

无线传感器网络中协作通信的能耗优化方法研究

江若宜 季薇 郑宝玉

(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

摘要: 针对能量受限的无线传感器网络, 该文综合考虑了协作节点数量和调制方式对系统能量有效性的影响, 提出一种能量最优的综合优化方法。文中首先给出了在 Rayleigh 衰落信道环境下, 协作通信系统采用二相相移键控(BPSK)和 M 进制正交幅度调制(MQAM)时误码率的闭式表达, 同时对协作通信的系统能耗进行了分析。在此基础上, 根据能耗最小化原则对协作节点数量和调制方式进行了联合优化。仿真结果表明, 与调制方式固定或协作节点数固定的系统相比, 该方案能进一步降低协作通信的系统能耗。

关键词: 无线传感器网络; 能量有效性; 协作通信; 调制方法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1475-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00521

Joint Optimization of Energy Consumption in Cooperative Wireless Sensor Networks

Jiang Ruo-yi Ji Wei Zheng Bao-yu

(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing 210003, China)

Abstract: In this paper, the optimum numbers of cooperative nodes and modulation methods are analyzed to minimize the total energy consumption in a cooperative wireless sensor networks, which is power-limited. An exact closed-form expression is derived for the average BER in Rayleigh-fading channels for both BPSK and MQAM modulations, and then the energy of cooperative system is analyzed. Finally a synthetic optimization of modulation and number of cooperative nodes is presented to minimize the total energy consumption. Comparisons with the fix-rate or fix numbers of cooperative nodes systems demonstrate the significant energy saving of the synthetic optimization.

Key words: Wireless sensor networks; Energy efficiency; Cooperative communication; Modulation method

1 引言

协作分集是空间分集的一种新形式, 它通过多节点传输形成的虚拟多天线阵列实现空间分集, 以此有效抵抗无线信道固有的衰落特性的影响。近年来, 协作分集被广泛应用于无线传感器网络中^[1-11]。在这类网络里, 节点一般是由电池供电, 而电池能量通常难以及时进行补充, 因此能量有效性在该类网络中至关重要。协作分集一方面可以抵抗无线信道的衰落影响, 在获得相同系统性能的条件下, 有效降低传输能耗^[1,2]; 一方面解决了体积受限的传感器节点无法安装多天线以实现空间分集的难题, 因

此近年来受到广泛关注。

现有无线传感器网络中的协作分集能耗有效性研究涉及到各个方面。文献[1]中最早分析了在两个节点协作传输时的能耗问题, 仿真表明当传输距离超过一定门限时, 协作发送和接收可以极大节约系统能耗。文献[2]在文献[1]的基础上考虑了节点之间的信息传递和信道训练的能耗开销, 提出了一个更为精确的能耗模型。文献[3]提出了基于分层空时编码 V-BLAST 的协作传输策略, 由于该方案不需要先进行节点间的数据交换及再处理, 比起 Alamouti 编码方案节省了能量。文献[4,5]则研究了相应的压缩编码算法, 消除节点间的数据冗余以进一步降低能耗。文献[6,7]研究了最优协作节点选择以及源节点与单协作节点之间的能量分配问题。文献[8,9]将单跳协作模型扩展到多跳协作模型, 源节点的信息经过多次协作中继转发后到达目标节点, 更加符合实际的网络状况; 作者在此基础上进行联合跨层优

2009-04-10 收到, 2010-02-09 改回

国家自然科学基金(60972039), 江苏省自然科学基金重点项目(BK2007729), 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(06KJA51001)和江苏省高校自然科学研究项目(09KJB510012)资助课题

通信作者: 江若宜 jiangruoyi@gmail.com

化, 仿真表明跨层优化能显著节约能耗。

然而, 现有的研究大多是基于固定的协作节点个数或者固定的调制方式。例如: 文献[1-7]都是以单个发送协作节点为背景进行的分析。文献[8,9]虽然扩展到多跳协作, 但每跳的协作节点数仍是一个固定的数目。文献[10]中设定了一个信噪比门限值, 随机抽取若干个信噪比超过该门限的节点进行协作传输, 协作节点数目扩展到可变, 但其重点在于研究空时分组码的维数对能耗的影响, 没有计算电路能耗, 也没有考虑多速率调制。文献[11]中假设在簇内所有能正确解码的节点都有转发的责任, 通过调节簇的大小来调节协作节点的个数, 但是也没有结合自适应速率调制。针对上述问题, 本文在传统的分簇无线传感器网络下, 寻找最优的簇成员参与协作, 并将其与自适应速率调制相结合, 实现了协作节点数和调制方式的联合最优化。

