

协同伙伴选择的公平性研究

刘威鑫^{①②} 张忠培^① 李少谦^① 张严^②

^①(电子科技大学通信抗干扰国家级重点实验室 成都 610054)

^②(展讯通信(上海)有限公司通信系统部 上海 201203)

摘要: 在协同网络中, 协同伙伴的选择是一个非常关键的问题。以前关于这个问题的解决方案本质上是基于收发器的性能而忽略了协同伙伴选择的公平性。该文提出通过下述机制来获得公平性的一种新策略。(1)通过用户各自的计数器建立“帮助别人就是帮助自己”的机制来抑制利己主义的用户; (2)在接收端设置阈值决定是否需要同伴中继; (3)在最大吞吐量与网络节点寿命方差之间联立以建立动态平衡。仿真结果显示: 这个策略能够在性能和公平性之间达到动态平衡, 从而利于整个网络的公平, 其公平性优于目前所知文献的方法。

关键词: 协同分集; 负载均衡; 公平性; 即时信噪比

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0809-05

A Study of Fairness of the Selection of the Cooperative Partner

Liu Wei-xin^{①②} Zhang Zhong-pei^① Li Shao-qian^① Zhang Yan^②

^①(National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

^②(Communication System Department, Spreadtrum Communications (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: The selection of cooperative partner is a key problem in the cooperative network. All the former solutions to this problem in essence base on the performance of the transceiver while neglecting the fairness among the cooperative partners. In this paper, a new scheme is described as following to achieve the balance between the performance and the fairness among the nodes. Firstly, using the counter of each node in the network to establish the mechanism based on the idea “help others equal to help yourself” to avoid the self-interest users. Secondly, a threshold about instant SNR at the destination receiver is used to decide whether needing relay. Thirdly, the algorithm established keeps a balance between maximizing the throughput and minimizing the variance of the lifetime of all the candidate partners in the network. The simulation results under all kinds of conditions indicate that the scheme can get dynamic balance between performance and fairness and lead to more fairness in the cooperative network, the performance of fairness of the scheme outperforms the other of the references' the best knowledge .

Key words: Cooperative diversity; Load balance; Fairness; Instant SNR

1 引言

分集技术是一个对抗衰落的强有力的技术^[1]。在众多的分集技术中, 空间或者多天线分集技术因其可以和其他分集技术(如时分分集和频率分集)结合, 且在其他分集不能有效时, 仍能提供较大的增益的特点, 而具有特别的吸引力。但是, 在很多情况下, 由于尺寸或其他方面的限制, 许多终端并不支持多天线。因此以虚拟天线阵为本质的协同分集被提出。在协同分集中, 用户通过共享他们的天线来获得发射分集。

在协同网络中, 如何从备选协同伙伴中选择最优的中继和被选中的中继为何愿意参与协同仍然是待研究的问题。在文献[2]中, Song 等提出了基于最小错误率的伙伴选择方法。在文献[3, 4]中, Bletsas 等提出了一个简单的分布式方法, 该方法在所有可能的中继中找出端对端之间最好的路径, 该方法基于无线信道的即时测量和相互性且不需要网络拓扑结构的先验信息。在文献[5]中, Kim 等实现了在协同无线 Ad-hoc 网络中接收端选择性合并: 在所有接收到的中继信号中, 选择最强的信号。在文献[6]中, Le 等借用 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 中天线选择的思想运用到中继选择。在文献[7]中, Lin 等引入了协同判决参数 CDP (Cooperation Decision Parameter), CDP 是接收端平均信噪比的函数以从备选的中继中选择伙伴来获得最大的协同增益。

2006-10-10 收稿, 2007-07-16 改回

国家十五、863 重大项目(863-317-03-01-05/MIL-C3G-05-00)和国家自然科学基金重大项目(60572090, 60472045, 60496313)资助课题

