

## 无线传感器网络中机会协作传输及其性能研究

颜振亚<sup>①</sup> 郑宝玉<sup>①</sup> 林志伟<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

<sup>②</sup>(阿尔斯特大学计算机与数学学院 北爱尔兰)

**摘要:** 该文基于 Nakagami 信道且考虑节点电路处理能耗, 研究无线传感器网络中机会协作传输及其性能, 解决“怎么协作”“何时协作”“协作的性能”3 个问题, 并从理论上分析机会协作的可能性。仿真结果表明: 机会协作传输能有效地提高系统性能; 节点的电路处理能耗会影响系统性能, 当节点电路处理能耗大到一定程度, 机会协作传输不能带来任何性能增益。

**关键词:** 无线传感器网络; 机会协作; Nakagami 信道; 中断概率

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)01-0215-04

## Research on Opportunistic Cooperation Transmission and Its Performance in Wireless Sensor Network

Yan Zhen-ya<sup>①</sup> Zheng Bao-yu<sup>①</sup> Lin Zhi-wei<sup>②</sup>

<sup>①</sup> (Institute of Signal Processing & Transmission, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>②</sup> (School of Computing and Mathematics, University of Ulster at Jordanstown, Northern Ireland)

**Abstract:** Scheme of opportunistic cooperation transmission and its performance in wireless sensor network is studied based on Nakagami channel in this paper, and effect of circuit power on the scheme is also researched. Three issues including ‘how to cooperation’, ‘when to cooperation’ and ‘performance of cooperation’ are solved. And probability of opportunistic cooperation is discussed from theory. Simulation results show that opportunistic cooperation transmission can reach better performance than direct transmission, and circuit power of sensor node also has great effect on system performance.

**Key words:** Wireless sensor network; Opportunistic cooperation; Nakagami channel; Outage probability

### 1 引言

无线传感器节点一般利用电池供电, 因而节能是研究无线传感器网络始终要关注的关键问题之一。无线信道的多径衰落特性一直是造成节点能效下降的主要因素之一。因此, 如何克服无线信道的多径衰落特性是提高能效的关键所在。用户协作是实现空间分集的一种方法, 是克服无线信道多径衰落的有效手段。用户协作的概念最早出现在文献[1], 最近几年发展迅速, 并取得丰富的成果<sup>[2-5]</sup>。文献[6]从理论上说明反馈信道信息的重要性。文献[7]说明当平均传输功率受限时, 只有利用具有好信道的节点传输信息才能降低系统能耗。

上述文献大都假设发送端未知传输信道信息, 或者仅知道传输信道的统计特性, 此时, 用户不能根据信道的实时信息动态调整发送策略, 造成资源浪费。机会协作传输就是在已知信道部分信息(本文指的是信道幅度)时, 根据信道幅度

动态地调整协作传输策略的一种机制。只有当协作节点的信道有利于信息传输时, 才进行协作传输, 否则, 直接传输信息。

已有文献[8-10]讨论了无线网络中如何进行机会通信。但这些文献都是基于瑞利信道进行讨论, 且没有考虑节点电路处理能耗的影响。一方面由于传感器节点的发射距离很短, 信息的发射和接收间一般存在直接视距路径(LOS), 因此, 利用瑞利衰落建模无线信道是不合适的, 本文利用适合无线传感器网络实际情况的 Nakagami 建模无线信道。另一方面, 节点电路处理能耗是影响无线传感器网络系统性能的一个重要因素<sup>[11-13]</sup>。本文主要探讨无线传感器网络中, 基于 Nakagami 信道且考虑节点电路处理能耗时的机会协作传输策略及其性能, 深入讨论“何时协作”, “怎么协作”以及“协作的性能”3 个问题。

### 2 系统模型

源节点向目的节点传输信息, 如源节点和目的节点间的信道处于深度衰落状态, 源节点直接传输信息不利于信息的有效传输。此时, 源节点的邻居节点和目的节点间的信道可能更利于信息传输, 则利用邻居节点进行协作传输。换句话