文章结构安排如下: 第 2 节描述了系统模型。第 3 节基于虚拟 MIMO 结构分析并推导了带加性高斯白噪声的 Rayleigh 衰落信道下的 BPSK 和 MQAM 误码率闭式解。第 4 章分析了系统的总能耗, 并基于能量有效性对协作节点个数和调制方式进行了优化, 最后给出了具体的仿真并根据仿真结果讨论了各种参数对系统能耗的影响。第 5 节进行了总结。

2 系统模型

本文考虑一个典型的分簇无线传感器网络, 每个簇有一个簇头节点和若干个簇成员, 如图 1 所示。当 A 簇的簇头节点发送信号到 B 簇时, A 簇的簇成员也能够接收到来自簇头的信息, 并将该信息进行解码, 再编码转发。在该簇中的每个节点只有一根天线, 但是它们之间可以相互协作形成虚拟多天线路阵从而实现空间分集。

值得注意的是, 并不是所有正确接收到信号的簇成员都参与协作传输, 而是根据本次传输的需要

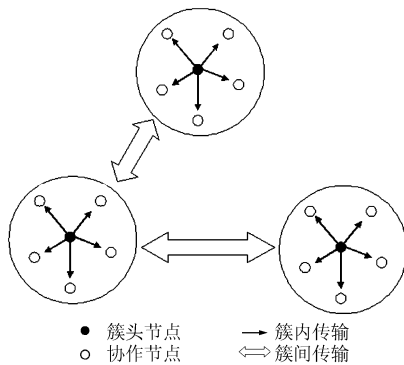


图 1 分簇无线传感器网络

来进行协作节点数目的调节。目标节点会合并所有接收到的数据(包括来自簇头节点的信息)进行联合解码。

本文做出以下假设: (1)信道特性为带高斯白噪声的 Rayleigh 平坦衰落, 并同时经历路径衰落。(2)由于簇间距离远大于簇内各节点之间的距离, 可以假设一个簇内的各节点到另一个簇簇头节点的距离相等。

3 协作系统误码率分析

假设有 N_s 个协作节点参与通信, 与源节点一起共同采用空时分组码来实现发送分集。为了简化模型, 本文假定在各协作节点和源节点之间的发送能量相同。接收端将接收到的各路信号以最大合并信噪比准则进行组合, 在已获得准确信道信息的情况下, 可以实现信噪比最大化, 这时接收端瞬时信噪比为^[12]

$$\gamma_b = \frac{\|\mathbf{H}\|_F^2 \bar{E}_b}{(N_s + 1) N_0} \tag{1}$$

这里, N_0 为加性高斯白噪声的单边功率谱密度, \bar{E}_b 是发送比特能量。 $\|\mathbf{H}\|_F^2$ 为系统信道转移矩阵 \mathbf{H} 的 Frobenius 平方范数。

假设信道服从 Rayleigh 不相关平坦衰落, 则 $\|\mathbf{H}\|_F^2$ 应该服从自由度为 $2(N_s + 1)$ 的中心 $\chi^2(2N_s + 2)$ 分布。其概率分布函数为^[12]

$$f(x) = \frac{1}{N_s!} x^{N_s} e^{-x} \tag{2}$$

则在 Rayleigh 不相关衰落信道下的平均误码率为

$$\overline{\text{PER}} = \int_0^\infty \text{PER}(\gamma_b) f(\|\mathbf{H}\|_F^2) d(\|\mathbf{H}\|_F^2) \tag{3}$$

采用 BPSK 调制方式时, AWAN 信道中的瞬时误码率 $\text{PER} = Q(\sqrt{2\gamma_b})$, $Q(a) = \int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$

代入式(3)可得平均误码率为

$$\overline{\text{PER}}(N_s, \bar{E}_b) = \int_0^\infty Q\left[\sqrt{2 \frac{\|\mathbf{H}\|_F^2 \bar{E}_b}{(N_s + 1) N_0}}\right] \cdot \frac{1}{N_s!} (\|\mathbf{H}\|_F^2)^{N_s} e^{-\|\mathbf{H}\|_F^2} d(\|\mathbf{H}\|_F^2) \tag{4}$$