通过对以上所有文献的分析,可以清晰的看出:以上所有选择伙伴的方式方法从本质上来讲都仅仅考虑了收发端的性能而忽略了备选协同伙伴的公平性。举一个极端情形下的例子:如果有一个备选的中继始终作为最佳伙伴,那么其结果是其电池很快就会耗完而其他的备选的伙伴很可能根本就没有用到。这对整个协同网络来说是非常不公平的,尤其对这个始终备选的中继。

另一个问题是假设协同网络中每一个用户都是利己主义的,当他需要其他用户作为中继时,他会请求其他用户为他中继信号;而当其他用户需要他作为中继时,他很可能为了自己的电池寿命最大化而拒绝这样做。所以必须建立一个“帮助别人就是帮助自己”的机制。任何用户想从协同网络中获利,他必须对协同网络做出贡献。

针对以上问题。在本文,一种趋向公平性的新策略被提出。利用MP(Management Plane)层上的计数器,接收端阈值,最大吞吐量和网络节点寿命方差建立一个动态平衡。本文的结构如下:第2节给出系统模型并引入一些假设。第3节给出了详细的策略设计。仿真和数字结果在第4节中给出。最后是结束语。

2 系统模型

协同网络的实现是由中继R在第2阶段重传(或解码重传)在第1阶段接收到的来自发射端S的信号到目的接收端D。如图1所示:

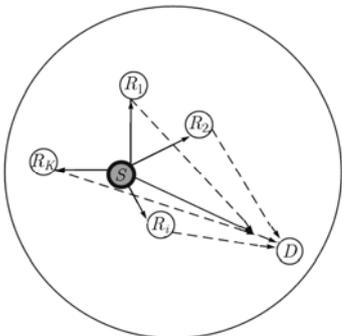


图1 协同网络(实线是第1阶段的传输,虚线是第2阶段的传输)

为了简明起见,本文只是阐述单跳。因为文献[8]阐明在单跳路由时,协同分集能提供实质的增益,而在最优多跳路由时,协同分集的增益很小。协同伙伴的个数采用和文献[3,4]中的一样,即总是选择一个最“好”的伙伴。本文做如下假设:

- (1)每一个节点在协同网络中是平等的。
- (2)每一个节点都是能量受限的且受限的能量相同。
- (3)每一个节点在MAC(Media Access Control)层的MP上有一个计数器。

(4)计数器用来记录作为中继和需要中继的状况。

(5)为了简洁起见,信号的发送将采用相同的功率P,无论是从S发射还是从中继发射(但是可以根据注水原理很容易推广到不等功率发射)。可见,如果帧长固定的话,每个节点的能量可以用可发送的数据的帧数 T_{tot} 来衡量。

(6)节点之间的信道是慢衰落的(块衰落信道:在一个数据帧内,信道不变,但帧与帧之间独立)。

(7)在时域或者在频域,所有信道是正交的。

(8)信道增益从发送端S到中继 R_i 和中继 R_i 到接收端D分别用 $h_{s,i}, h_{i,d}$ 表示, $z_{i,j}$ 是相应的噪声(即 $z_{s,i}$ 是发送端S到中继 R_i 之间的噪声, $N_{s,i}$ 是其噪声功率。 $z_{i,d}$ 是中继 R_i 到接收端D之间的噪声, $N_{i,d}$ 是相应的噪声功率) h_0, z_0 分别是S到D之间直接信道增益和噪声(无协同时)。

(9)假设有K个备选伙伴,设在某时刻 R_i 是最佳的选择伙伴。

在第1阶段, D和中继 R_i 接收到S发送的信号x分别为

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= h_0\sqrt{P}x + z_0 \\ y_{s,i} &= h_{s,i}\sqrt{P}x + z_{s,i}, i \in [1, \dots, K] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

中继 R_i 对接收到的信号进行放大前传或者解码前传(在本文中,用放大前传AF模式)形成了信号 x_i :

$$x_i = y_{s,i}\alpha_i \quad (2)$$

其中 α_i 是放大因子。根据文献[9]忽略噪声功率,可以得到:

