

衰落信道下的无线传感器网络虚拟 MIMO 传输优化设计

陈捷¹, 阚保强²

(1. 湄洲湾职业技术学院 电子系, 福建 莆田 351254; 2. 南京电讯技术研究所, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对基于虚拟多进多出技术的无线传感器网络系统, 分析了在信道衰落下的平均误码率, 并提出了使用各协作节点最优传输功率的新方案, 推导出基于 $N_t \times 1$ 虚拟多进多出系统的最优传输功率表达式。理论分析和仿真表明: 与等功率传输相比, 传输功率优化方案可获得更低的误码率。同时, 对协作节点数与传输效能的折中设计进行了探讨。仿真结果表明: 低功率传输时, 应适当降低协作节点数, 以降低有效传输能耗。

关键词: 衰落信道; 高效能; 虚拟多进多出; 无线传感器网络

中图分类号: TP301

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)05-0096-06

Optimal Design of WSN Based on Virtual MIMO under Fading Channels

Chen Jie^{1,2}, Kan Baoqiang²

(1. Department of Electronic, Meizhouwan Vocational Technology College, Putian, Fujian 351254, China;

(2. Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: In this paper, authors analyzed the performance of bit error rate for a virtual multiple-input multiple-output (MIMO) based communications architecture used in wireless sensor networks, and proposed an optimal transmitting power (TP) scheme for transmitting cooperative sensor nodes in one cluster. Closed-form of the optimal TP for each cooperating node was derived by minimizing bit error rate (BER) of the $N_t \times 1$ virtual MIMO system. Through theoretical analysis and simulation, it is indicated that compared to an equal TP assignment method, the lowest performance of bit error rate can be obtained by using the optimal TP scheme. Furthermore, a compromise plan was made between the number of cooperating nodes and transmitting. Simulation results show that with low power delivered, the number of cooperating nodes should be decreased to obtain the lower effective transmitting energy consumption.

Key words: fading channel; energy efficiency; virtual multiple-input multiple-output; wireless sensor network

无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 是当前国际上备受关注的多学科交叉的新兴前沿研究热点领域。无线传感网络系统的主要特点是较高的节点分布密度、较低的工作速率以及较短的通信距离。由于无线传感网的分布随机性及节点数量大, 对节点电源 (通常是电池) 进行更换几乎是不可能的。因此, 无线传感网络应用受限制的主要原因就是供电时间较短^[1-3]。

多天线分集技术能够有效地提高抗多径干扰能力, 增加网络容量以及改善网络性能, 即, 能够在衰落环境中降低传输能耗。但是, 由于传感器网络节点受体积与能量等条件的约束, 在一个节点上安置多天线的难度极高, 使得类似于文献 [4] 提出的无线传感器网络系统很难实现。于是, 基于分布节点的协作分集技术应运而生。目前, 大部分研究集中于对传感节点进行分簇, 通过簇内传感节点相互协作构成虚拟的天线阵列进

收稿日期: 2013-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61201216); 中国博士后科学基金项目 (201150M1512); 国防科技重点实验室基金项目 (9140C020302110C0206)

作者简介: 陈捷 (1975—), 男, 福建莆田人, 讲师, 主要从事网络控制理论方面的研究。

阚保强 (1980—), 男, 山东济宁人, 博士, 主要从事无线资源优化调度理论方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: bqkan@163.com

行数据收发,构成虚拟 MIMO(multiple-input multiple-output,多进多出)系统获得分集增益。自从文献[5]首次提出基于多节点协同的虚拟 MIMO 技术以来,已有大量文献进行了相关研究报道^[6-10]。

文献[4]提出了一种面向 WSN 的异构设计方法,采用具有多天线的簇头,但是结构对簇头的能量要求过大,很难实现大规模的部署,局限性较大。文献[6]首次对虚拟 MIMO 的容量上限进行了分析。文献[7]对基于虚拟 MIMO 技术的无线传感器网络的 QoS(quality of service)进行了分析,提出一种跨层优化设计方法。Li^[8]基于空时分组码的编码方式对虚拟 MIMO 无线传感网络系统进行了分析,得出采用空时分组编码可以极大地提高系统的可靠性及带宽利用率^[11-14]。文献[9-10]对同步误差对基于协作虚拟 MIMO 系统的影响进行了研究,指出当同步误差抖动在十分之一码元长度以内时,系统的性能不会产生明显变化。