使用下述公式化简能够得到误码率的闭式解^[13]为

$$\int_0^\infty x^{2n-1} e^{-\frac{x^2}{2}} Q\left(\frac{x}{\beta}\right) dx = \frac{(n-1)!}{2} \left[1 - (\beta^2 + 1)^{-\frac{1}{2}}\right]^n \cdot \sum_{k=0}^{n-1} 2^{-k} C_{n-1+k}^k \left[1 + (\beta^2 + 1)^{-\frac{1}{2}}\right]^k \tag{5}$$

从而求得在 Rayleigh 信道下多节点协作 BPSK 误码率为

$$\overline{\text{PER}}(N_s, \overline{E}_b) = \frac{1}{2^{N_s+1}} \left[1 - \left(\frac{N_0(N_s+1)}{\overline{E}_b} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right]^{N_s+1} \cdot \sum_{k=0}^{N_s} 2^{-k} C_{N_s+k}^k \left[1 + \left(\frac{N_0(N_s+1)}{\overline{E}_b} + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right]^k \quad (6)$$

同理, 在 AWGN 信道里, M 进制正交振幅调制(MQAM)的瞬间误码率为

$$\text{PER} \approx \frac{4}{b} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left[\sqrt{3b\gamma_b / (M-1)} \right] \quad (7)$$

其中 $M = 2^b$, $b \geq 2$ 且为偶数; 当 b 为奇数, 去掉式(7)中的 $(1 - 1/\sqrt{M})$ 。

将式(7)代入式(3), 求得在 Rayleigh 衰落信道下 MQAM 的统计误码率

$$\overline{\text{PER}}(N_s, \overline{E}_b, b) \approx \frac{4}{b} \left(1 - \frac{1}{2^{b/2}} \right) \frac{1}{2^{N_s+1}} \left[1 - (\beta^2 + 1)^{-1/2} \right]^{N_s+1} \cdot \sum_{k=0}^{N_s} 2^{-k} C_{N_s+k}^k \left(1 + (\beta^2 + 1)^{-1/2} \right)^k \quad (8)$$

式中 $\beta^2 = \left(\frac{2 \times (2^b - 1)(N_s + 1)N_0}{3b\overline{E}_b} \right)$, b 为偶数; 当 b 为奇数时, 去掉式中的 $(1 - 1/2^{b/2})$ 项。

4 协作系统能耗分析和优化

整个通信过程中能耗可以分为电路能耗和功放能耗, 平均每传输一个比特所消耗的总能耗为

$$E_{\text{total}} = (P_c + P_{\text{PA}}) / bR_s \quad (9)$$

其中 P_c , P_{PA} 分别为电路功率和功放功率, R_s 为符号速率, bR_s 为比特速率, 本文假设 $R_s = 10$ k symbol/s。

电路功率由发送电路功率 P_{ct} 和接收电路功率 P_{cr} 组成。考虑整个协作通信过程, 每次簇内通信伴随源节点的发送和 N_s 个节点的接收, 簇间通信伴随着 N_s 个协作节点的发送和一个目标节点的接收。因此

$$P_c = (N_s + 1)(P_{ct} + P_{cr}) \quad (10)$$

P_{ct} 约为 98.2 mW, P_{cr} 约为 112.5 mW^[1]。

若综合考虑路径衰落及其它损耗, 发送每比特所需要的功放能耗应修正为

$$E_{\text{PA}} = P_{\text{PA}} / bR_s = G\overline{E}_b d^n \quad (11)$$

在给定的误码率下, \overline{E}_b 可对式(6), 式(8)取反函数求得。 G 是一个常数, 取决于调制形式、电路补偿、天线功率增益等参数, $G \approx 5 \times 10^8$ ^[1]。 d 是发送节点到目标节点的距离。 n 对于不同的传输环境取值不同, 对于无线信道来说, 一般取 n 为 2 到 4。对于

自由空间 n 一般取 2。如果考虑周围环境及天气情况影响, 通常 n 取 3, 在本文中假设 n 为 3。

综上, 每比特所消耗的总能量应为

$$E_{\text{total}} = (N_s + 1)(P_{ct} + P_{cr}) / bR_s + G\overline{E}_b d^n \quad (12)$$