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{1}{P|h_{s,i}|^2}}, i \in [1, \dots, K] \quad (3)$$

在第2阶段, D接收到来自中继 R_i 的信号:

$$y_{i,d} = h_{i,d}\sqrt{P}x_i + z_{i,d} \quad (4)$$

D把接收到的第1阶段的信号和第2阶段的信号进行最大比合并MRC(Maximum Ratio Combiner)。由文献[9],本文在接收端可以推导出最终的SNR, γ_T :

$$\gamma_T = \gamma_0 + \gamma_i \quad (5)$$

其中 $\gamma_0 = P|h_0|^2/N_0$ 是从S到D的即时SNR, γ_i 是S到D经由 R_i 的即时SNR。设 $\gamma_{s,i} = P|h_{s,i}|^2/N_{s,i}$ 是从S到 R_i 的即时SNR。 $\gamma_{i,d} = P|h_{i,d}|^2/N_{i,d}$ 是从 R_i 到D的即时SNR。从式(1),式(3),式(4)可以得到:

$$\begin{aligned} y_{i,d} &= h_{i,d}\sqrt{P} \left[\sqrt{\frac{1}{P|h_{s,i}|^2}} (h_{s,i}\sqrt{P}x + z_{s,i}) \right] + z_{i,d} \\ &= \underbrace{h_{s,i}h_{i,d}\sqrt{\frac{P}{|h_{s,i}|^2}}x}_{\text{Signal}} + \underbrace{\left[h_{i,d}\sqrt{\frac{1}{|h_{s,i}|^2}}z_{s,i} + z_{i,d} \right]}_{\text{Noise}} \end{aligned} \quad (6)$$

所以 γ_i 为

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{\left(h_{s,i}h_{i,d}P\sqrt{\frac{1}{|h_{s,i}|^2}} \right)^2}{\left(\left[h_{i,d}\sqrt{\frac{1}{|h_{s,i}|^2}} \right]^2 N_{s,i} + N_{i,d} \right)} \\ &= \frac{\gamma_{s,i}\gamma_{i,d}}{\gamma_{s,i} + \gamma_{i,d}} \end{aligned} \quad (7)$$

3 策略设计

3.1 MAC 层的公平性保证

本文将采用如下的规则来保证公平性:

(1) 本文首先对协同网络的每一个节点的计数器设置一个初始值 T_{init} ($0 < T_{\text{init}} < T_{\text{tol}}$)。 T_{init} 的大小可以任意设置, 比如 $T_{\text{tol}}/2$, $T_{\text{tol}}/3$ 等。其目的是保证协同通信的进行。否则如果设置 $T_{\text{init}} = 0$ 的话, 协同根本无法进行。

(2) 如果某个节点需要其他节点为他中继信号, 他的计数器就会减去某个正数, 正数的大小依赖于他让别个节点为他传了多少帧。则当前的计数器为 $T_{\text{now}} = T_{\text{init}} - T_{\text{relay}}$, 其中 T_{now} 目前计数器的读数; T_{relay} 是其他节点帮他协同传输的数据帧数。

(3) 反之, 如果某个节点作为中继协助其他节点, 他的计数器就会加上某个正数, 正数的大小基于他协传了多少帧数据。即 $T_{\text{now}} = T_{\text{init}} + T_{\text{relay}}$ 。

(4) 如果某个节点的计数器 $T_{\text{now}} \leq 0$, 他就不能要求其他节点为他中继数据。即: 其他节点最多为他中继 T_{now} 帧。

