

文章编号: 1672-2892(2010)06-0742-05

## 一种提高协作通信性能的新方法

徐娜, 汪翔, 倪卫明

(复旦大学 通信工程系, 上海 200433)

**摘要:** 传统的无线通信中, 由于外部环境的干扰, 信道的不稳定, 网络的中断率比较高。在信道条件较差时, 通信性能较差。本文利用无线通信节点间的合作, 通过不同节点对信息的中继放大、解码(或者网络编码), 对直接传输的无线信道性能进行改进, 大大提高了网络性能, 降低网络的中断率; 通过比较不同频谱效率下的不同转发方式的中断率性能, 选择合适的传输方法。仿真实验得到: 频谱效率小于一定值的情况下, 利用放大和网络编码转发方式的性能大大高于直接传输方式。

**关键词:** 无线通信; 协作通信; 中继; 解码转发; 网络编码

**中图分类号:** TN915.01

**文献标识码:** A

## A new method to improve the performance of cooperative communication

XU Na, WANG Xiang, NI Wei-ming

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In traditional wireless communication, due to the interference of the external environment and channel instability, the outage probability of network is high. The communication performance is poor under bad channel condition. In this paper, the network performance is improved through the cooperation among wireless nodes. The performance of wireless channel is enhanced in direct transmission through relay of different nodes(amplification, decoding, or the network coding). The network outage probability is reduced with the use of decode-forward and network coding forward. The proper forward method can be found by the comparison of the outage probability under different spectral efficiencies. Simulation results indicate if the spectral efficiency is less than some certain value, the performance of amplify-forward and network coding forward are much better than that of direct transmission.

**Key words:** wireless communication; cooperative communication; relay; decode-forward; network coding

在无线网络中, 由于某一段时间内蜂窝移动通信系统中仅有部分移动终端有通信需求, 网络中会有较多的移动终端处于空闲状态, 因此可能存在空余资源。在传统的无线通信中, 各节点(终端)之间是独立的, 没有合作关系, 这将使得这部分空闲资源得不到利用。现有的协作通信主要有以下模式: 放大转发、解码转发等。但在这些模式中中继节点不对数据包进行编码和处理, 当中继节点和目标点信道质量较差时, 信道的中断率较高。本文结合解码转发和网络编码在中继节点处对信息进行编码, 信道质量较差时, 相比放大转发、解码转发, 信道的中断率性能得到提高。

### 1 协作通信

#### 1.1 协作通信简介

协作通信可使具有单根天线的移动台获得类似于多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统中的某些增益, 其基本思想是在多用户环境中, 具有单根天线的移动台可以按照一定的方式来共享彼此的天线, 从而产生 1 个虚拟 MIMO 系统, 获得分集增益。

### 1.2 协作通信方式

协作通信的 2 种方式：放大转发机制、解码转发机制。

放大转发机制中，中继节点把源节点的信息进行功率放大后转发。

解码转发机制中，中继节点把源节点的信息进行解码后发送到目标节点，与放大转发机制不同的是，在第 2 个时隙中，发送源 S2 不是将发送源的信息放大，而是做一个解码再发送出去。

建立协作通信的方法包括接收来自发起客户机与指定用户进行协作通信请求的步骤，可启用中间客户机。该中间客户机可以被设置在一个通过互联网协议网络与发起客户机通信连接的服务器中，可以确定一个与指定用户相关的移动设备，在中间客户机和移动设备之间的通信会话可以通过无线网络来实现。通过使用中间客户机作为通信中介，可以在发起客户机与移动设备之间传送至少一个协作消息。

该方法使用带有一根天线的移动台，在多用户环境中可以共享其他移动用户的天线，这样可产生多根虚拟发射天线，进而得到相应的分集增益，改善移动通信系统性能。

## 2 网络性能的衡量

### 2.1 信道模型

假设有 2 个发射端和 1 个基站，根据文献[1]建立信道模型，如图 1 所示。

图中，S1/R1：表示发送源 S1 以及当发送源 S2 发送时，发送源 S1 作为中继源 R1；S2/R2：表示发送源 S2 以及当发送源 S1 发送时，发送源 S2 作为中继源 R2；Xa：表示发送源 S1 发送的数据包；Xb：表示发送源 S2 发送的数据包；D：表示数据接收端。

