

协作通信中联合信道-网络编码的 性能分析与资源分配

吕政¹, 余志军², 刘海涛^{1,2}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网络与通信重点实验室,
200050, 上海; 2. 无锡物联网产业研究院, 214135, 江苏无锡)

摘要: 针对无线网络中用户到协作节点和目的节点的上行链路不可靠的问题,研究了协作通信系统中具有特定协作节点的协作方案. 在用户到协作节点的上行链路不可靠的情况下,将信道编码、网络编码同时引入到协作通信系统而建立了基于联合信道-网络编码的协作通信机制,并推导出系统中断概率的表达式;以中断概率作为系统性能的衡量标准,研究了能量分配、码率分配对系统性能的影响,给出了合适的分配方法. 仿真实验表明,即使用户到协作节点的上行链路不可靠,所提协作机制也能获得空间分集,从而提高了网络的性能.

关键词: 网络编码;信道编码;网络性能;协作通信;空间分集

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0083-05

Performance Study and Resource Allocation of Joint Channel-Network Coding in Cooperative Communication

LÜ Zheng¹, YU Zhijun², LIU Haitao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Wireless Sensor Network and Communications, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China; 2. Wuxi Sensing Net Industrialization Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214135, China)

Abstract: A cooperating mechanism with dedicated cooperating nodes is studied to solve the unreliability problem of up links from users to cooperating nodes and destinations in wireless communication system. In the case that up links from users to cooperative nodes are not reliable, both channel coding and network coding are introduced into the cooperative communication system to propose a cooperating mechanism based on joint channel-network coding. As a measure of system performance, the system outage probability is analyzed and an expression for the probability is derived. Effects of energy allocation and rate allocation on the system performance are analyzed based on the system outage probability, and then an appropriate allocation method is proposed. Analysis and simulation show that even though up links are not reliable, the proposed cooperating mechanism can still achieve spatial diversity, and improve the system performance.

Keywords: network coding; channel coding; network performance; cooperative communication; spatial diversity

无线网络中,通过利用无线信道的广播特性^[1],
无线信号的一次发送可被一个或多个中继节点所接

收. 中继节点位于源节点与目的节点之间,其根据信
道的质量来选择解码转发(Decode-and-Forward,

收稿日期: 2011-10-20. 作者简介: 吕政(1984—),男,博士生;刘海涛(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家
重点基础研究规划资助项目(2011CB302906);国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-006).

网络出版时间: 2011-12-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111229.1651.002.html>

DF)或放大转发(Amplify-and-Forward, AF)方式^[2-3]对收到的数据进行处理.目的节点将直接收到的数据与中继节点转发的数据进行合并解码,从而获得了空间分集,提高了系统的吞吐量^[4-6].

网络编码^[7]同样是利用了无线信道的广播特性,其通信的一次传输可被多个中间节点所接收,而数据经中间节点的网络编码后进行转发.在多播网络中,用不同的网络编码方法可以使网络的吞吐量达到最大流最小割定理的上界,在多跳网络^[8]和双向数据交换网络^[9]中,能够有效提高网络的性能.

协作通信能抵抗信道衰落,网络编码能大幅提高网络的吞吐量,二者结合能够进一步提升网络的性能.文献[10]将网络编码用于协作通信,从而达到了与传统协作方法相同的空间分集度,减少了硬件成本.文献[11]将网络编码和信道编码用于用户协作通信,并且分析了通信系统中2个用户相互协作时的中断概率.文献[12]将网络编码用于双向数据交换的正交频分多址(OFDMA)网络,来研究网络编码方案和算法.

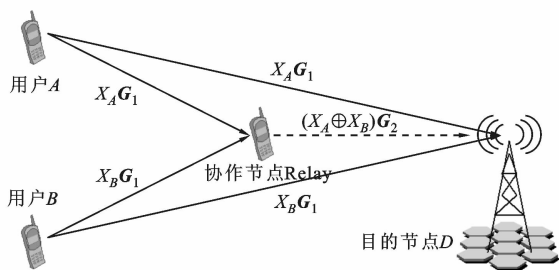
文献[10]假设从用户到协作节点的上行链路是完全可靠的,所以其协作机制和分析结果仅适用于假设场景,而在实际系统中,用户到协作节点的上行链路并非完全可靠.文献[11]方案尽管可以节省硬件成本,但是牺牲了网络吞吐量.本文在链路不可靠的前提下,研究了通信系统中具有特定协作节点的协作方案,结果是:将联合信道-网络编码引入到特定协作节点的通信系统中,并为此建了信道的协作机制;结合香农信道容量公式计算了系统的中断概率;分析了能量受限情况下的能量分配、码率分配对中断概率的影响,给出了分配系数的取值范围.