(5) $T_{\text{relay}} \leq T_{\text{tol}}$ 。

以上的规则保证了协同网络的公平性, 这个规则基于“帮助别人就是帮助自己”, 从而在协同网络中避免了利己主义的节点。

3.2 网络层协同伙伴选择的算法

仅仅有 3.1 节所示的公平性原则是不够的, 这仅仅是公平性的前提。如何使协同网络中每一个节点的寿命的方差最小化是本文的另一个贡献(自适应功率发射在本文暂不考虑), 即使网络节点寿命最大化。假设物理层能够通过 MAC 层向网络层提供 γ_0 和 γ_i ($i \in [1, \dots, K]$), 可以得到其吞吐量^[11]

$$T_{\text{thput}} = \frac{m-c}{m} b R_s f(b, \gamma_s, L) \quad (8)$$

其中 m 是数据包长, c 是每数据包的 CRC(Cyclic Redundancy Check)长度, b 是每MQAM 符号的比特数, R_s 符号速率, $f()$ 是接收包的正确率 PSR(Packet Success Rate), γ_s 是每个符号的 SNR, 即 $\gamma_s = \gamma_T$, 即为时信噪比。假设 K 个候选伙伴的电池寿命分别为 L_1, L_2, \dots, L_K , 其方差为

$$V_{\text{ini}} = \text{Var}(L_1, L_2, \dots, L_K) \quad (9)$$

如果 S 欲发送 M 帧数据到 D , 假设这 M 帧的最终分配如下: N_1 分给 R_1, N_2 分给 R_2, \dots, N_K 分给 R_K , 满足: $N_1 + N_2 + \dots + N_K = M$

网络节点各自的寿命为 $L_1 - N_1, L_2 - N_2, \dots, L_K - N_K$ ($L_i - N_i \geq 0$), 其方差为

$$V_{\text{now}} = \text{Var}(L_1 - N_1, L_2 - N_2, \dots, L_K - N_K) \quad (10)$$

本文的目标便是: 在条件 3.10 节下, 即使式(8) T_{thput} 最大化又使式(10)最小化, 这两者在很多情况下不能一致, 并且 M 值不能事先知道, 故本文采用如下:

$$g = \max_{R_i \in \{R_1, R_2, \dots, R_K\}} (T_{\text{thput}}) \begin{cases} \text{s.t. } V_{\text{now}} \leq V_{\text{th}} (V_{\text{ini}} \leq V_{\text{th}}) \\ \text{s.t. } V_{\text{now}} \rightarrow V_{\text{th}} (V_{\text{ini}} \gg V_{\text{th}}) \end{cases} \quad (11)$$

其中 V_{th} 是方差的阈值 ($V_{\text{th}} \leq V_{\text{ini}}$), V_{th} 的设置可以是静态的也可以是动态的, 在本文中, 采用静态的设置。即: 如果 $V_{\text{ini}} \leq V_{\text{th}}$, 则在满足 $V_{\text{now}} \leq V_{\text{th}}$ 情况下, 使吞吐量最大。如果 $V_{\text{ini}} \gg V_{\text{th}}$, 则动态调整下一帧传送的节点, 使 V_{now} 逼近 V_{th} 。因为信道在帧与帧之间是相互独立的(本文设帧的长度小于等于信道相干时间), 所以可以逐帧的使用式(11)。

3.3 算法描述

实现性能和公平性的方法总结如下:

步骤1 S 是否愿意需要中继且 MAC 层的计数器 $T_{\text{now}}^S > 0$ 。如果他愿意且 $T_{\text{now}}^S > 0$, 进入步骤2, 否则进入步骤5。

步骤2 D 决定是否需要中继根据即时信噪比 γ_0 和阈值 γ_{th} , (γ_{th} 的设置要足够高, 以保证 S 到 D 的性能, 一般可以设为大于 20dB 的数值)。如果 $\gamma_0 < \gamma_{\text{th}}$, 进入步骤3, 否则跳到步骤5并告知 S 。

步骤3 从备选伙伴中, 根据式(11)选出一个最好的协同伙伴 R_i 并告知 R_i 。协同路由 $S \rightarrow R_i \rightarrow D$ 在网络层建立起来, 进入步骤4。

