

无线网络中的多跳协作机制*

李 云^{1,2}, 张正华¹, 赵为粮¹

(1. 重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 现有的协作机制过度地依赖于信道状态信息,而无线信道状态瞬时变化,使得信道状态信息在实践中很难获取。提出一种新的多跳协作机制,该机制不依赖信道状态信息,而是充分利用无线网络的广播特性,使得系统中的节点缓存其前面节点发送的信号,并对接收到的信号进行最大比合并,恢复原信号再转发。通过理论分析以及仿真分析验证所提方案的可行性和有效性,并与多跳非协作机制进行比较,仿真结果表明,多跳协作机制可以获得额外的分集增益,有效地提高了交付率以及增大系统中的端到端的平均吞吐量。

关键词: 多跳; 协作; 无线网络

中图分类号: TP393.04 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)01-0234-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.065

New multi-hop cooperation mechanism for wireless networks

LI Yun^{1,2}, ZHANG Zheng-hua¹, ZHAO Wei-liang¹

(1. Laboratory of Mobile Communications, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. National Laboratory of Mobile Communications Research, Southeast University of China, Nanjing 210096, China)

Abstract: The existing cooperation mechanism for wireless networks excessively depends on the channel state information. However, it is difficult to obtain the channel state information in practice because wireless channel state instantaneously changes. This paper proposed a new multi-hop cooperation mechanism (MCM) for wireless networks, which did not depend on the channel state information. MCM made use of inherently broadcast characteristics of wireless channel, so that enabled the intermediate nodes to cache and combined signals that were sent by the preceding nodes in a relay chain, and forwarded the recovered signals. And it employed theoretical analysis and simulation analysis to prove the feasibility and effectiveness of the proposed scheme. The results show that the MCM can improve the packet delivery ratio and the average end-to-end throughput compared to the multi-hop non-cooperation mechanism (NMN).

Key words: multi-hop; cooperation; wireless network

0 引言

无线信道中的多径衰落特性是影响信道容量增加以及服务质量改善的主要因素之一。而 MIMO 多天线技术通过在发射端和接收端同时安置多个天线形成 MIMO 信道结构,以此产生分集增益,可以有效地抵制无线信道的多径衰落。但是由于 MIMO 多天线技术在大小、重量和功率等方面的要求,使得移动终端并不适合该技术。为了突破这个难题,Sendonaris 等人^[1]提出了用户协作分集技术,该技术充分利用空闲用户的信道形成虚拟 MIMO 系统,从而有效地改善了系统的性能。

现有的协作分集技术主要考虑协作节点的选择、动态协作策略、协作方案以及无线资源分配等方面的问题。其中, Laneman 等人^[2]深入分析了协作分集技术的实现策略,提出了固定中继、选择中继和增量中继三种协作策略。文献[3]提出了一种混合中继协议,该中继协议结合 DAF 中继协议和 AAF 中继协议的优点,其中断概率优于 AAF 中继协议,并接近 DAF 中继协议。Boyer 等人^[4]深入分析了解码中继多跳信道、放大中

继多跳信道、解码中继多跳分集信道、放大中继多跳分集信道模型,并证实了多跳分集信道的性能优于多跳信道。Herhold 等人^[5]分析了多跳协作协议中的中断概率以及频谱效率。文献[6]提出了一种无线多跳网络中的基于链路效用的协作 MAC 协议,该协议能够根据信道的瞬时状态自动调节发送速率和功率使得链路效用最大化。文献[7]提出一种 DCMAC 协议,该协议能够根据信道瞬时状态信息来动态选择协作节点,有效地改善了无线链路的效率。

综上所述,现有的协作机制的缺陷是:a)依赖于信道的状态信息,而信道的状态信息在实践中很难获得,同时信道的状态瞬时变化,更新信道状态信息需要很大的开销;b)协作节点的选择需要复杂的算法实现,因而增加了协作通信的复杂度。

针对现有协作机制的缺陷,本文提出一种多跳协作机制 (multi-hop cooperation mechanism, MCM), 该机制不依赖于信道状态信息,也不需要复杂的协作节点选择方法,而是利用无线网络的广播特性,在多跳通信系统中,后续节点缓存并合并其前面的节点发送的信号来获得分集增益,从而有效地提高了