2007-06-25 收到, 2007-12-17 改回

国家自然科学基金项目(60372107), 江苏省博士创新基金(200670), 江苏省自然科学基金重大项目(BK2007729)和南京邮电大学攀登项目(NY207061)资助课题

说,当源节点的邻居节点更有利于信息传输时,源节点才采用协作传输机制,否则源节点直接向目的节点传输信息。设源节点有  $N$  个邻居节点,令  $d_s$  表示源节点和邻居节点的平均距离,  $d_l$  表示源节点和目的节点的距离,借鉴文献[11, 12],假设  $d_s \ll d_l$ 。源节点及邻居节点到目的节点的信道分别用  $h_{sd}$  和  $h_{id}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 表示,且分别服从参数为  $(m_{sd}, \Omega_{sd})$  和  $(m_{id}, \Omega_{id})$  的 Nakagami 分布。

**定义 1** 令

$$K = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, N\}} \|h_{id}\| \quad (1)$$

把源节点的邻居节点中具有最大信道幅度的节点  $K$  称为机会协作节点。

为描述节点电路处理能耗对系统性能的影响,把传感器节点总能耗  $P$  分为发射功率  $P_t$  和电路处理能耗  $P_c$  两部分。即  $P = P_t + P_c$ 。进一步地,把节点接收和发射信息所需要的电路处理能耗分别表示为  $P_{ct}$  和  $P_{cr}$ 。简单起见,假定  $P_{ct} = P_{cr}$ 。

**定义 2** 源节点把其信息经无线信道传送给机会协作节点所需的能耗为

$$P_0 = P_{ct} + \bar{P}_t + P_{cr} \quad (2)$$

其中  $\bar{P}_t$  表示源节点的发射功率,借鉴文献[11, 12],有  $\bar{P}_t = C d_s^k$  ( $k \in [2, 5]$ )。由于前面假定  $d_s \ll d_l$ ,即源节点和机会协作节点间的距离  $d_s$  足够短,那  $\bar{P}_t$  就是充分小的一个值。本文主要考虑节点电路处理能耗对机会传输机制的影响,故  $\bar{P}_t \ll P_{cr}$ ,有式(2)中  $\bar{P}_t \approx 0$ 。

Nakagami 信道状态的机会协作传输过程如下:在传输信息的整个单位时间段 1 内,源节点  $S$  的信道  $h_{sd}$  都足够好,源节点以功率  $P_1$  直接向目的节点发送信息,此时,机会协作节点  $C$  不参与信息发送;但如在信息传输的某个时间段  $t$  ( $t \in [0, 1]$ ) 内,源节点的信道  $h_{sd}$  不够好,源节点就借助机会协作节点发射信息,源节点把信息经无线信道传送给机会协作节点,由机会协作节点完成信息发送。

**定义 3** 考虑节点的电路处理能耗时,直接传输模式下目的节点的信噪比  $\text{SNR}_{\text{DT}}$  为

$$\text{SNR}_{\text{DT}} = \frac{P_1 \|h_{sd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} \quad (3)$$

其中  $d_l^2$  反映的是信道大尺度衰落,  $E_0$  表示信息能量,  $N_0$  为高斯白噪声方差,  $P_1 = P - P_{ct}$  为源节点的发送功率,  $P$  为系统允许的总功率。

**定义 4** 考虑节点的电路处理能耗时,机会协作传输模式下目的节点的信噪比  $\text{SNR}_{\text{OC}}$  为

$$\text{SNR}_{\text{OC}} = \max \left( \frac{P_1 \|h_{sd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2}, \frac{P_2 \|h_{kd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} \right) \quad (4)$$

其中  $P_2 = P - 3P_{ct}$  表示机会协作节点的发射功率,  $P_{ct}$  前面的系数 3 包括源节点发射信息的电路处理能耗以及机会协作节点接收和发射信息所需的电路处理能耗。

### 3 最优机会协作传输策略

机会协作传输的本质就是根据  $\|h_{sd}\|$  和  $\|h_{kd}\|$  决定是否进行协作传输。直观地,如不考虑其他因素的影响,当  $\|h_{sd}\| < \|h_{kd}\|$  时,协作传输有利于信息传输。但考虑节点的电路处理能耗时,进行机会协作传输的条件不再像上面那样简单。下面探讨这个问题。