步骤4 第1帧数据可以传输, S 的 T_{now}^S 减去1, 即 $T_{\text{now}}^S = T_{\text{now}}^S - 1$, 协同伙伴 R_i 的计数器 $T_{\text{now}}^{R_i}$ 加1, 即 $T_{\text{now}}^{R_i} = T_{\text{now}}^{R_i} + 1$, 返回步骤1进入下一帧数据。

步骤5 $S \rightarrow D$ 之间的通信没有协同分集。 T_{now}^S 不变。

4 仿真

在本节中, 本文给出各种条件下仿真结果。仿真分为信道功率相同、信道功率不同、初始能量相同、初始能量不同等各种条件。仿真条件设置如下: 所有传输采用 BPSK 调制, 且没有信道编码。数据速率是 1000bit/s。有 5 个备选中继分别是 R_1 到 R_5 , 所有发送无论是从 S 还是 R_i 始终为 1/2 ($P=1$)。假定 S 需要中继。设高斯白噪声的均值为 0, 方差为 N 。假定 S 要发送 10000 帧到 D , 每帧 1000 bit。设 $\gamma_{\text{th}} = 25\text{dB}$, $V_{\text{th}} = 10^5$ 。对吞吐量进行了归一化: 即 bps/J(比特每秒每焦耳)。

4.1 信道功率相同

所有信道的均值为 0, 各个相应信道的方差如下: $\sigma_{S-D}^2 = 1$; $\sigma_{S-R_1}^2 = \sigma_{R_1-D}^2 = 1$, $\sigma_{S-R_2}^2 = \sigma_{R_2-D}^2 = 1$; $\sigma_{S-R_3}^2 = \sigma_{R_3-D}^2 = 1$, $\sigma_{S-R_4}^2 = \sigma_{R_4-D}^2 = 1$; $\sigma_{S-R_5}^2 = \sigma_{R_5-D}^2 = 1$; T_{now}^S 大于 10000。分为初始能量相同: $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_{\text{total}} = 10000$ (frames); 初始能量不同: 设 $T_1 = 1000$, $T_2 = 3000$, $T_3 = 5000$, $T_4 = 7000$, $T_5 = 9000$, $L_{\text{total}} = 10000$ 两种情况。 $V_{\text{ini}} > V_{\text{th}}$ 。图 2 与图 4 为文献[4]策略与本文策略的临时吞吐量的比较。图 3 与图 5 为文献[4]策略与本文策略的各个节点剩余寿命的比较。从图 2, 图 3, 图 4, 图 5 中, 可

以看出，在信道功率相同的情况下，无论从吞吐量还是公平性上比较，本文的策略均优于文献[4]的策略。本文归一化吞吐量之所以本文的策略优于策略文献[4]，是因为在接收端设置阈值，以避免不必要的协同，尤其在高的 P/N 区域。在初始能量相同的情况下，两者的公平性相当。而在初始能量不同的情况下本文的策略可以最大地保证公平性。也即：最大限度的延长节点电池寿命。