从式(6), 式(8), (12)可以看出, 在一定的误码率要求和给定的信道条件下, 传输一个比特所消耗的总能耗 E_{total} 和协作节点个数 N_s , 调制参数 M (当二进制调制时, $M = 2$) 以及传输距离 d 相关。已经证明, 误码率的改善程度与分集阶数成正比^[12] (本文中分集阶数等于参与协作的发送节点个数 $N_s + 1$); 换言之, 在给定的误码率要求下, 功放能耗会随着协作节点个数的增多而下降。但是一味提高协作节点个数并非是最节能的方法, 因为从式(12)可以看出, 在提高协作节点个数的同时电路能耗也会增大。因此, 对于一定的距离 d , 存在最优的协作节点个数, 使系统总能耗最小。除协作节点个数之外, 自适应调制方式也是一种有效降低能耗的方式^[1,2]。因此, 本文将寻找最优的参数集(最优调制方式和协作节点个数), 从而最小化系统的总能耗。

4.1 固定速率 BPSK 系统中的协作节点个数最优化

首先在固定速率 BPSK 调制下寻找最优的协作节点个数, 这时 $b = 1$ 。上文已经指出, 电路能耗随着发送节点的增加而线性增加, 而在发送距离 d 固定时, \overline{E}_b 会随着协作节点个数的增大而减小。因此针对给定的误码率和距离, 存在最优的协作节点个数。

假定误码率性能 $P_b = 0.0001 = \overline{\text{PER}}$ 。当协作节点个数改变时(0 到 4), 系统的总能耗情况如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 当误码率等于 10^{-4} 时, 对于固定速率 BPSK 调制, 随着距离的增大, 最优的协作节点数也在增大。例如在簇间距离为 13 m 时, 一个协作节点通信模式开始超过单节点传输模式; 簇间距离为 50 m 时, 两个协作节点模式超过单节点协作模式。其后的交叉点分别发生在 70 m, 100 m, 130 m 处。这说明针对不同的协作距离改变协作节点数目会是一种有效的节能方式。

图 3 与图 2 相比, 误码率的要求降低为 10^{-3} , 其他参数不变。可以看出交叉点后移到 30 m, 80 m, 90 m, 150 m, 180 m 处, 这说明当系统对误码率的要求高时, 多节点协作通信的优势要更显著。

图 4 画出了在两种不同的误码率要求下, 不同的簇间距离对应的最优协作节点, 这里只仿真了 1 到 6 个节点协作通信的情况(1 个节点为非协作模式)。由图 4 可以看出, 在误码性能要求较高的情况下, 该阶梯型曲线左移, 这说明最优协作节点个数

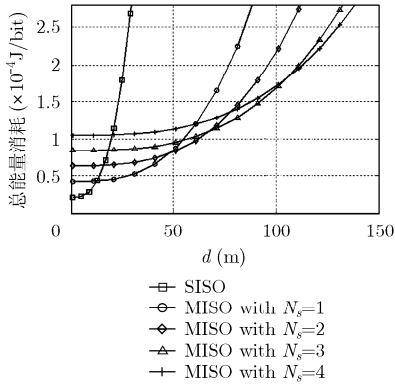


图 2 协作节点不同时所对应的系统总能耗, 采用 BPSK 调制方式, $P_b=10^{-4}$

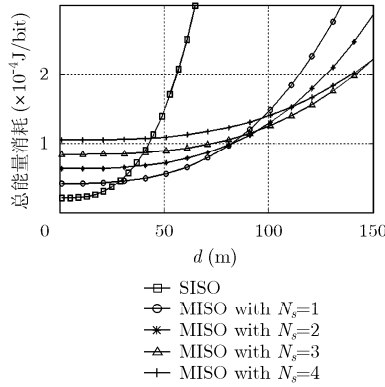


图 3 协作节点不同时所对应的系统总能耗, 采用 BPSK 调制方式, $P_b=10^{-3}$

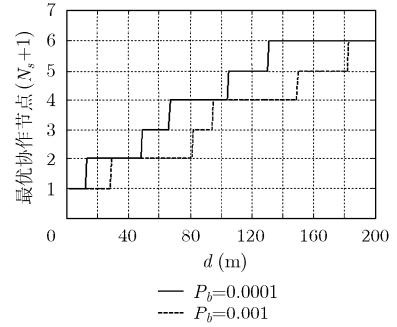


图 4 两种误码率要求所对应的最优通信节点个数

会随着误码率的降低而增大, 进一步验证了多点协作在高性能系统下的优越性。

4.2 可变速率 MQAM 系统下的调制方式最优化

从式(12)容易看出, 当协作节点个数 N_s 固定, 增大调制系数 b 时, 平均每比特的电路能耗会线性降低。但是高进制调制会增大误码率, 为保证系统的误码率要求, 势必要提高比特能量 \overline{E}_b , 从而功放能耗也会增大。因此一定可以找到一个最优的调制方式, 使系统总能耗最小, 这就是自适应速率调制的思路。