**命题 1** 系统的总功率一定时,当节点的电路处理能耗  $P_{ct}$  超过一定值时,不论源节点的信道如何,节点将不会进行机会协作传输。

**证明** 机会协作节点的发射功率  $P_2$  需满足  $P_2 > 0$ ,即有  $P_{ct} < (1/3)P$ ,这表明只有当节点的电路处理能耗小于  $(1/3)P$  时,节点才会考虑进行机会协作传输。事实上,从式(4)有

$$\begin{aligned} & \lim_{P_{ct} \rightarrow \frac{P}{3}} \text{SNR}_{\text{OC}} \\ &= \lim_{P_{ct} \rightarrow \frac{P}{3}} \max \left( \frac{(P - P_{ct}) \|h_{sd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2}, \frac{(P - 3P_{ct}) \|h_{kd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} \right) \\ &= \lim_{P_{ct} \rightarrow P/3} \frac{(P - P_{ct}) \|h_{sd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} = \lim_{P_{ct} \rightarrow P/3} \text{SNR}_{\text{DT}} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)也表明当电路处理能耗增加到一定程度时,机会协作传输不能带来信噪比增益。证毕

**命题 2** 对于给定的总功率  $P$  及  $\|h_{sd}\|$  和  $\|h_{kd}\|$ ,最优的机会协作传输策略为

(1) 当  $\|h_{sd}\| \geq \|h_{kd}\|$  时,源节点直接向目的节点传输信息。

(2) 当  $\|h_{sd}\| < \|h_{kd}\|$  时,

(a) 如不考虑电路处理能耗  $P_{ct}$  的影响,即  $P_{ct} = 0$ ,源节点借助机会协作节点进行协作传输。

(b) 如考虑电路处理能耗  $P_{ct}$  的影响,则若要进行协作传输,  $\|h_{sd}\|$  和  $\|h_{kd}\|$  需满足式(6),否则源节点仍直接向目的节点传输信息。

$$\|h_{kd}\|^2 > \frac{P - P_{ct}}{P - 3P_{ct}} \|h_{sd}\|^2 \quad (6)$$

**证明** (1)部分和(a)的结论是显然的。下面着重证明(b)中的情况。

事实上,机会协作传输要有利于信息的接收,需满足下列关系:

$$\text{SNR}_{\text{DT}} < \text{SNR}_{\text{OC}} \quad (7)$$

把式(3)和式(4)代入式(7)整理即得式(6)。从式(6)还可以看出,当  $P_{ct} = 0$  时,式(6)简化为  $\|h_{sd}\| < \|h_{kd}\|$ 。这就是(b)的结果。

从命题 1 和命题 2 可看出节点进行机会协作传输不仅与源节点和机会协作节点的信道状态有关,还跟电路耗能大小有关。

### 4 系统中断概率分析

本节研究系统的中断概率性能。事实上,可把考虑电路处理能耗的系统等效成不考虑电路处理能耗的系统,只不过

等效系统中用于发射信息的总功率减少了。令  $P_{\text{total}}^{\text{OC}} = (P - P_{ct})\delta(h - h_{sd}) + (P - 3P_{ct})\delta(h - h_{kd})$  表示等效系统的发射总功率, 并记集合  $\Psi = \{h_{kd}; \|h_{sd}\| < \|h_{kd}\|\}$  表示等效系统下采用机会协作传输机制的信道状态集合。

先分析机会协作传输的可能性。经过计算, 系统进行机会协作传输的概率为(过程略):

$$p(h_{kd} \in \Psi) = \frac{m_{kd}^{m_{sd}-1} m_{sd}^{m_{kd}} \Omega_{kd}^{m_{sd}} \Omega_{sd}^{m_{kd}-1}}{(m_{kd} \Omega_{sd} + m_{sd} \Omega_{kd})^{m_{kd}+m_{sd}-1}} \cdot \sum_{i=0}^{m_{kd}-1} \left(1 + \frac{m_{sd} \Omega_{kd}}{m_{kd} \Omega_{sd}}\right)^i C_{m_{kd}+m_{sd}-2-i}^{m_{sd}-1} \quad (8)$$