收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2011-05-23 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071118, 60702055); 重庆市科委杰出青年科学基金、国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0914); 重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC2009BB2279); 中国博士后科学基金资助项目(20090451158); 重庆市教委资助项目(KJ110524)

作者简介: 李云(1974-), 男, 四川西充人, 教授, 博士, 主要研究方向为无线移动通信(liyun@cqupt.edu.cn); 张正华(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为宽带无线接入技术; 赵为粮(1962-), 男, 教授, 博士(后), 主要研究方向为无线移动通信。

交付率,增大了系统中端到端的平均吞吐量。

1 MCM

源节点到目的节点的路径上有 k 个节点。假设源节点到目的节点的路径为 $R\{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k\}$, 其中, 节点 n_1 为源节点, 节点 n_k 为目的节点, 如图 1 所示。

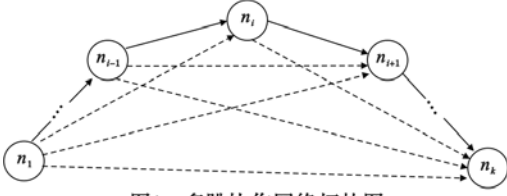


图1 多跳协作网络拓扑图

在多跳通信系统中, 由于无线信道的广播特性, 一个节点发送信号到另一个节点, 其他节点也可以侦听发送的信号。MCM 利用无线信道的广播特性, 后续节点缓存并合并其前面的节点发送的信号。结合图 1, MCM 的具体实现如下:

源节点 n_1 向目的节点 n_k 发送信号, 节点 n_2 接收信号并恢复出原信号, 路径上的节点 $n_3, n_4, \dots, n_k$ 也可以侦听到节点 n_1 发送的信号, 并缓存侦听到的信号。

节点 n_2 将恢复的信号转发到节点 n_3 , 节点 n_3 接收完节点 n_2 发送的信号后, 将其与侦听到节点 n_1 发送的信号进行最大比合并, 并恢复出原信号。同时, 节点 $n_4, n_5, \dots, n_k$ 缓存侦听到节点 n_2 发送的信号。

对于任意的中间节点 n_i ($4 \leq i \leq k-2$), 节点 n_i 将恢复的原信号转发给节点 n_{i+1} 。节点 n_{i+1} 接收完节点 n_i 发送的信号后, 将所有接收到的信号进行最大比合并, 并恢复出原信号。在发送过程中, 节点 $n_{i+2}, n_{i+3}, \dots, n_k$ 缓存侦听到节点 n_i 发送的信号。

节点 n_{k-2} 转发恢复的原信号, 节点 n_{k-1} 接收完节点 n_{k-2} 发送的信号后, 节点 n_{k-1} 将所有接收到的信号进行最大比合并, 恢复成原信号后转发到目的节点 n_k ; 目的节点 n_k 接收完节点 n_{k-1} 发送的信号后, 将所有接收到的信号进行最大比合并, 并恢复成原信号。

2 理论分析

在数据传输过程中, 路径 $R\{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k\}$ 上的后续节点通过侦听其前面节点发送的信号, 并最大比合并所接收到的信号, 以此获得分集增益, 从而改善系统的性能。MCM 在不需要额外的协作节点, 也不需要信道的瞬时状态信息, 就可以实现多跳协作通信。在本章中, 着重分析 MCM 中的交付率和端到端的平均吞吐量。