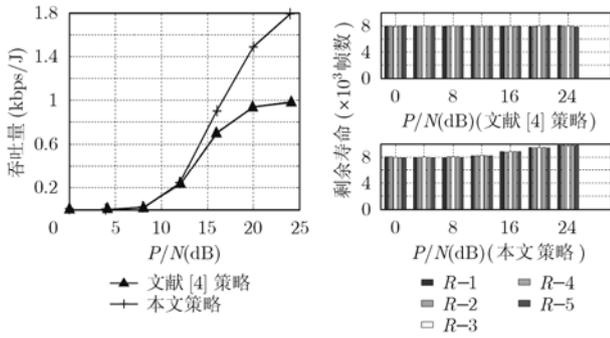


图2 信道功率相同且初始能量相同条件下吞吐量比较

图3 信道功率相同且初始能量相同条件下公平性比较

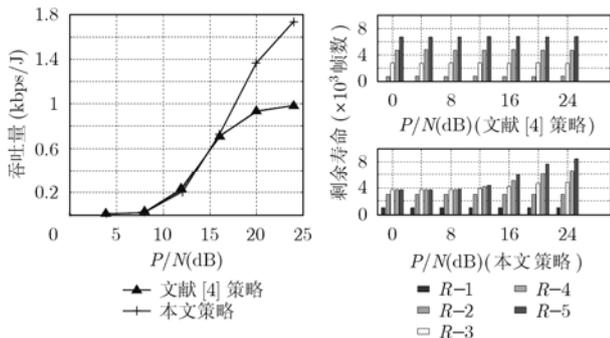


图4 信道功率相同但初始能量不同条件下吞吐量比较

图5 信道功率相同但初始能量不同条件下公平性比较

4.2 信道功率不同

所有信道的均值为 0，各个相应信道的方差如下： $\sigma_{S-D}^2 = 1/4$ ； $\sigma_{S-R_1}^2 = \sigma_{R_1-D}^2 = 1$ ， $\sigma_{S-R_2}^2 = \sigma_{R_2-D}^2 = 1/5$ ； $\sigma_{S-R_3}^2 = \sigma_{R_3-D}^2 = 1/17$ ， $\sigma_{S-R_4}^2 = \sigma_{R_4-D}^2 = 1/37$ ； $\sigma_{S-R_5}^2 = \sigma_{R_5-D}^2 = 1/65$ ；假定 S 的计数器 T_{now}^S 大于 10000。分为初始能量相同： $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_{total} = 10000$ (frames)；初始能量不同：设 $T_1 = 1000$ ， $T_2 = 3000$ ， $T_3 = 5000$ ， $T_4 = 7000$ ， $T_5 = 9000$ ， $L_{total} = 10000$ 两种情况。 $V_{ini} > V_{th}$ 。

从图 6，图 7，图 8，图 9，可以看出归一化吞吐量的比较：本文的策略在高的 P/N 区域归一化的吞吐量比较大，因为在高的 P/N 区域，有更多的概率 $\gamma_0 \geq \gamma_{th}$ ，没有必要始终协同，所以更多的协同伙伴的能量节省下来。但是在低的 P/N 区域，更多的概率是 $\gamma_0 < \gamma_{th}$ ，又因为文献[3,4]不

考虑节点之间的平衡，始终选择性能最好的协同伙伴，所以有较大的吞吐量。公平性比较：本文策略的公平性大大好于文献[4]的策略。从图 7，图 9 中可以看出，无论 P/N 如何，伙伴 R_1 参与了整个协同传输的大部分，这样将导致 R_1 的能量很快耗完，而 R_{3-5} 在整个协同通信过程中，几乎没有参与，这个整个协同网络就非常不公平。而本文的策略， R_1 到 R_5 都参与了整个协同，根据信道状况，参与的程度不同。很显然，这样将导致整个网络更加趋向公平。从图 7，图 9，文献[4]策略的 R_1, R_2 的能量几乎用完，而在本文的策略中，本文保留了。本文的策略很显然可以使整个网络节点的寿命最大化。