从式(8)明显可以看出, 对于给定的统计信道参数  $(m_{sd}, \Omega_{sd})$  和  $(m_{kd}, \Omega_{kd})$ ,  $p(h_{kd} \in \Psi) \neq 0$ 。也就是说, 机会协作节点进行协作传输的概率是不等于零的。

下面探讨系统的中断概率性能。中断概率表示为

$$p_{\text{out}} = p(\text{SNR}_{\text{oc}} < \beta) \quad (9)$$

其中  $\beta$  为事先给定的阈值。利用式(4)得

$$p_{\text{out}} = p\left(\frac{P_{\text{total}}^{\text{OC}} \|h_{sd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} < \beta\right) p\left(\frac{P_{\text{total}}^{\text{OC}} \|h_{kd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} < \beta\right) \quad (10)$$

令

$$p_{\text{out}}^1 = p\left(\frac{P_{\text{total}}^{\text{OC}} \|h_{sd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} < \beta\right) \quad (11)$$

$$p_{\text{out}}^2 = p\left(\frac{P_{\text{total}}^{\text{OC}} \|h_{kd}\|^2 E_0}{N_0 d_l^2} < \beta\right)$$

由于  $\|h_{sd}\|$  服从 Nakagami 分布, 则  $\|h_{sd}\|^2$  服从参数为  $\left(m_{sd}, \frac{m_{sd}}{\Omega_{sd}}\right)$  的 Gamma 分布, 有

$$p_{\text{out}}^1 = \frac{1}{\Gamma(m_{sd})} \left(\frac{m_{sd}}{\Omega_{sd}}\right)^{m_{sd}} \int_0^{\beta \frac{N_0 d_l^2}{P_{\text{total}}^{\text{OC}} E_0}} x^{m_{sd}-1} e^{-\frac{m_{sd}}{\Omega_{sd}} x} dx \quad (12)$$

令  $y = \frac{m_{sd}}{\Omega_{sd}} x$ , 求得

$$p_{\text{out}}^1 = \frac{1}{\Gamma(m_{sd})} \left( \Gamma(m_{sd}) - \exp\left(-\frac{m_{sd} N_0 d_l^2 \beta}{\Omega_{sd} E_0 P_{\text{total}}^{\text{OC}}}\right) \cdot \sum_{n=0}^{m_{sd}} \frac{m_{sd}!}{(m_{sd}-n)!} \left(\frac{m_{sd} N_0 d_l^2 \beta}{\Omega_{sd} E_0 P_{\text{total}}^{\text{OC}}}\right)^{(m_{sd}-n)} \right) \quad (13)$$

同理得

$$p_{\text{out}}^2 = \frac{1}{\Gamma(m_{kd})} \left( \Gamma(m_{kd}) - \exp\left(-\frac{m_{kd} N_0 d_l^2 \beta}{\Omega_{kd} E_0 P_{\text{total}}^{\text{OC}}}\right) \cdot \sum_{n=0}^{m_{kd}} \frac{m_{kd}!}{(m_{kd}-n)!} \left(\frac{m_{kd} N_0 d_l^2 \beta}{\Omega_{kd} E_0 P_{\text{total}}^{\text{OC}}}\right)^{(m_{kd}-n)} \right) \quad (14)$$

把式(13)和式(14)代入式(10), 得到

$$p_{\text{out}} = \prod_{i=s,k} \frac{1}{\Gamma(m_{id})} \left( \Gamma(m_{id}) - \exp\left(-\frac{m_{id} N_0 d_l^2 \beta}{\Omega_{id} E_0 P_{\text{total}}^{\text{OC}}}\right) \cdot \sum_{n=0}^{m_{id}} \frac{m_{id}!}{(m_{id}-n)!} \left(\frac{m_{id} N_0 d_l^2 \beta}{\Omega_{id} E_0 P_{\text{total}}^{\text{OC}}}\right)^{(m_{id}-n)} \right) \quad (15)$$