1 系统描述

1.1 系统模型

联合信道-网络编码的协作通信模型如图1所示,联合信道-网络编码的工作框图如图2所示.用户向目的节点发送数据分为2个阶段.在第1阶段,用户A、B采用线性分组码机制对数据进行信道编码,并将数据分割成若干编码组,每个编码组的bit数为 k ,每次对一个编码组进行信道编码,即 $X_i' = X_i \mathbf{G}_1, i \in \{A, B\}$,其中 $\mathbf{G}_1$ 为 $k \times N_1$ 矩阵, $N_1 = \alpha N$ 为 $\mathbf{X}'$ 的长度, $0 < \alpha < 1$ 为码率分配比例(表示协作节点的协作程度), N 为点对点直接通信时的包长度.编码结束后,2个用户用时分复用信道发送数据,由于信道具有广播特性,所有 X_i' 可能被协作节点和

目的节点均收到.在第2阶段,协作节点Relay(用符号C表示)对收到的数据先进行信道译码,再根据译码的结果有选择地进行网络编码,当2个用户的数据被正确地译码时,网络编码才可以进行.网络编码是先采用异或的方式进行处理,即作为中继的协作节点对用户A、B的数据进行异或处理后,得到 $X_A \oplus X_B$,再对 $X_A \oplus X_B$ 进行信道编码,得到 $\mathbf{X}_{AB} = (X_A \oplus X_B) \mathbf{G}_2$, $\mathbf{X}_{AB}$ 的长度为 $N_2 = (1 - \alpha)N$, $\mathbf{G}_2$ 为 $k \times N_2$ 矩阵.



X_A, X_B : 用户A、B为目的节点D发送的数据

图1 联合信道-网络编码的协作通信模型

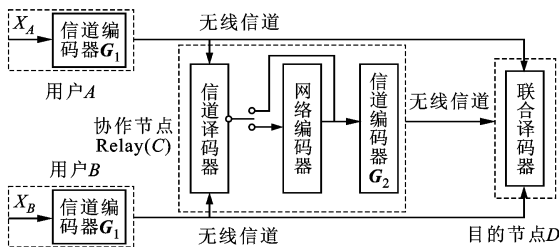


图2 联合信道-网络编码的工作框图

假设 P_T 为2个阶段的系统总发射功率,协作节点的发射功率占总功率的比例为 β (能量分配系数),若2个用户的发射功率相同,则二者的能量分配系数均为 $\frac{1-\beta}{2}$.协作节点C每bit的发射功率为

$\frac{\beta P_T}{(1-\alpha)N}$,用户每bit的发射功率为 $\frac{(1-\beta)P_T}{2\alpha N}$,其中 $\frac{P_T}{N}$ 表示点对点通信时每bit的发射功率.

1.2 信道模型

假设系统中所有无线信道相互独立,并属于服从瑞利分布的准静态衰落信道,理论上则认为每个阶段内信道保持不变.信道模型为

$$y_j = (P_i)^{1/2} h_{ij} s_i + n_j \quad (1)$$

式中: y_j 为 j 端接收到的信号, $j \in \{C, D\}$, D 为目的节点; P_i 为 i 端的发射功率, $i \in \{A, B, C\}$; $h_{ij} = g_{ij} / (d^{v_i})^{1/2}$ 为 i 到 j 的信道增益, g_{ij} 为服从参数 σ_{ij} 的瑞

利分布且 $|h_{ij}|^2$ 服从均值为 $\Gamma_{ij} = \sigma_{ij}^2/d_{ij}^\nu$ 的指数分布, d_{ij}^ν 为 i 与 j 之间的距离, $\nu=3\sim 4$ 为路径衰减因子; s_i 为单位能量的调制符号; n_j 为接收端均值为 0 且方差为 N_0 的加性高斯白噪声。

2 中断概率分析

定义系统的中断概率如下:当 2 个用户中至少有一个的数据未被 D 接收,但已成功解码时,系统发生中断,系统发生中断的概率为系统中断概率。

在发送数据的第 1 阶段, A 、 B 用编码矩阵 $\mathbf{G}_1$ 将 bit 数为 k 的数据进行编码,编码包的长度 $N_1 = \alpha N$,码率为 $\frac{k}{N_1} = \frac{k}{\alpha N} = \frac{R}{\alpha}$, R 为直接采用点对点通信时的码率。根据香农定理知, i 与 j 之间的无线信道的容量为

$$c_{ij} = \text{lb}\left(1 + |h_{ij}|^2 \frac{P_i}{N_0}\right) \quad (2)$$

式中: $i \in \{A, B\}$, $j \in \{C, D\}$ 。根据 1.1 节的描述, $P_i = \frac{(1-\beta)P_T}{2\alpha N}$, 令总信噪比 $r_{\text{SNR}} = \frac{P_T}{NN_0}$, 则信道容量可改写为

$$c_{ij} = \text{lb}\left(1 + |h_{ij}|^2 \frac{(1-\beta)r_{\text{SNR}}}{2\alpha}\right) \quad (3)$$