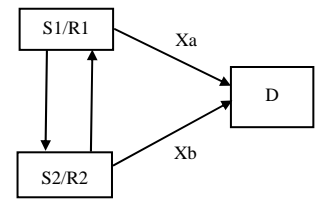


Fig.1 Channel model  
图 1 信道模型

### 2.2 无线信道的接入方式

本文采用 TDMA 接入方式(文献[2-3])，如图 2 所示，传输过程分为 4 个时隙。假设有 2 个发射端用户 T1 和 T2，1 个基站。第 1 个时隙，T1 作为发送端，发送信息到基站和 T2，此时的 T2 作为中继节点；第 2 个时隙，T2 作为中继节点把 T1 的信息发给基站；第 3 个时隙，T2 作为发送端，发送信息到基站和 T1，此时的 T1 作为中继节点，之后和前面类似。

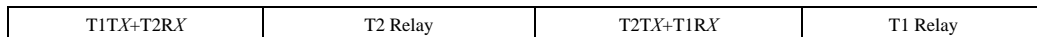


Fig.2 Channel access method  
图 2 信道接入方式

### 2.3 信道分析方法

在分析放大转发的过程中，假定发射端、中继端、接收端分别是 S,R,D，信道的衰减参数为  $\partial_{s,d}, \partial_{r,d}, \partial_{s,r}$ ，它们的概率密度函数为零均值高斯分布，则  $\partial_{s,d}^2, \partial_{r,d}^2, \partial_{s,r}^2$  服从  $\chi^2$  分布：

$$q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x\sigma}} e^{-\frac{x}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

式中  $\sigma^2$  是方差。

其包络  $|\partial_{s,d}|^2, |\partial_{r,d}|^2, |\partial_{s,r}|^2$  服从瑞利分布：

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x}{2\sigma^2}} \quad (x \geq 0) \tag{2}$$

### 2.4 信道中断率

设定信道的频谱效率为 R(定义为信道速率与带宽之比)，信道的自信息为 I，当  $I < R$  的时候，即信道的自信息不足以提供信道的数据传输速率，发生中断事件。

#### 2.4.1 在 Amplify-Forward 节点协助通信模式中的中断率

放大转发模型如图 3 所示。

信道的自信息为<sup>[4]</sup>：

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log \left( 1 + R_{SN} |\partial_{s,d}|^2 + f \left( R_{SN} |\partial_{s,r}|^2, R_{SN} |\partial_{r,d}|^2 \right) \right) \quad (3)$$

式中:

$$f(x, y) := xy / x + y + 1 \quad (4)$$

发生中断的概率为:

$$P_{AF}^{out}(R_{SN}, R) := \Pr[I_{AF} < R] \quad (5)$$

即当信道的自信息小于传输概率时, 发生中断<sup>[5]</sup>。

### 2.4.2 解码转发的中断率

在解码转发<sup>[6]</sup>中, 信道的自信息为<sup>[4]</sup>:

$$I_{DF} = \frac{1}{2} \min \left\{ \log(1 + R_{SN} |\partial_{s,r}|^2), \log(1 + R_{SN} |\partial_{s,d}|^2 + R_{SN} |\partial_{r,d}|^2) \right\} \quad (6)$$

当  $I_{DF} < R$  时, 发生中断事件。

即当  $\min \left\{ |\partial_{s,r}|^2, |\partial_{s,d}|^2 + |\partial_{r,d}|^2 \right\} < \frac{2^{2R} - 1}{R_{SN}}$  时发生中断事件。

## 3 网络编码改进后的解码转发机制

### 3.1 网络编码

本文采用网络信道编码<sup>[7]</sup>的方式在中继节点处加以编码, 网络编码<sup>[8]</sup>是一种融合了路由和编码的信息交换技术, 它的核心思想是在网络中的各个节点上, 对各条信道上收到的信息进行线性或者非线性处理, 然后转发给下游节点, 中间节点扮演编码器或信号处理器的角色。网络编码的工作原理是把不同的信息转化成位数更小的“痕迹”, 然后在目标节点进行演绎还原, 这样就不必反复传输或者复制全部信息了。痕迹可以在多个中间节点间的多条路径上反复传递, 然后再被送往最终的目的端点, 它不需要额外的容量和路由, 只需把信息的痕迹转换成位流即可, 现有的网络基础设施是可以支持的。