式(15)就是进行机会协作机制时中断概率的表达式。

## 5 仿真试验及性能分析

本节通过仿真验证机会协作传输方案的性能。图 1 给出机会协作节点信道幅度和源节点信道幅度的比值与目的节点接收信噪比的关系曲线图。当不考虑电路处理能耗  $P_{ct}: P = 0:1$  时, 如机会协作节点的信道优于源节点的信道  $h_{kd}: h_{sd} > 1$ , 则机会协作传输能显著提高目的节点的信噪比。当考虑电路处理能耗  $P_{ct}: P = 1:10$  时, 只有当  $h_{kd}: h_{sd} > a$  ( $a \in [1.1, 1.2]$ ) 时, 机会协作传输才优于直接传输。这是因为考虑节点电路处理能耗时, 需要补偿机会协作节点的电路能耗所带来的性能损失。当  $P_{ct}: P = 1:3$  时, 从图 1 可看出, 不管协作节点的信道状态如何, 直接传输的性能要优于协作节点的传输。

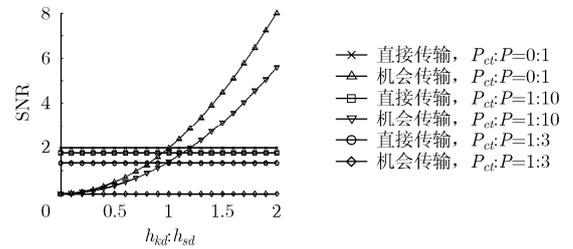


图 1 不同电路处理能耗对接收端信噪比的影响

表 1 给出不同情况下  $p(h_{kd} \in \Psi)$  的理论值和仿真值的比较, 其仿真结果非常靠近理论值。综观表 1 可得到: 不管源节点和机会协作节点的信道统计特性如何, 机会协作传输的概率总是存在的; 统计性能较优的信道, 其实时信道幅度未必就优, 只不够实时信道幅度较优的概率增大而已。

表 1  $p(h_{kd} \in \Psi)$  的理论值和仿真值比较

$p(h_{kd} \in \Psi)$	理论值	仿真值
$(m_{sd}, m_{kd}) = (2, 2), \Omega_{sd} = \Omega_{kd}$	0.5000	0.5002
$(m_{sd}, m_{kd}) = (1, 1), \Omega_{sd} = \Omega_{kd}$	0.5000	0.5007
$(m_{sd}, m_{kd}) = (2, 3), \Omega_{sd} = \Omega_{kd}$	0.5248	0.5254
$(m_{sd}, m_{kd}) = (1, 3), \Omega_{sd} = \Omega_{kd}$	0.5781	0.5804
$(m_{sd}, m_{kd}) = (3, 2), \Omega_{sd} = \Omega_{kd}$	0.4752	0.4733
$(m_{sd}, m_{kd}) = (3, 1), \Omega_{sd} = \Omega_{kd}$	0.4219	0.4175

图 2, 图 3 和图 4 分别给出 3 种不同情况下中断概率性能曲线。从图 2-图 4 可看出, 不管什么情况, 机会协作传输的性能在仿真和理论方面都要优于直接传输的性能。纵观图 2-图 4 发现: 机会协作传输下仿真值和其理论值间的距离还比较大。这是由于仿真时, 源节点周围仅有一个机会协作节点可供选择。图 5 给出源节点邻居节点数对中断概率性能的影响曲线图。随着源节点邻居节点数的增加, 中断概率的仿真值越来越接近其理论值。