2.1 系统模型

如图 1 所示, $R\{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k\}$ 为源节点 n_1 发送信号到目的节点 n_k 的路径。节点 n_i 处的噪声为加性高斯白噪声 $z_i \sim N(0, \delta^2)$ 。 $h_{i,j}$ 为链路 (n_i, n_j) 的瑞利衰落系数, $G_{i,j}$ 为链路 (n_i, n_j) 的信道增益系数, $d_{i,j}$ 为节点 n_i 和节点 n_j 之间的距离, $x_1(t)$ 为节点 n_1 发送功率为 1 的信号, P_i 为节点 n_i 的发送功率。节点 n_i ($2 \leq i \leq k$) 接收到节点 n_1 发送的信号为

$$y_{1,i} = \sqrt{P_1} G_{1,i} \alpha_{1,i} x_1(t) + z_{1,i} \quad (1)$$

其中: $\alpha_{1,i} = \frac{h_{1,i}}{d_{1,i}}$, $\alpha_{1,i}^*$ 为 $\alpha_{1,i}$ 的共轭函数。

对于任意节点 n_j ($1 < j < i$), 其转发的信号均为恢复的原信号 $x_1(t)$ 。节点 n_i ($j < i \leq k$) 接收到节点 n_j 发送的信号为

$$y_{j,i} = \sqrt{P_j} G_{j,i} \alpha_{j,i} x_1(t) + z_{j,i} \quad (2)$$

当节点 n_{i-1} 发送信号完毕后, 节点 n_i 对所接收到的信号进行最大比合并, 其合并后的信号为

$$y_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{i-1} P_j \alpha_{j,i} \alpha_{j,i}^* G_{j,i}^2} x_1(t) + z_i \quad (3)$$

根据式(3)可以得到节点 n_i 处的信噪比为

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^{i-1} \gamma_{j,i} \quad (4)$$

其中,

$$\gamma_{j,i} = \frac{P_j G_{j,i}^2 |\alpha_{j,i}|^2}{\delta^2}$$

2.2 交付率分析

本节根据每跳的信噪比来计算系统的交付率, 首先推导任意节点 n_i ($2 \leq i \leq k$) 正确恢复原信号的概率。具体推导过程如下:

假设采用的调制方式为 BPSK, 则 BER 为

$$P_B = Q\left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right] = Q[\sqrt{2\gamma_i}] \quad (5)$$

根据式(5)可以计算出 SER 为

$$P_{SER} = 1 - (1 - P_B)^8 \quad (6)$$

假设每帧中有 n octets, 则 FER 为

$$P_F = 1 - (1 - P_{SER})^n \quad (7)$$

将式(5)(6)代入式(7), 可以得到节点 n_i 正确恢复原信号的概率为

$$p_s(i) = 1 - P_F = \{1 - Q(\sqrt{2\gamma_i})\}^{8n} \quad (8)$$

在 $i-2$ 个节点(除节点 n_1 外)中, 根据节点能否正确恢复原信号划分为两个集合, 即正确恢复原信号节点集 Ω_s 和不能正确恢复原信号的节点集 Ω_f 。于是, 式(4)可以化简为

$$\gamma_i = \gamma_{1,i} + \sum_{j=2}^{i-1} \gamma_{j,i}, \quad n_j \in \Omega_s \quad (9)$$

假设节点 $n_j \in \Omega_s$, 节点 $n_l \in \Omega_f$, 将式(9)代入式(8), 可以将式(8)化为

$$p_s(i) = \sum_{n_j \in \Omega_s} \prod_{2 \leq j \leq i-1} p_s(j) \prod_{n_l \in \Omega_f} [1 - p_s(l)] \{1 - Q(\sqrt{2(\gamma_{1,i} + \sum_{2 \leq j \leq i-1} \gamma_{j,i})})\}^{8n} \quad (10)$$

目的节点 n_k 正确恢复节点 n_1 发送的信号概率, 即交付率为

$$p_s(k) = \sum_{n_i \in \Omega_s} \prod_{n_i \in \Omega_s} p_s(i) \prod_{n_l \in \Omega_f} [1 - p_s(l)] \{1 - Q(\sqrt{2(\gamma_{1,k} + \sum_{2 \leq i \leq k-1} \gamma_{i,k})})\}^{8n} \quad (11)$$

2.3 吞吐量分析

本节分析中不考虑网络的碰撞以及数据包的重传, 先计算源节点发送数据包到目的节点所需要的总时间, 再结合 2.2 节分析中的交付率求出端到端的平均吞吐量。

设数据帧中的数据部分的长度为 L_{data} , 节点 n_{i-1} 发送数据包到节点 n_i 所需要的时间为

$$t_{i-1,i} = \frac{L_{data}}{R_{i-1,i}} + \frac{L_{MACHeader}}{R_{basic}} + t_0 \quad (12)$$