### 3.2 在解码转发基础上的网络编码过程

如图4所示, 假定有2个源节点 S1, S2, 1个目标节点 D。当 S1 向目标节点 D 发送信息 Xa 时, 在第1个时隙, S1 将 Xa 发送到中继节点 S2 和目标节点 D。如果使用解码转发, 在第2个时隙 S2 将作为中继节点, 将 Xa' 转发给 D。而在本文中, 用网络编码对解码转发进行改进, 在中继节点处对需要转发的信息进行编码, 例如将 Xb 和 Xa' 或的结果发送到目标节点 D。

### 3.3 网络编码转发性能分析

图4是节点处的网络编码, 一共分为3个过程: 首先是 S1 发送 Xa 到 S2 和基站 D; 第2个过程是 S2 发送 Xb 到 S1 和基站 D; 第3个过程是 S1, S2 分别把 Xa+Xb', Xa'+Xb 发给 D。可以看到, 经过编码以后, 只要 Xa 或者 Xb, Xa'+Xb 到达 D, Xa 或 Xa' 就可以顺利解出来。

接下来计算网络的中断率, 设 S1 到基站传送的中断率为  $P_a$ , S1 作为中继点传送的中断率为  $P_{Ra}$ , S2 到基站传送的中断率为  $P_b$ , S2 作为中继点传送的中断率为  $P_{Rb}$ , S1, S2 间传输的中断率为  $P_{ab}$ , 如图5所示, 可以得到网络的中断率为:

$$P = P_a P_b + P_a (1 - P_b) \left( P_{ab}^2 + P_{ab} (1 - P_{ab}) P_{Rb} + P_{ab} (1 - P_{ab}) P_{Ra} + (1 - P_{ab})^2 P_{Ra} P_{Rb} \right) \left( P_b (1 - P_a) (P_{ab}^2 + P_{ab} (1 - P_{ab}) P_{Ra} + P_{ab} (1 - P_{ab}) P_{Rb} + (1 - P_{ab})^2 P_{Ra} P_{Rb}) \right) \quad (7)$$

接下来对网络编码的优势进行分析:

采用网络编码对解码转发机制的协作通信进行改进, 当 T1 作为发送端, T2 作为中继端的时候, 在中继端

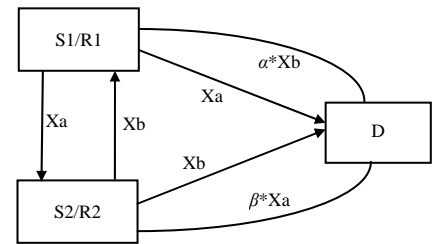


Fig.3 Collaborative model of nodes in Amplify-Forward transmission  
图3 放大转发节点协助模式

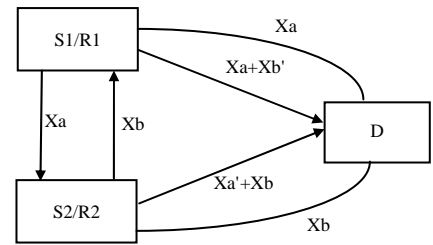


Fig.4 Network coding forward model  
图4 网络编码转发模式

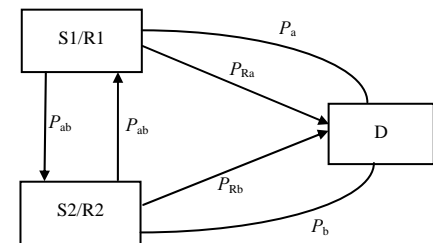


Fig.5  $P_{out}$  of network coding forward model  
图5 网络编码转发模式中中断率

T2, 可以进行这样的编码：将 T1 的信息  $X_a$  进行解码为  $X_a'$ , 发送  $X_a'+X_b$  到基站, 而不仅仅是  $X_a$ 。当 T1 作为中继端时也类似。可以看到, 采用编码后, 到达基站的信息有 4 种:  $X_a, X_b, X_a+X_b', X_a'+X_b$ 。假设信道性能足够好( $X_a', X_b'$ 对  $X_a, X_b$  解码), 可以发现, 即使  $X_b$  没有到达基站, 如果  $X_a+X_b'$ 和  $X_a$  到达了基站, 同样可以把  $X_b'$  解出来。

