \cdot \exp \left[1 - \sum_{n=1}^N F_{T_i} \right] \right) \quad (13)$$

其中, θ 表示功率最大增益值,表示为:

$$\theta = \frac{P_N}{N(N-1)} \sqrt{(1-\beta)} \quad (14)$$

4 实验结果及分析

QHNR 算法采用 C++ 编程实现,在 Window 平台下进行仿真,仿真过程中采用瑞利衰落信道模型,设置加性高斯白噪声 ϕ_{AB} 为 1,采用的数字调制方式为 QPSK 调制,增益因子 ζ 设置为 0.8,信道系数 φ 设置为 1。通信网络的节点数 $N=100$,功率增益因子 β 取中间值,为 0.75。仿真对比组为 TWR 通信方案^[15]以及 MWR 通信方案^[16]。

图 1 为不同节点发射功率下的节点平均吞吐量。从图中

可以看出, QHNR 算法、TWR 通信方案、MWR 通信方案下的节点平均吞吐量都随着节点发射功率的提升而增加。而且图中 QHNR 算法的节点平均吞吐量随着发射功率的增加上升趋势越发明显, 并且在整个变化过程中一直领先于 TWR 通信方案和 MWR 通信方案。当功率 $W=12\text{W}$ 时, QHNR 算法的节点平均吞吐量为 21.4bit , 而 TWR 通信方案和 MWR 通信方案的分别为 15.7bit 和 17.9bit 。

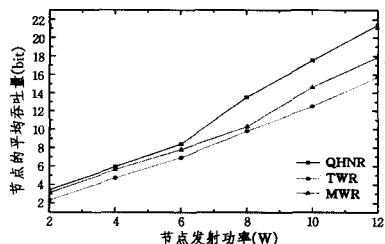


图1 节点平均吞吐量

图2和图3分别为当节点数量变化时, MAC 阶段、BC 阶段分配的功率占总功率的比重。当 MAC 阶段或 BC 阶段分配的功率越接近总功率的 50% 时, 系统的信道利用率情况越优。图2为对 MAC 阶段的功率分配情况进行仿真测试后所得到的结果。从图中可以看出, 当节点数目变化时, 采用 QHNR 算法在 MAC 阶段的功率分配处于 $0.46\sim 0.54$ 之间, 而 TWR 通信方案处于 $0.35\sim 0.61$ 之间, MWR 通信方案处于 $0.44\sim 0.62$ 之间。因此, 相比 TWR 通信方案或 MWR 通信方案, 采用 QHNR 算法在 MAC 阶段分配的功率更接近于总功率的 50%。

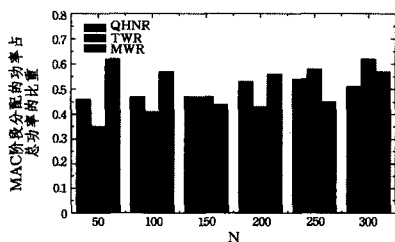


图2 MAC 阶段分配的功率占总功率的比重

图3为对 BC 阶段的功率分配情况进行了仿真测试后所得到的结果。从图中可以看出, 当节点数目变化时, 采用 QHNR 算法在 BC 阶段的功率分配处于 $0.47\sim 0.53$ 之间, 而 TWR 通信方案处于 $0.44\sim 0.59$ 之间, MWR 通信方案处于 $0.43\sim 0.61$ 之间。因此, 相比 TWR 通信方案或 MWR 通信方案, 采用 QHNR 算法在 BC 阶段分配的功率更接近于总功率的 50%。

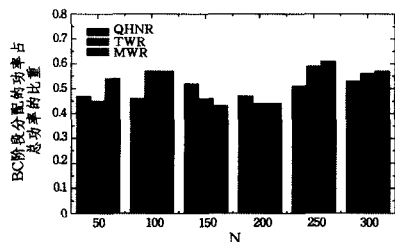


图3 BC 阶段分配的功率占总功率的比重

结束语 本文提出一种正交混合空时网络编码的中继通信算法。在该算法中, 分析了在 MAC 阶段和 BC 阶段, 节点与中继节点的信号交互方式, 根据信号传输时的错误率情况,

采用了分级信道增益的方法来提升系统性能, 以及推导出节点的中继概率来选择较好的中断节点, 并对采用正交混合的传输方案的网络吞吐量以及网络功率分配进行了分析。在实验过程中, 通过与 TWR 通信方案和 MWR 通信方案进行比较得到, QHNR 算法在网络吞吐量和提高信道利用率上性能更好。

参考文献

- [1] Saad A A, El-Naggar M F, Shehab_Eldin E H. Modeling and testing of multi-resolution morphological gradient distance relay algorithm[J]. Energy Procedia, 2012, 14: 271-279
- [2] Sharma S, Shi Y, Hou Y T, et al. An optimal algorithm for relay node assignment in cooperative ad hoc networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2011, 19(3): 879-892
- [3] Van Der Meulen E C. Three-terminal communication channels [J]. Advances in applied Probability, 1971: 120-154
- [4] Cover T, Gamal A E L. Capacity theorems for the relay channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1979, 25(5): 572-584
- [5] 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, 34(10): 84-91
- [6] 刘洪, 任术波, 项海格. 不均等双向解码转发机会中继通信性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2344-2350
- [7] Zhou Z, Teav K K, Vucetic B. Beamforming optimization and power allocation for mimo asymmetric multi-way relay channels [J]. Communications Letters, IEEE, 2012, 16(6): 820-823
- [8] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [9] 邓卫华, 王闻今, 金石, 等. 一种利用软信息网络编码在双向中继网络进行估计转发的方法[J]. 电子学报, 2012, 40(2): 308-312
- [10] 张志明, 周晋, 陈震, 等. 基于网络编码的对等网流媒体传输模型和算法[J]. 软件学报, 2012, 23(3): 648-661
- [11] Milewski J. Direct Diagonalisation of the Heisenberg Hamiltonian for a Magnetic Ring within the Two-Deviation Sector by Means of the Chebyshev Polynomials[J]. Reports on Mathematical Physics, 2012, 70(3): 345-359
- [12] Hosseini-Hashemi S, Akhavan H, Taher H, et al. Differential quadrature analysis of functionally graded circular and annular sector plates on elastic foundation [J]. Materials & Design, 2010, 31(4): 1871-1880
- [13] Majewski K, Koonert M. Conservative cell load approximation for radio networks with Shannon channels and its application to LTE network planning[C]//2010 Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT). IEEE, 2010: 219-225
- [14] Wang J T. Rate adaptation with joint receive diversity and power control for cognitive radio networks [J]. Computer Networks, 2011, 55(8): 1711-1718
- [15] Wu Y, Chou P A, Kung S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast[R]. MSR-TR-2004. 2005
- [16] Lee N, Lim J B, Chun J. Degrees of freedom of the MIMO Y channel: Signal space alignment for network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3332-3342