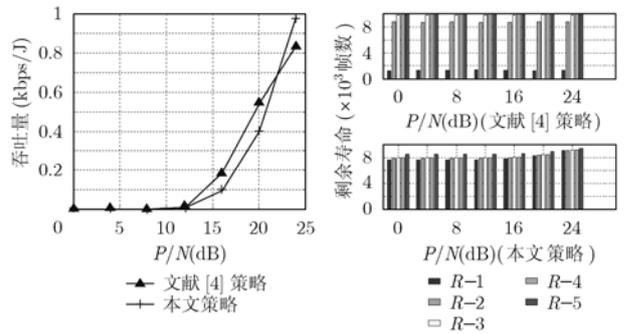


图6 信道功率不同但初始能量相同条件下吞吐量比较

图7 信道功率不同但初始能量相同条件下公平性比较

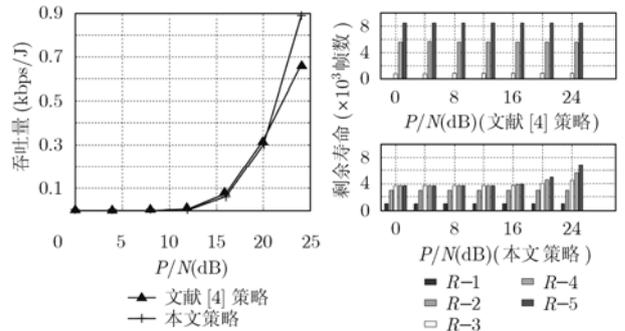


图8 信道功率不同且初始能量不同条件下吞吐量比较

图9 信道功率不同且初始能量不同条件下公平性比较

5 结束语

本文提出一种新的关于协同网络的策略。计数器的使用排除了利己主义，从而保证了整个网络节点的公平性。方差的使用则确保吞吐量的最大化在一定方差的约束下。接收端阈值 γ_{th} 的使用最终决定了是否需要中继以节省系统能量。总之，通过比较得出结论：使用跨层设计，既能确保一定性能，又使其公平性远远优于文献[3, 4]。

参考文献

[1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. Increasing uplink capacity via user cooperation diversity. in Proc. of IEEE

- International Symposium on Information Theory, Washington, DC, Aug. 16–21, 1998: 156.
- [2] Song Wen-miao, Li Yong-qian, Li Bao-Gang, and Hu Jiandong. Cooperative partners Selection in the Cooperative Diversity ad-hoc Network. 2005 2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems, Beijing, China, Nov. 15–17 2005: 1–4.
- [3] Bletsas A, Lippnian A, and Reed D P. A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks, based on reciprocity and channel measurements. IEEE VTC, Stockholm, Sweden, 30 May–1 June 2005, Vol. 3: 1484–1488.
- [4] Bletsas A, Khisti A, Reed D P, and Lippman A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659–672.
- [5] Kim Nam-Soo and Kim Young-Sang. Cooperative diversity with selection combining in Rayleigh fading for wireless Ad-hoc Networks. The 8th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2006), Cheongju University, Korea, 20–22 Feb 2006, Vol.1: 281–284.
- [6] Lee Jeongkeum, Kim Sungjin, and Hari Suman, *et al.* Downlink node cooperation with node selection diversity. IEEE VTC, Stockholm, Sweden, 30 May–1 June 2005, Vol. 3: 1494–1498.
- [7] Lin Z, Erkip E, and Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded Cooperative systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2006, 54(7): 1323–1334.
- [8] Mu Qin and Blum R S. Capacity of wireless ad hoc networks with cooperative diversity: a warning on the interaction of relaying and multi-hop routing. IEEE International Conference on Communications, 2005(ICC 2005), Bethlehem, PA, USA, 16–20 May 2005, Vol. 2: 1128–1131.
- [9] Ribeiro A, Cai X, and Giannakis G B. Symbol error probabilities for general cooperative links Communications, IEEE International Conference on Communications, 2004(ICC 2004) Paris, France, 20–24 June 2004, Vol.6: 3369–3373.
- [10] Paul A and Anghel Mostafa Kaveh. Exact symbol error probability of a cooperative network in a Rayleigh-fading environment. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 3(5): 1416–1421.
- [11] Catreux S, Driessen P F, and Greenstein L J. Data throughputs using multiple-input multiple-output (MIMO) techniques in a noise-limited cellular environment. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2002, 1(1): 226–235.
- 刘威鑫: 男, 1975 年生, 博士, 主要从事通信抗干扰、JD、空时 MIMO、协同通信等方面研究。
- 张忠培: 男, 1967 年生, 副教授, 从事移动通信方面的科研及教学工作。
- 李少谦: 男, 1957 年生, 通信抗干扰国家重点实验室主任, 教授, 博士生导师, 国家 863 计划通信主题个人通信专家组成员, 现从事扩频通信、移动通信方面的教学和研究工作。
- 张 严: 男, 1969 年生, 博士, 主要从事移动通信方面的研究。