图 5 中给出了当传输距离 d 为 10 m, 衰落系数 n 为 3 时, 在不同的协作方式和误码率要求下, 随着调制方式 b 的变化系统总能耗的变化。

从图 5, 表 1 可以看出: (1)对于同样的误码率, 增大协作节点数量, 其最优的调制参数 b 也会相应增大, 这说明多协作节点的优势在高进制调制的时候会更加明显。(2)对于同样的协作节点数目, 在 b 小的时候, 不同误码率的两条线几乎是重叠的, 但是随着 b 的增大, 误码率小的所需能耗会更快回升, 其最优调制参数 b 要小于误码率大的最优调制参数。这是因为 b 越大, 误码率越大, 要保证一定的误码率, 付出的能耗代价也随着 b 增大而越来越大, 更快抵消了电路能耗。

可以验证, 当 $d = 10$ m, $n = 3$ 时, 对于误码率 0.001, 调制参数 b 为 3 的非协作方式能耗最小; 对

表 1 不同系统条件下最优的调制参数 b

误码率	协作簇成员个数		
	0	2	4
0.001	3	7	8
0.0001	2	6	7

于误码率 0.0001, 调制参数 b 为 5 的单节点协作方式能耗最小。

4.3 调制方式和协作节点数目的联合优化

下文综合自适应速率调制和自适应协作节点选择, 在给定的误码率和距离下, 寻找最优化的组合 (N_s, b) , 该问题为条件最值求解问题, 即

$$\begin{aligned} \min \quad & E_{\text{total}} \\ \text{s.t.} \quad & \overline{\text{PER}}(N_s, \overline{E}_b, b) \leq P_b \\ & 1 \leq b \leq b_{\text{max}}, N_s \geq 0 \end{aligned}$$

在这里, P_b 是系统的误码率要求, b_{max} 是传感器节点电池的功率峰值所对应的调制参数 b 。

图 6 给出了相对不同的簇间距离, 所得出的最优组合 (N_s, b) , 左轴为最优节点数量, 右轴为最优调制方式。和图 4 相比, 两图有显著差别。这说明这两个参数之间是相互影响的。

图 7 直观给出了各种传输模式下的总能耗。从图中可以看出, 整个距离轴上, 联合优化速率调制和节点个数可以进一步降低能耗。具体来说, 当只有一个簇成员参与协作时, 自适应速率调制方式和 BPSK 只在 23 m 之前有能量的差别, 之后两线一直重叠。这说明在 23 m 之后, 对于单节点协作而言, 最优的调制方式为 BPSK。从 110 m 到 140 m, 采用 3 簇成员协作, BPSK 调制的能耗曲线和综合最优化的能耗曲线相重合, 这说明在这段距离中, 最优的调制方式为 BPSK, 最优的协作簇成员个数为 3。

5 结束语

本文以分簇无线传感器网络为背景, 推导了多节点协作通信中 BPSK 和 MQAM 的误码率闭式解和系统能量表达式, 在此基础上对系统总能耗进行了优化。与以往的协作通信能量优化方式相比, 本