但是,以上文献对于虚拟 MIMO 技术基本上都是将协作节点到目标节点的信道衰落状况及传输功率视为等同的。而实际上,由于无线传感器网络节点的大规模分布,以及每个协作节点(cooperate partner node)自身分布随机的特点,其信道增益不尽相同。所以,针对每条协作路径的实际信道衰落状况进行优化设计是非常必要的。另外,以上文献未对协作节点数进行讨论,如何选择协作节点数使得效能最大化也是值得研究的。

本研究首先对虚拟 MIMO 系统模型进行分析,为了能满足实际的无线传感器网络信道模型,这里采用了 Nakagami-m 信道模型,分析得出系统的平均误码率(bit error rate,BER),以此为优化目标推导出协作节点最优传输功率表达式。接着,基于该优化传输功率,通过仿真试验与等传输功率方案进行性能比较,并对协作节点数与效能进行探讨。

1 系统模型与优化设计

1.1 系统模型

一种简单的基于多跳虚拟 MIMO 结构的无线传感器网络系统如图 1 所示^[7],虚拟 MIMO 数设为 $N_t \times 1$ (multiple-input single-output, MISO)。从图中可看出,数据首先由源节点与簇内的协作节点进行信息交互,然后经过簇内的协作将数据发送到下一簇的目标节点,为了使问题简单,主要分析一跳下的情况。本研究基于以下假设:

- 1) 不考虑簇内节点间通信的误码影响;
- 2) 簇间每条通信路径,采用 Nakagami-m 信道统计模型,主要是因为 Nakagami-m 信道模型具有很好的适应性,如瑞利衰落(Rayleigh fading)、莱斯衰落(Les fading)都可以用其来描述,实际的无线传感器网络中通信距离较短、环境较恶劣,所以该信道模型能更符合实际传输信道;
- 3) 每条信道传输统计独立,簇间通信采用 M-QAM 调制解调方式;
- 4) 接收终端叠加的噪声为零均值高斯白噪声。

1.2 误码性能分析

为了衡量基于虚拟 MIMO 的传感器网络系统性能,这里考察其平均误码率。由图 1 知,下一簇目标节点接收到的来自上一簇第 k 条路径的信号可表示为:

$$\hat{x}_k(t) = \alpha_k e^{j\theta_k} \bar{s}_k(t) + \omega_k(t), 0 \leq t \leq T, k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (1)$$

其中: $\bar{s}_k(t)$ 是上一簇第 k 个协作节点输出的信号, $\alpha_k e^{j\theta_k}$ 是第 k 条分集路径的衰落系数复数表达式, $\omega_k(t)$ 是信道叠加的高斯白噪声。一般认为在一个符号周期 T 内信号衰落是平坦的,所以忽略 θ_k ,则式(1)可简化为: $\hat{x}_k(t) = \alpha_k \bar{s}_k(t) + \omega_k(t), k = 1, 2, \dots, N_t$ 。则接收端来自第 k 条路径的平均信噪比可表示为

$$\bar{\gamma}_k = (\text{SNR})_k = \frac{E[|\alpha_k \bar{s}_k(t)|^2]}{E[|\omega_k(t)|^2]} = \frac{E[|\bar{s}_k(t)|^2]}{E[|\omega_k(t)|^2]} \cdot E[\alpha_k^2]. \quad (2)$$

设 $\omega_k(t)$ 对于所有分集路径 k 具有相同的单边噪声功率谱密度 N_0 ,则式(2)可改写为

$$\bar{\gamma}_k = \frac{TE[|\bar{s}_k(t)|^2]}{N_0} \cdot E[\alpha_k^2], k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (3)$$

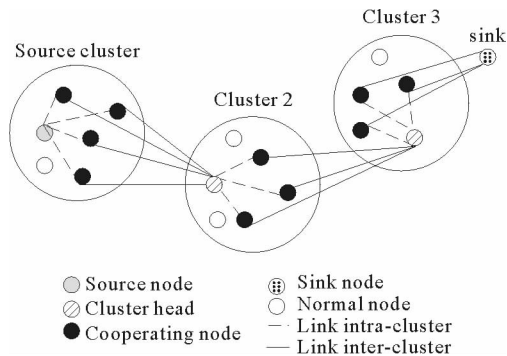


图 1 基于簇的虚拟 MIMO 结构形成的 WSN 系统示意图

Fig. 1 Cluster based virtual MIMO scheme for WSN

瞬时信噪比
$$\gamma_k = \frac{Tp_k}{N_0} \alpha_k^2, k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (4)$$