当实际的传输速率超出了香农信道容量时,可以认为传输发生中断,中断概率为

$$p_{ij} = P_r\left(c_{ij} < \frac{R}{\alpha}\right) =$$

$$P_r\left(\text{lb}\left(1 + |h_{ij}|^2 \frac{(1-\beta)r_{\text{SNR}}}{2\alpha}\right) < \frac{R}{\alpha}\right) = P_r(|h_{ij}|^2 < \Theta_1) \quad (4)$$

式中: $\Theta_1 = \frac{2\alpha(2^{R/\alpha}-1)}{(1-\beta)r_{\text{SNR}}}$ 。因此,式(4)可改写为

$$p_{ij} = 1 - \exp(-\Theta_1/\Gamma_{ij}) \quad (5)$$

在发送数据的第 2 阶段,如果 C 能成功接收并解码 A 、 B 的数据,那么可采用新的编码矩阵 $\mathbf{G}_2$ 进行信道编码,码率为 $\frac{k}{N_2} = \frac{k}{(1-\alpha)N} = \frac{R}{1-\alpha}$, $\Theta_2 = (1-\alpha) \frac{(2^{R/(1-\alpha)}-1)}{\beta r_{\text{SNR}}}$, C 到 D 的中断概率为

$$p_{CD} = 1 - \exp(-\Theta_2/\Gamma_{CD}) \quad (6)$$

本文未假设 A 、 B 到 C 的信道是完全可靠的。在实际系统中, C 可根据实际情况进行选择^[13-14], 所以用户到 C 间的信道不可能是完全可靠的。

第 2 阶段 C 的行为取决于其与用户之间的信道质量,因此本文在信道不可靠的情况下提出了节

点协作机制。

用户到 C 的信道有下述 4 种情况。

情况 1 C 能正确解码 A 和 B 的数据。中继节点在正确解码 A 和 B 的数据之后,计算网络编码包 $X_A \oplus X_B$,然后用新的码字进行信道编码并发送数据,因为采用 C 的网络编码包能有效降低网络的中断概率^[9]。在 A 、 B 和 C 的数据中,如果 D 接收到其中任意 2 个数据便可正确恢复所有数据,则中断概率为

$$p_1 = [p_{AD}p_{BD} + p_{AD}p_{CD}(1-p_{BD}) + p_{BD}p_{CD}(1-p_{AD})](1-p_{AC})(1-p_{BC}) = (p_{AD}p_{BD} + p_{AD}p_{CD} + p_{BD}p_{CD} - 2p_{AD}p_{BD}p_{CD})(1-p_{AC})(1-p_{BC}) \quad (7)$$

情况 2 对于 A 、 B 的数据均不能正确解码。这种情况将退化为没有协作的情况,所以 C 在第 2 阶段没有任何动作。该情况下的中断概率为

$$p_2 = (p_{AD} + p_{BD} - p_{AD}p_{BD})p_{AC}p_{BC} \quad (8)$$

情况 3 C 能成功解码 A 的数据,不能解码 B 的数据。这种情况将退化为传统协作机制的情况,因为 C 仅收到 A 的数据,无法进行网络编码,所以 C 仅能协助 A 发送数据。该情况下的中断概率为

$$p_3 = [p_{BD} + p_{AD}p_{CD}(1-p_{BD})](1-p_{AC})p_{BC} \quad (9)$$

情况 4 C 仅能协助 B 发送数据。该情况下的中断概率为

$$p_4 = [p_{AD} + p_{BD}p_{CD}(1-p_{AD})](1-p_{BC})p_{AC} \quad (10)$$

综上 4 种情况,总的中断概率为

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \quad (11)$$

下面计算了没有协作节点时的系统中断概率。为了公平起见,假设系统的总能量依然是 P_T ,其平均分配给 3 个用户; A 、 B 到 D 的中断概率相同,均为

$$p_{AD} = p_{BD} = P_r(C_{iD} < R) = P_r\left(\text{lb}\left(1 + |h_{iD}|^2 \frac{P_T}{2NN_0}\right) < R\right) = P_r\left(|h_{iD}|^2 < \frac{2^R-1}{0.5r_{\text{SNR}}}\right) = 1 - \exp(-\Theta/\Gamma_{iD}) \quad (12)$$