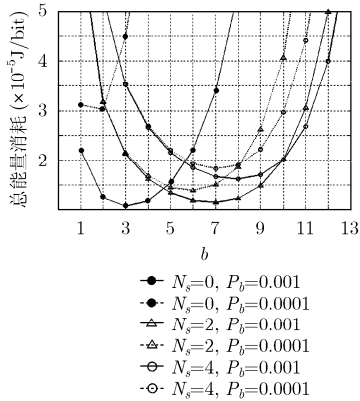


图 5 不同协作节点及误码率下, 调制参数与总能耗的关系图

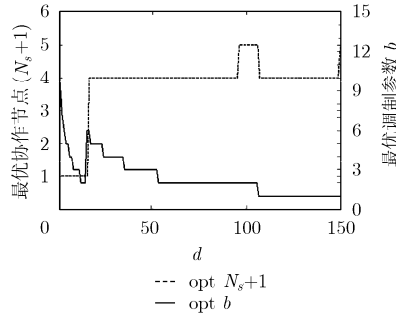


图 6 $P_b=0.001$ 时不同距离所对应的最优协作节点和最优调制方式

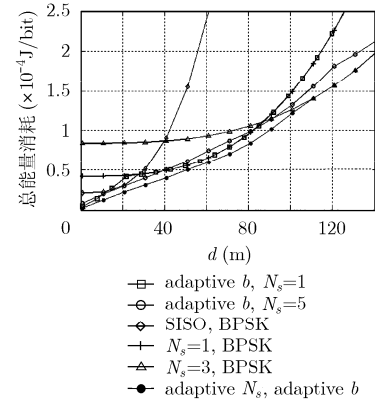


图 7 最优传输总能耗和其他传输方式总能耗的比较

文提出的方案对协作节点个数和调制方式进行了联合优化, 进一步降低了系统的总能耗。

研究中仍存在许多可以改进的地方。首先, 在本文中协作簇成员和簇头之间采用平均功率分配的方案, 这并非是一种最优的功率分配策略。一方面, 功率分配可由各自信道状况所决定, 信道状况越好的节点承担越多的发送功率。另一方面, 功率可以和协作节点数相关联, 在一定的性能要求之下, 如果簇头节点发送功率增大, 则意味着所需的协作节点数可以降低, 反之亦然。其次, 本文没有考虑优化协作节点数目和调制方式所耗费的能耗。在后续工作中将继续对这两个方面进行研究。

参 考 文 献

[1] Cui Shu-guang, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1089-1098.

[2] Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(5): 984-989.

[3] Jayaweera S K. Energy efficient virtual MIMO-based cooperative communications for wireless sensor networks[C]. Proceedings of International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, Chennai, India, January 4-7, 2005: 1-6.

[4] Ng C T K, Jindal N, Goldsmith A J, and Mitra U. Capacity gain from two-transmitter and two-receiver cooperation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(10): 3822-3827.

[5] Ng C T K, Jindal N, Goldsmith A J, and Mitra U. Power and bandwidth allocation in cooperative dirty paper coding[C]. Proceedings of International Conference on Communications, Beijing, China, May 19-23, 2008: 1018-1023.

[6] Simi L, Berber S M, and Sowerby K W. Partner choice and

power allocation for energy efficient cooperation in wireless sensor networks[C]. Proceedings of International Conference on Communications, Beijing, China, May 19-23, 2008: 4255-4260.

[7] Mahinthan V, Cai Lin, Mark J W, and Shen S. Partner selection based on optimal power allocation in cooperative-diversity systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 511-520.

[8] Cui Shu-guang and Goldsmith A J. Cross-layer optimization of sensor networks based on cooperative MIMO techniques with rate adaptation[C]. 2005 IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, New York City, USA, June 5-8, 2005: 960-964.

[9] Cui Shu-guang and Goldsmith A J. Cross-layer design of energy-constrained networks using cooperative MIMO techniques [J]. *Signal Processing Journal*, 2006, 86(8): 1804-1814.

[10] Sirkeci-Mergen B and Scaglione A. Randomized distributed space-time coding for cooperative communication in self organized networks[C]. 2005 IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances for Wireless Communications, New York, USA, June 5-8, 2005: 500-504.

[11] Zhong Zhou and Cui Shu-guang. Energy-efficient cooperative communication in a clustered wireless sensor network [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 11(6): 3618-3628.

[12] Paulraj A, Nabar R, and Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications[M]. New York, USA, Cambridge University Press, 2003: 45,7-8,87.

[13] Chen Zhuo, Yuan Jinhong, and Vucetic B. Analysis of transmit antenna selection maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(4): 1312-1321.

江若宜: 女, 1986年生, 硕士生, 从事无线网络中的协作分集与协作通信等方面的研究。

季 薇: 女, 1979年生, 讲师, 从事无线网络中的协作分集与协作通信等方面的研究。

郑宝玉: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 从事智能信号处理、通信信号处理和量子信号处理等方面的研究。