其中, p_k 为输出信号功率。由假设 2), 信道符合 Nakagami-m 信道统计模型, 则 γ_k 分布的概率密度函数为

$$f_{\Gamma_k}(\gamma_k) = \left(\frac{m_k}{\gamma_k}\right)^{m_k} \frac{\gamma_k^{m_k-1}}{\Gamma(m_k)} \exp\left(-\frac{m_k \gamma_k}{\gamma_k}\right), 0 \leq \gamma_k, k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (5)$$

其中, m_k 是第 k 条信道的参数值, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数。对于 M-QAM 调制系统, 由文献[13]可知, 其误码率表示为

$$Prob(\text{error} | \gamma) \approx \frac{4}{b} \left(1 - \frac{1}{2^{b/2}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3b\gamma}{2^b - 1}}\right). \quad (6)$$

其中, γ 是瞬时信噪比, $b = \log_2 M$, $Q(\cdot)$ 是 Q 函数, $Q(x) = \frac{1}{2} \left(\text{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right)$ 。基于 Chernoff 界, 当 $b > 4$ 时, 式

(6) 可近似表示为^[13]

$$Prob(\text{error} | \gamma) \approx a_1 \exp(-a_2 \gamma). \quad (7)$$

其中: a_1, a_2 由调制方式与介数确定, $a_1 < 0.5$, 如 4-QAM 调制, 由文献[13]可知, $a_1 = 0.2, a_2 = 1.6/3$ 。结合式(5)可得第 k 条分集路径的平均 BER 为

$$P_{ek} = \int_0^\infty Prob(\text{error} | \gamma_k) f_{\Gamma_k}(\gamma_k) d\gamma_k = \int_0^\infty a_1 e^{-a_2 \gamma_k} \left(\frac{m_k}{\gamma_k}\right)^{m_k} \frac{\gamma_k^{m_k-1}}{\Gamma(m_k)} \exp\left(-\frac{m_k \gamma_k}{\gamma_k}\right) d\gamma_k = \int_0^\infty a_1 e^{-a_2 \bar{\gamma}_k m_k} \frac{1}{x \Gamma(m_k)} \exp(-m_k x) dx, k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (8)$$

其中, $x = \gamma_k / \bar{\gamma}_k$ 。基于 Gamma 函数表达式, 将式(8)化简可得:

$$P_{ek} = a_1 \left(1 + \frac{a_2 \bar{\gamma}_k}{m_k}\right)^{-m_k}, k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (9)$$

由于各分集信号传输统计独立, 系统总的平均误码率可以表示为:

$$P_e = a_1 \prod_{k=1}^{N_t} \left(1 + \frac{a_2 \bar{\gamma}_k}{m_k}\right)^{-m_k}, k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (10)$$

1.3 传输功率优化 (Optimal Transmit Power, OTP)

由式(10)可知, 当系统确定时, P_e 与调制协作节点数目 N_t 及分集信噪比 $\bar{\gamma}_k$ 有关。当 N_t 一定时, 系统 P_e 最小的问题可描述为:

$$\left. \begin{aligned} \min P_e &= a_1 \prod_{k=1}^{N_t} \left[1 + \frac{a_2 \frac{Tp_k}{N_0} E[\alpha_k^2]}{m_k}\right]^{-m_k} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^{N_t} p_k &= P, p_k \geq 0, \forall k \in \{1, 2, \dots, N_t\} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

其中, $\sum_{k=1}^{N_t} p_k = P$ 是指在总发射功率一定的情况下优化各协作节点的传输功率。

定理 1 在形如 $N_t \times 1$ 的虚拟 MIMO 中, 当 $\sum_{k=1}^{N_t} p_k = P$ 满足时, 存在最优化的传输功率。

证明: 考虑式(10)及式(11)可知, 上述问题符合线性优化条件, 所以解存在。

引理 1 由定理 1, 在 $N_t \times 1$ 的虚拟 MIMO 中, 当传输总功率一定时, 其最优化传输功率为:

$$p_{k\text{-optm}} = m_k \max\left(0, \frac{P}{\sum_{k=1}^{N_t} m_k} + \frac{\sum_{k=1}^{N_t} (m_k / C_k)}{a_2 \sum_{k=1}^{N_t} m_k} - \frac{1}{a_2 C_k}\right). \quad (12)$$