式中: $\Theta = \frac{2^R-1}{0.5r_{\text{SNR}}}$ 。根据定义,系统的中断概率为

$$p_n = 1 - (1-p_{AD})(1-p_{BD}) = p_{AD} + p_{BD} - p_{AD}p_{BD} \quad (13)$$

3 数值分析与讨论

假设点对点通信的码率 $R = 0.25 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ (这是实际系统中常见的码率), 尽管每条链路的信道增益随机分布, 但是增益的均值可视为相同. 不失一般性, 假设 $\sigma_{ij} = 1$, 那么 $\Gamma_{ij} = 1/d_{ij}^v$. 为了方便研究, 又设 A、B 到 C 和 D 的距离分别为 1 m 和 2 m, C 到 D 的距离为 1 m, 即 $d_{AC} = d_{BC} = d_{CD} = 1 \text{ m}$, $d_{AD} = d_{BD} = 2 \text{ m}$. 取 $v = 3$, 则 $\Gamma_{AC} = \Gamma_{BC} = \Gamma_{CD} = 1$, $\Gamma_{AD} = \Gamma_{BD} = 1/8$, 将其代入式(5)、(6)有

$$p_{AC} = p_{BC} = 1 - \exp(-\Theta_1) \quad (14)$$

$$p_{AD} = 1 - \exp(-8\Theta_1) \quad (15)$$

$$p_{CD} = 1 - \exp(-\Theta_2) \quad (16)$$

采用上述参数, 并在 Matlab 中进行了数值仿真. 图 3 为 $r_{\text{SNR}} = 10 \text{ dB}$ 时系统的中断概率 p_n 与 β 、 α 的关系. 从图 3 可以看出: 第 1 阶段用户的码率不能分配得过大, 否则通信将退化为点对点通信, 中断概率也比较高; C 的能量也不能分配得过多, 因为这将使得用户的能量过少, 从而使得用户到 C 和 D 的上行链路的可靠性降低, 此时即使 C 到 D 的信道质量比较好, 系统的整体性能也会降低. 当 $0.6 < \alpha < 0.7$ 、 $0.15 < \beta < 0.24$ 时, p_n 足够小, 该 β 略小于文献 [9] 中的情况 ($\beta = 1/3$). 这是因为, 实际系统中用户到 C 的信道并不可靠, 用户需要分配更多的能量才能保证系统的性能.

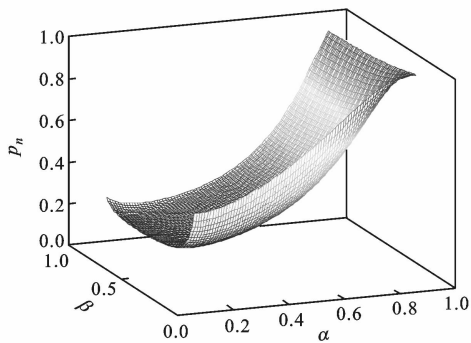


图 3 p_n 与 β 、 α 的关系

图 4 为 $\alpha = 0.66$ 、 $\beta = 0.2$ 时 r_{SNR} 与 p_n 的关系. 从图 4 可以看出, 即使不能保证用户到 C 的信道质量, 采用本文的联合信道-网络编码的协作方案依然能获取空间分集, 从而大幅降低了系统的中断概率.

图 5 为 $r_{\text{SNR}} = 10 \text{ dB}$ 时 α 、 β 对系统的影响. 从图 5 可以看出, 当 $\alpha = 0.66$ 时, β 与 p_n 的关系呈抛物线状. 此时, C 的能量不能分配得太多, 因为这将使得用户能量减少, 不能保证用户到 C 和 D 的上行链路

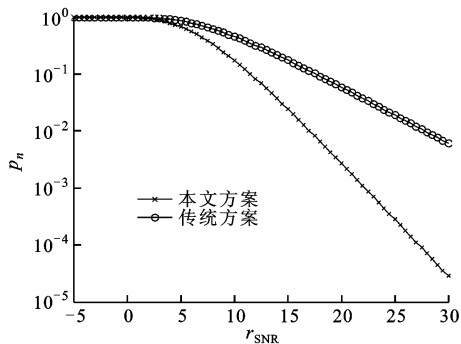


图 4 $\alpha = 0.66$ 、 $\beta = 0.2$ 时 r_{SNR} 与 p_n 的关系

的可靠性, 所以 β 的合理取值范围为 $(0.15, 0.24)$. 当 $\beta = 2.0$ 时, 用户的码率也不能太高, 如果太高, C 不能充分发挥作用, 系统将退化为无协作系统.