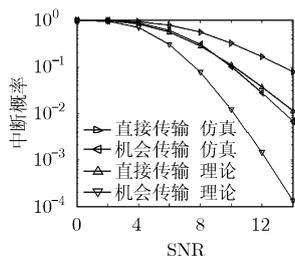


图2 源节点信道和机会协作节点信道统计特性相同情况下中断概率性能比较

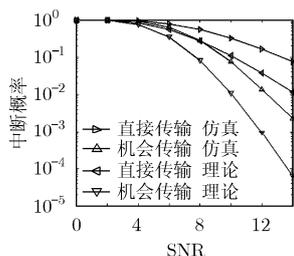


图3 机会协作节点信道的统计特性优于源节点情况下中断概率性能比较

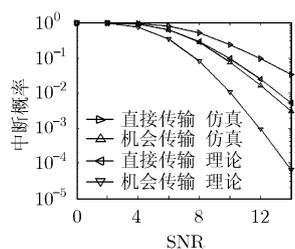


图4 机会协作节点信道的统计特性劣于源节点情况下中断概率性能比较

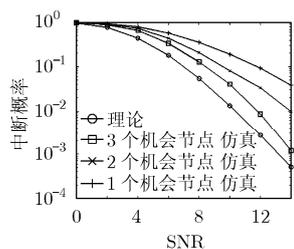


图5 不同源节点周围个数下中断概率性能比较

图6给出不同节点电路处理能耗下中断概率曲线。随着节点电路处理能耗的增大，不管是从仿真，还是理论的角度看，机会协作带来的中断概率增益都明显减少。特别地，当 $P_{ct}:P=3:10$ 时，机会协作机制下的中断概率和直接传输的中断概率基本上重合，也就是说，机会协作传输不能带来任何增益。

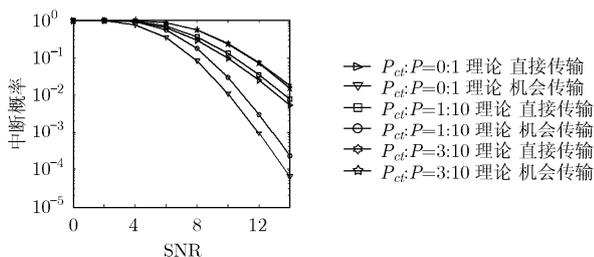


图6 不同电路处理能耗对中断概率性能的影响

## 6 结束语

本文首先基于信道的部分状态信息，给出机会协作框图，分析“怎么协作”的问题；接着，分析考虑节点电路处理能耗时机会协作传输的条件，着重解决“何时协作”的问题；最后，探讨了机会协作传输的中断概率，着重讨论“协作的性能”问题，并从理论上给出机会协作传输的可能性。仿真结果表明：不论机会协作节点信道的统计特性如何，基于信道实时信息的动态机会协作机制都能有效地提高系统性能；节点电路处理能耗明显影响着机会协作机制，随着节点电路处理能耗的增大，机会协作机制带来的性能增益越来越

越少，当节点电路处理能耗超过一定程度后，机会协作传输将不能带来任何增益。

## 参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. Increasing uplink capacity via user cooperation diversity. *IEEE International Symp. On Information Theory*. 1998(8). Cambridge MA USA, 16-21 Aug 1998: 156.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity-part i: System description. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [3] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity-part ii: Implementation and performance analysis. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [4] Laneman J N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [5] Hunter T E, Sanayei S, and Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(2): 375-391.
- [6] Mulkavilli K K, et al. On beamforming with finite rate feedback in multiple antenna systems. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(10): 2562-2579.
- [7] R Knopp and Humblet P A. Information capacity and power control in single cell multi-user communications. *ICCC'95*. Washington USA, June 18-22 1995: 331-335.
- [8] Gunduz D and Erkip E. Opportunistic cooperation and power control strategies for delay-limited capacity. *CISS 2005*. Baltimore, March 16-18 2005.
- [9] Yang J and Brown III D R. The effect of channel state information on optimum energy allocation and energy efficient of cooperative wireless transmission systems. *CISS 2006*. Princeton USA, March 22-24 2006: 1044-1049.
- [10] Zhao Qing. On the use of channel state for energy efficient information retrieval sensor networks. *ICASSP'05*, Philadelphia, USA, March 22 2005, III: 665-668.
- [11] Cui Shuguang, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1089-1098.
- [12] Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006, 5(5): 984-989.
- [13] Zhou Quan and Dai Huaiyu. Joint antenna selection and link adaptation for MIMO systems. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2006, 55(1): 243-255.

颜振亚：男，1980年生，博士生，研究方向为无线传感器网络、协作通信等。  
郑宝玉：男，1945年生，教授，博士生导师，研究方向为现代通信中的智能信号处理、Ad hoc网络等。  
林志伟：男，1978年生，博士生，研究方向为无线传感器网络、数据融合与挖掘等。