证明: 考虑到约束条件为 $P = \sum_{k=1}^{N_t} p_k (p_k \geq 0)$, 为了便于计算, 采用对数函数进行简化, 令

$C_k = \frac{T}{N_0} \cdot E[\alpha_k^2]$, 则目标函数 P_e 最小化等效为

$$\left. \begin{aligned} \min \log_2(P_c) &= \log_2 a_1 - \sum_{k=1}^{N_t} m_k \log_2 \left(1 + \frac{a_2 C_k}{m_k} p_k \right) \\ \text{s. t. } P &= \sum_{k=1}^{N_t} p_k, p_k \geq 0, \forall k \in \{1, 2, \dots, N_t\} \end{aligned} \right\}, \quad (\text{A. 1})$$

则拉格朗日乘子函数可表示为

$$Z = \log_2 a_1 - \sum_{k=1}^{N_t} m_k \log_2 \left(1 + \frac{a_2 C_k}{m_k} p_k \right) + \xi \sum_{k=1}^{N_t} p_k. \quad (\text{A. 2})$$

其中, ξ 为拉格朗日乘子系数, 则其偏微分为

$$\frac{\partial Z}{\partial p_k} = \xi - a_2 C_k / \left(1 + \frac{a_2 C_k}{m_k} p \right). \quad (\text{A. 3})$$

令式(A.3)等于零, 则可解得

$$\xi = a_2 C_k / \left(1 + \frac{a_2 C_k}{m_k} p \right), \quad (\text{A. 4})$$

可得

$$p_{k_optm} = m_k \left(\frac{1}{\xi} - \frac{1}{a_2 C_k} \right), \quad (\text{A. 5})$$

代入式 $P = \sum_{k=1}^{N_t} p_k, p_k \geq 0$, 可得

$$1/\xi = \frac{P}{\sum_{k=1}^{N_t} m_n} + \frac{\sum_{k=1}^{N_t} (m_k / C_k)}{a_2 \sum_{k=1}^{N_t} m_k}. \quad (\text{A. 6})$$

结合式(A.6)与式(A.5), 即可得到式(12)。

2 仿真分析

为了考察算法的误码性能, 首先将该算法与等传输功率(equal transmit power, ETP)方案进行比较。调制方式这里采用 16-QAM, 可知 $a_1 = 0.2, a_2 = 1.6/3^{[13]}$ 。

图 2 给出了基于优化传输功率与等功率传输的误码性能比较图。这里 $N_t = 3, C_1 : C_2 : C_3 = 10 : 5 : 1$ 。可以看出, 相比于基于等功率传输的方法, 基于各协作节点优化传输功率的方案拥有更低的 BER。即, 在消耗相同总传输功率的情况下, 其出现误码重传的次数更少。从另一个方面来说, 在满足相同误码率要求的情况下, 其传输功耗更低。以 BER 要求 10^{-3} 为例, 由图可知, 基于优化传输方案, 其总的传输功率要求只有等功率传输方案的 36%。其传输能耗的节省是相当可观的。

图 3 给出了 OTP 方案与 ETP 方案在不同信道条件下的误码性能比较。仿真中分别使用瑞利信道, 即 $m=1$ 的情况, 以及 $m=8$ 的 Nakagami 信道。不难看出, 在较好信道条件下 OTP 方案拥有更低的误码性能, 相对于 ETP 方案性能更优越。

图 4 反映了采用 OTP 机制时, 改变簇内协作节点数 N_t 对误码性能的影响。分别取 $N_t = 2, 5, 8, 15$, 可以看出 N_t 越大误码率越低。但是增加协作节点数, 势必使整个系统自身的电路功耗增加。所以为了有效选择协作节点数, 必须综合考虑对能耗的影响。