其中: $t_0 = 3t_{SIFS} + t_{DIFS} + t_{RTS} + t_{CTS} + t_{ACK} + 4t_{PLCP}$ 。

假设源节点 n_1 中有 m 个数据包需要发送,则源节点 n_1 将 m 个数据包发送完毕所需要的时间为

$$t_{1,k} = \sum_{i=2}^k mP_s(k)t_{i-1,i} + \sum_{i=2}^k mP_s(i-1) [1 - P_s(i|i-1)] (\sum_{n=2}^i t_{n-1,n} + t_1)$$

(13)

其中: $t_1 = \frac{L_{data}}{R_{i-1,i}} + \frac{L_{MACHeader}}{R_{basic}} + 3t_{SIFS} + t_{DIFS} + t_{RTS} + t_{CTS} + 3t_{PLCP}$

$$P_s(i|i-1) = \sum_{n_j \in \Omega_s}^{2 \leq j < i-1} p_s(j) \prod_{n_l \in \Omega_f}^{2 \leq l < i-1} [1 - p_s(l)]$$

$$\left\{ 1 - Q \left(\sqrt{2(\gamma_{1,i} + \gamma_{i-1,i} + \sum_{n_j \in \Omega_s}^{2 \leq j < i-1} \gamma_{j,i})} \right) \right\}^{8n}$$

系统中端到端的平均吞吐量^[8]为

$$\text{throughput} = \frac{mp_s(k)L_{data}}{t_{1,k}}$$

(14)

3 性能仿真

本章对 MCM 中的丢包率和端到端的平均吞吐量进行仿真,并与多跳非协作机制 (multi-hop none-cooperation mechanism, MNM) 进行比较。在仿真中 MAC 层和物理层使用 IEEE 802.11b 标准定义的参数,具体如表 1 所示。

表 1 仿真参数

RTS	CTS	ACK	SIFS	DIFS	时隙
352 bit	304 bit	304 bit	10 μs	50 μs	20 μs
物理层头部 MAC 层头部 数据速率 数据长度 物理层和 MAC 层头部速率					
192 bit	224 bit	2 Mbps	1000 Byte	2 Mbps	2 Mbps

令 $SNR = \gamma_{1,2} = (j - l)^2 \gamma_{l,j} (1 \leq l < j \leq k)$, 目的节点 n_k 处的信噪比可化简为 $\gamma_k = \sum_{i=1}^{k-1} (k - i)^{-2} SNR$ 。于是,交付率为 $p_s(k) = \sum \prod_{n_i \in \Omega_k} p_s(i) \prod_{n_j \in \Omega_f} [1 - p_s(l)] [1 - Q(\sqrt{\sum_{i=1}^{k-1} 2(k - i)^{-2} SNR})]^{8000}$ 。根据式(14)得其端到端的平均吞吐量为 $\text{throughput} = \frac{1000p_s(k)}{t_{1,k}}$ 。

当 k 固定, SNR 为变量,其他参数为常数。如图 2 所示,网络的跳数固定为 5 ($k=6$),当 SNR 小于 8 dB,交付率和端到端的平均吞吐量几乎为零;当 SNR 大于 11.5 dB 时,交付率为 1,端到端的平均吞吐量达到饱和状态;当 SNR 大于 8 dB 小于 11.5 dB 时,随着信噪比 SNR 的增加,交付率逐渐增大。端到端的平均吞吐量也逐渐增大。相对 MNM, MCM 中的交付率和端到端的平均吞吐量大很多。其中, SNR 为 9.5 dB 时, MCM 中的端到端的平均吞吐量相对 MNM 提高了 45.21%。MCM 使得后续节点合并其前面节点所发送的信号,以此获得信号的分集增益,从而提高了系统中的交付率,增大了端到端的平均吞吐量。当 SNR 大于 11.5 dB 时,由于两种机制的交付率都为 1, MNM 中的端到端的平均吞吐量与 MCM 的相等。