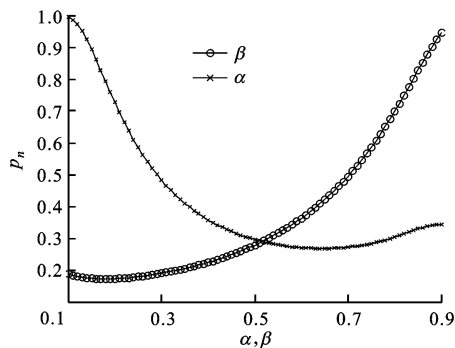


图 5 $r_{\text{SNR}} = 10 \text{ dB}$ 时 α 、 β 对系统的影响

4 结束语

本文将网络编码与信道编码相结合并应用于有特定协作节点的协作通信系统中, 同时重点研究了系统的 α 、 β 与 p_n 的关系, 给出了合理的 α 、 β , 推导出了 p_n 的表达式. 针对实际的协作通信系统进行了仿真, 结果表明, 在能量受限和调制方式固定的情况下, 合理的安排能量和码率可有效减小系统的中断概率, 即使用户到协作节点的上行链路不完全可靠, 采用本文的联合信道-网络编码的协作机制依然能获得空间分集.

参考文献:

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Co-operative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [2] SU Weifeng, SADWK A K, LIU K. Cooperative communication protocols in wireless networks: performance analysis and optimum power allocation [J]. Wireless Personal Communications, 2008, 44(2): 181-

- 217.
- [3] 高贞贞, 朱世华, 徐静. 放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案 [J]. 西安交通大学学, 2009, 43(6): 62-66.
GAO Zhenzhen, ZHU Shihua, XU Jing. Differential spacetime-frequency transmission for amplify-and-forward asynchronous cooperative communications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 62-66.
- [4] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity: part I System description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [5] 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.
- [6] VICKY Z H, SU Weifeng. Cooperative wireless multicast: performance analysis and power/location optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(6): 2088-2100.
- [7] AHLSEWEDE R, CAI Ning, LI Shuoyen, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [8] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S, et al. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing [C] // Proceedings of ACM SIGCOMM. New York, USA: ACM, 2007: 2252-2260.
- [9] WU Yunnan, CHOU P A, KUNG S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast, MSR-TR-2004-78 [R]. Redmond, WA, USA: Microsoft Research, 2005.
- [10] CHEN Y, KISHORE S, LI J. Wireless diversity through network coding [C] // Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1681-1686.
- [11] WOLDEGEGBREAL D H, VALENTIN S, KARL H. Incremental network coding in cooperative transmission wireless networks [C] // Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [12] XU Hong, LI Baochun. XOR-assisted cooperative diversity in OFDMA wireless networks: optimization framework and approximation algorithms [C] // INFOCOM 2009. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2141-2149.
- [13] LIN Z, ERKIP E, STEFANOV A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7): 1323-1334.
- [14] NOSRATINIA A, HUNTER E. Grouping and partner selection in cooperative wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 369-378.

[本刊相关文献链接]

- 线性检测中的最优空时编码设计与分析. 2011, 45(2): 59-63.
- 无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法. 2011, 45(2): 68-72.
- 毫米波通信系统中利用随机逼近的波束赋形算法. 2011, 45(10): 72-76.
- 利用均匀线阵实现高移动性通信系统中的多普勒补偿. 2011, 45(8): 73-77.
- 宽带移动卫星通信低成本组合姿态确定算法. 2011, 45(6): 64-68.
- 用于视频传输的自适应分级正交幅度调制不等保护方法. 2011, 45(4): 72-76.
- 针对事件驱动型传感器网络的多路径编码路由协议. 2010, 44(6): 39-45.
- 放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案. 2009, 43(6): 62-66.
- 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案. 2009, 43(2): 33-37.
- 一种正交调制协作系统的功率分配方法. 2009, 43(2): 81-85.
- 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案. 2009, 43(2): 33-37.
- 放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案. 2009, 43(6): 62-66.
- 一种基于放大转发的中继选择策略. 2008, 42(4): 450-453.
- 一种通信有限状态机的被动测试及其错误诊断. 2007, 41(6): 640-644.
- 一种防破坏广播型匿名通信网的多路访问协议. 2007, 41(6): 674-678.
- 跳时 M 元双正交脉冲位置调制超宽带通信性能研究. 2007, 41(2): 204-208.

(编辑 苗凌)