由文献[5]可知, 传输单比特所消耗的能量可表示为:

$$E_{\text{bit}} = (P_{\text{pa}} + P_c) / R_b. \quad (\text{13})$$

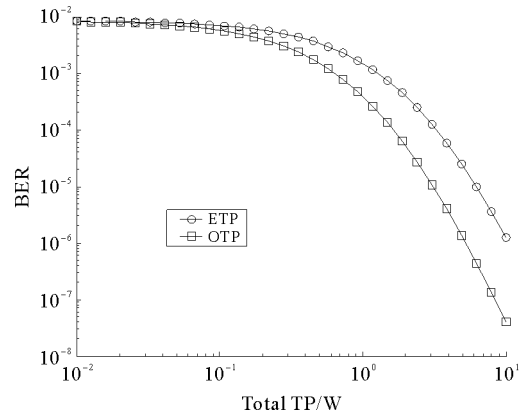


图 2 OTP 与 ETP 的误码性能比较图

Fig. 2 BER performance with OTP and ETP

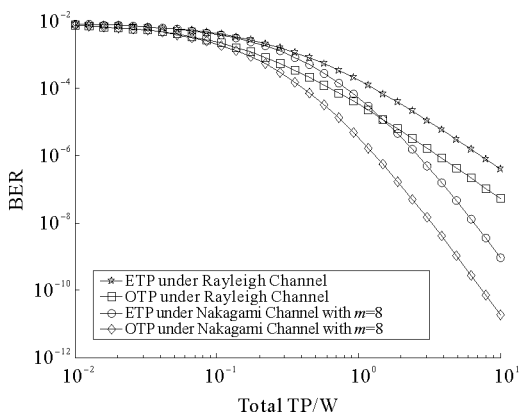


图 3 在不同信道条件下的误码性能比较图

Fig. 3 BER performance under different channel conditions

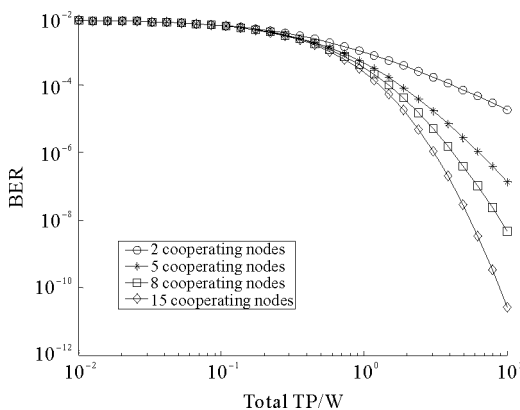


图 4 协作节点数对 BER 性能的影响图

Fig. 4 BER performance under different number of cooperating nodes

其中, R_b 是传输速率, P_{pa} 是功率放大器消耗功率, $P_{pa} = \frac{P}{\eta}$, η 是功率放大器输出效率, 这里假定协作节点都是一致的, 都具有相同放大器效率。 P_c 为功放前各级电路消耗功率(包括放大器、滤波器、频率合成器、混频器等), 这里采用文献[11]和[15]给出的功耗模型。不考虑启动功耗, 采用 $N_t \times 1$ 虚拟 MIMO 结构, 可得

$$P_c = N_t(P_{dac} + P_{mix} + P_{filt} + P_{syn}) + (P_{lna} + P_{mix} + P_{ifa} + P_{fir} + P_{adc}), \quad (14)$$

则采用文献[12]给出的有效单比特传输能耗(energy-per-useful-bit, EPUB)指标:

$$EPUB = E_{bit}/(1 - P_c). \quad (15)$$

结合式(10)和式(13), 可得:

$$EPUB = E_{bit}/(1 - a_1 \prod_{k=1}^{N_t} (1 + \frac{a_2 \bar{\gamma}_k}{m_k})^{-m_k}) = (\frac{P}{\eta} + P_c)/(R_b(1 - a_1 \prod_{k=1}^{N_t} (1 + \frac{a_2 \bar{\gamma}_k}{m_k})^{-m_k})) = (\frac{P}{\eta} + P_c(N_t))/(R_b(1 - P_c(N_t, P))). \quad (16)$$

由式(16)可以看出, 当总发射功率一定时, 增大 N_t 可降低系统平均误码率, 但是却会带来 P_c 增加。所以存在一个较优值, 可以采用实际协作节点数遍历的方法, 得出使得式(16)获得最小值的协作节点数。这里仅列出协作节点数为 2, 4, 8, 16 时, 在不同总发射功率的情况下对 EPUB 的影响。基于文献[11]给出的部分参数值(表 1), 可以绘出 EPUB 与协作节点数以及总传输功率的关系图。如图 5 所示, 在总传输功率较小的情况, 即远小于 0 dBm 时, 增加协作节点数将会显著降低效能。而当 $P \gg 0$ dBm 时, 协作节点数的改变对效能的影响较小。