## 4 MATLAB 仿真结果

### 4.1 不同转发机制性能的仿真

实验环境：信道模型采用 AWGN, 衰减因子  $\partial$  遵循零均值高斯分布, 固定频谱效率  $R=2$ , 采用蒙特卡诺方法(离散点数为 10 000)进行仿真。信道的中断率随信道信噪比之间的变化结果如图 6 所示(横坐标是信道的信噪比, 纵坐标是网络的中断率)。

从图中可以看到：在 SNR 比较低时, 直接发送(不经过中继)信道的中断率非常高, 远远高于其他使用协作通信方式的中断率。

从图中还可以看出, 使用网络编码方式后的信道中断率小于一般的协作通信方式：放大转发和解码转发, 也远远小于直接发送(不经过中继)的信道中断率。

### 4.2 在同一 SNR, 直接发送, 放大转发和网络编码转发信道性能随 $R$ 变化的曲线

实验环境：信道模型采用 AWGN, 衰减因子  $\partial$  遵循零均值高斯分布, 固定信道  $R_{SN}=2\text{ dB}, 25\text{ dB}$  两种情况, 采用蒙特卡诺的方法(离散点数为 10 000)进行仿真。信道的中断率  $P_{out}$  随频谱效率  $R$  之间的变化如图 7 所示(横坐标是频谱效率  $R$ , 纵坐标是网络的中断率)。

可以看到, 在  $R$  较小时, 网络编码信道性能好于放大转发和直接发送。当  $R$  大于某一个值时, 直接发送的信道性能好于放大转发, 这可以帮助确定在什么时候选择什么转发机制。并且还可以看到, 随着 SNR 的提高, 相交点  $R$ (即直接发送机制优于放大转发)的值越来越大。但是当  $R$  大于一定值时, 直接发送的性能好于放大转发。

当使用 QPSK, BPSK, 2ASK 等调制方式时, 可以从中发现, 网络编码转发的性能远远好于直接发送、放大转发, 并且信道中断率随 SNR 的增大而减小。

## 5 结论

通过比较直接传输、放大转发机制、解码转发机制以及本文采用的网络编码方法, 可以看到：在同一 SNR 条件下, 频谱效率  $R$  较低时, 放大转发和网络编码转发性能较优秀一些, 而在  $R$  较高时, 直接发送方式性能比放大转发好。通过比较还可以发现, 当 SNR 增大, 相交点  $R$ (直接发送好于放大转发编码转发)也增大, 因此可以根据不同  $R$  值的情况, 来选择中断率性能较好的发送方式, 尤其在使用 QPSK, BPSK, 2ASK 等调制方式时, 可以选择网络编码的转发方式, 优化信道的中断率性能。

网络编码还有很多不同的方式, 后续工作可以围绕不同的编码方式来展开。在增加节点的情况下, 可以使用经典的蝶形图来研究网络编码对信道中断率性能的提高, 研究和讨论不同  $R$  值对网络中断率的影响。当节点继续增加, 还可以进一步研究不同的中继转发方式, 根据信道的状况结合不同的转发方式, 这些将都是未来协作通信的研究方向。

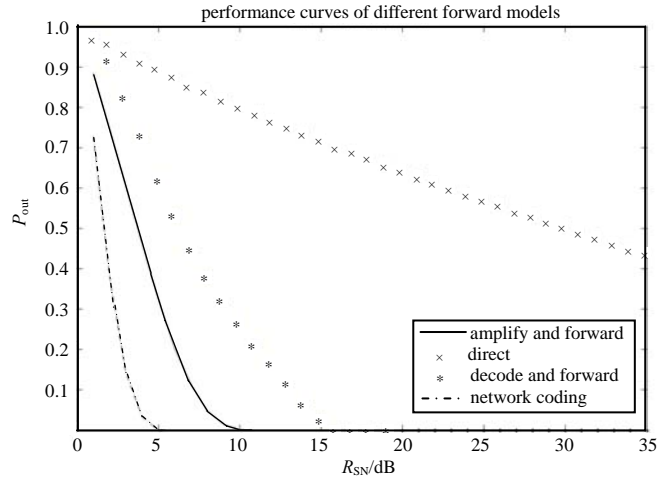


Fig.6 Performance curves of different forward models( $R=2$ )  
图 6 不同方式下的信道性能曲线( $R=2$ )