当 SNR 固定, k 为变量,其他参数为常数。如图 3 所示, SNR 分别固定为 8 dB、19 dB、10 dB,随着网络的跳数增大,交付率和端到端的平均吞吐量逐渐减小。如图 3(a) 所示, MCM 中的交付率比 MNM 中的大很多。其中,当 SNR 为 10 dB 时, MCM 中的交付率很大,接近 1,变化波动很小;当 SNR 为 8 dB 时, MCM 和 MNM 中的交付率都很小,当跳数为 6 时,交付率几乎为 0。如图 3(b) 所示,同一信噪比, MCM 中的端到端的平均吞吐量明显比 MNM 中的大。其中,当跳数为 5 时, SNR 为 10 dB,

MCM 中的端到端的平均吞吐量相对 MNM 提高了 13.03%。MCM 使得后续节点通过合并其前面节点发送的信号,以此获得分集增益,可以抵消部分因跳数增加而下降的端到端的吞吐量,从而改善系统的性能。

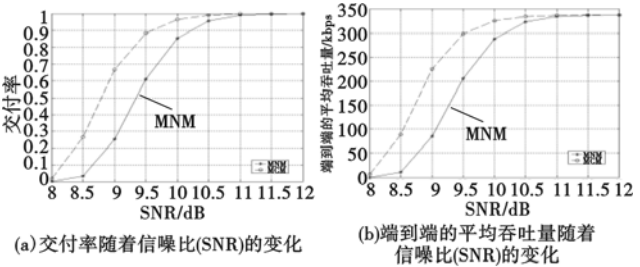


图2 跳数固定为5, 信噪比 (SNR) 变化

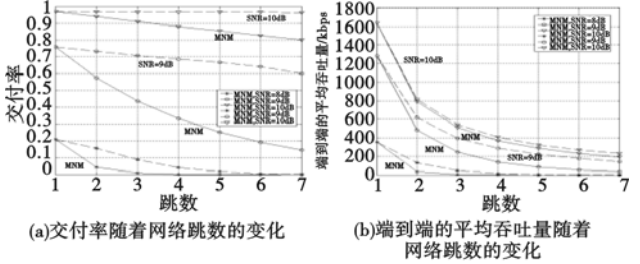


图3 信噪比 (SNR) 固定, 网络跳数变化

4 结束语

本文提出了一种 MCM, 该机制不依赖于信道状态信息,也不需要复杂的协作节点选择就可以实现多跳协作通信。MCM 充分利用了无线信道的广播特性,使得后续节点缓存并最大比合并其前面节点发送的信号,以此产生分集增益。通过理论分析和仿真验证,与 MNM 对比, MCM 能够有效地提高数据包的交付率,明显增加了端到端的平均吞吐量。

参考文献:

[1] SENDONARI A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity, part I: system description/part II: implementation aspects and performance analysis[J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11):1927-1948.

[2] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2004, 50(12):3062-3080.

[3] LI Yong-hui, VUCETIC B, CHEN Zhuo, et al. An improved relay selection scheme with hybrid relaying protocols[C]//Proc of Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 3704-3708.

[4] BOYER J, FALCONER D D, YANIKOMEROGLU H. Multihop diversity in wireless relaying channels[J]. IEEE Trans on Communications, 2004, 52(10):1820-1830.

[5] HERHOLD P, ZIMMERMANN E, FETTWEIS G. Cooperative multi-hop transmission in wireless networks[J]. Computer Networks, 2005, 49(3):209-324.

[6] ZHOU Yong, LIU Ju, ZHENG Lina, et al. Link-utility-based cooperative MAC protocol for wireless multi-hop networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2011, 10(3):995-1004.

[7] LI Yun, CAO Bin, WANG Chong-gang, et al. Dynamical cooperative MAC based on optimal selection of multiple helpers[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009:1-6.

[8] FEERÉ P, DOUFEXI A, NIX A, et al. Throughput analysis of IEEE 802.11 and IEEE 802.11e MAC[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004:783-788.