表 1 部分参数表^[11]

Tab. 1 Parameters table

参数	取值
f_c /GHz	2.5
P_{mix} /mW	30.3
P_{filt} /mW	2.5
P_{fir} /mW	2.5
P_{lna} /mW	20
P_{syn} /mW	50
R_b /Mbps	1
P_{adc} /mW	7
P_{dac} /mW	15.4
η	0.3

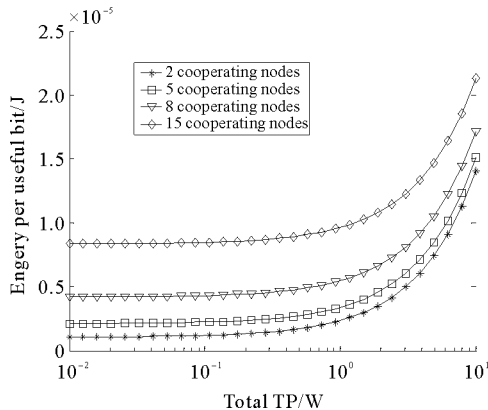


图 5 EPUB 与传输功率随协作节点数的变化曲线图

Fig. 5 EPUB versus total TP with different number of cooperating nodes

3 结束语

对基于 $N_t \times 1$ 虚拟 MIMO 簇结构的无线传感器网络系统在 Nakagami-m 衰落下进行了误码性能分析与研究。以最小化系统平均误码率为目标函数,提出了簇内各协作节点采用最优传输的功率的方案。理论分析和仿真表明,该方案相对于等功率传输方案可以获得更低的系统平均误码率,也就是说在一定误码率要求下,该方案更节能。该方案唯一的额外能耗来源于对最优传输功率的计算,但从文中可以看出该运算主要是累加运算及简单除法,并未有积分等运算,所以运算量不大。本研究还对协作节点数对传输效能的影响进行了分析,仿真显示,当小功率传输时,应适当减少协作节点数目,以获得较低的单比特传输能耗。

参考文献:

- [1] Akyildiz F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38: 393-422.
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282-1291.
Ren Fengyuan, Huang Haining, Lin Chuang. Wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [3] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. *通信学报*, 2004, 25(4): 114-124.
Ma Zuchang, Sun Yining, Mei Tao. Survey on wireless sensors network[J]. *Journal of China Institute Communications*, 2004, 25(4): 114-124.
- [4] 赵保华, 李婧, 张炜, 等. 基于 MIMO 的节能无线传感器网络[J]. *电子学报*, 2006, 34(8): 1415-1419.
Zhao Baohua, Li Jing, Zhang Wei, et al. MIMO-based energy-efficient wireless sensor networks[J]. *Journal of Chinese Electronics*, 2006, 34(8): 1415-14219.
- [5] Cui S, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 22(6): 1089-1098.
- [6] Dohler M, Gkelias A, Aghvami A H. Capacity of distributed PHY-layer sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(2): 622-639.
- [7] Yuan Y, He Z H, Chen M. Virtual MIMO-based cross-layer design for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 55(3): 856-864.
- [8] Li X, Chen M, Liu W. Application of STBC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010(12): 134-137.
- [9] Jayaweera S K. The effect of time synchronization errors on the performance of cooperative MISO system[C]//Global Telecommunications Conference Workshops. Tokyo, Nov. 29-Dec. 3, 2004: 102-107.
- [10] Jayaweera S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 5(5): 984-989.
- [11] Cui S, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-constrained modulation optimization[C]//Global Telecommunications Conference. San Francisco, CA, Dec. 1-5, 2003: 372-376.
- [12] Ammer J, Rabacy J. The energy-per-useful-bit metric for evaluating and optimizing sensor network physical layers[C]//Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Reston, Virginia, Sep. 25-28, 2006: 695-700.
- [13] Chung S T, Goldsmith A. Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(9): 1561-1571.
- [14] Li X. Energy efficient wireless sensor networks with transmission diversity[J]. *IEE Electronics Letters*, 2011, 39: 1753-1755.
- [15] Kan B Q, Cai L, Zhu H S, et al. Accurate energy model for WSN node and its optimal design[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(3): 427-433.

(责任编辑: 吕文红)