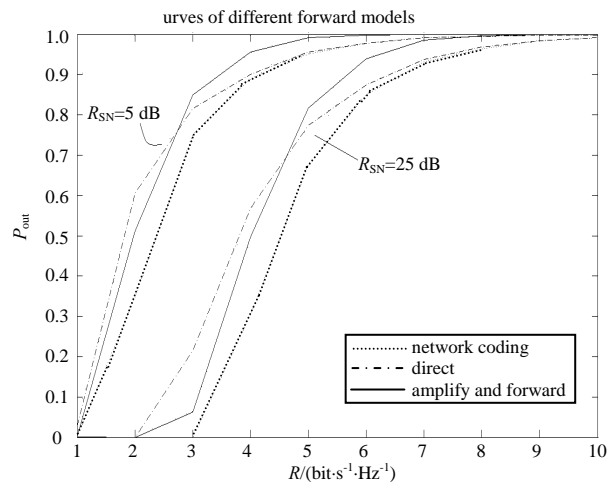


Fig.7 Performance curves of different forward models( $R_{SN}=5\text{ dB}$  and  $25\text{ dB}$ )  
图 7 不同方式下的信道性能曲线( $R_{SN}=5\text{ dB}$  和  $25\text{ dB}$ )

## 参考文献:

- [1] Laneman J N. Network coding gain of cooperative diversity[C]// Military Communications Conference. Monterey,CA:[s.n.], 2004:106-112.
- [2] Hunter T E,Nosratinia A. Diversity through Coded Cooperation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(2):283-289.
- [3] Nagaraj S,Bell M. A Codeo Modulation Technique for Cooperative Diversity in Wireless Networking[C]// IEEE International conference on ICASSP. Philadelphia,PA,USA:[s.n.], 2005:525-528.
- [4] 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.
- [5] Kramer G,Gastpar M,Gupta P. Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005,51(9):3037-3063.
- [6] Nostratinia A,Hunter T E,Heday A. Cooperative Communication in Wireless Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004,42(10):74-80.
- [7] Ahlswede R,Ning Cai,Li S-Y R,et al. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000,46(4): 1204-1216.
- [8] Chen Yingda,Kishore S,Li Jing. Wireless Diversity through Network Coding[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference,2006. Las Vegas,NV:[s.n.], 2006:1681-1686.

## 作者简介:



徐娜(1986-),女,江西省高安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为网络与数据通信、无线通信.email:jxgaxn@126.com.

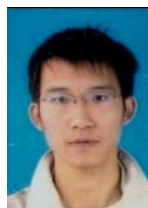
汪翔(1986-),男,江苏省海安县人,在读硕士研究生,主要研究方向为网络与数据通信.

倪卫明(1970-),男,上海市人,副教授,研究方向为信号处理、编码、无线通信和无线网络.

(上接第 741 页)

- [6] Cavdar I H. Performance analysis of FSK power line communications systems over the time-varying channels:measurements and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004,19(1):111-117.
- [7] Morosi S,Marabissi D,Enrico Del Re,et al. A rate adaptive bit-loading algorithm for in-building power-line communications based on DMT-modulated systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(4):1892-1897.
- [8] 李姣军,曾孝平,张众发. 一种基于电力线通信的 OFDM 自适应比特与功率分配算法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(1): 15-21.
- [9] Degardin V,Lienard M,Degauque P. Optimisation of equalization algorithm for power line communication channel[J]. Electronics Letters, 2003,39(5):483-485.
- [10] Nigel Bean,Andre Costa. An analytic modeling approach for network routing algorithms that use "ant-like" mobile agents[J]. Computer Networks, 2005,49(2):243-268.
- [11] 孙赛宇,杨瑞丽. 城市配电网结构分析[J]. 内蒙古电力技术, 2006,24(1):54-57.
- [12] 李伟新,汪晓岩. P 型环网结构的配电网载波组网方式研究[J]. 电力系统通信, 2006,27(11):21-27.

## 作者简介:



徐伟(1987-),男,安徽省安庆市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、自组织网络路由协议、电力线载波通信网络.email:xuwei20042003@qq.com.

李智(1975-),男,成都市人,副教授,研究方向为无线传感器网络、自组织网络、感知无线电、无线网络安全、嵌入式系统、电力线载波通信.email:lizhi@scu.edu.cn.

马一森(1986-),男,山东省济宁市人,在读硕士研究生,研究方向为无线传感器网络、通信电路与系统、通信信号处理.

张东(1985-),男,沈阳市人,在读硕士研究生,研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统.