

工业环境无线传感器网络分集技术

刘 锋 徐金梧 阳建宏 黎 敏
(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘 要: 在工业环境应用无线传感器网络, 将面临设备及器材引起的大量散射电磁波带来的无线信道随机衰落。该文对工业环境无线信号进行了分析, 针对传感器节点体积及成本受限的情况, 在极化分集基础上提出一种天线姿态寻优方案, 对极化分集与天线姿态寻优带来的分集增益进行了仿真和对比, 并设计了适用于无线传感器网络的天线优化方案。通过工业环境实际测量, 验证了无线传感器网络天线分集方案的有效性。

关键词: 无线传感器网络; 无线信道; 工业环境; 分集

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2970-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01524

Diversity Technique and Channel Optimization for Industrial Wireless Sensor Networks

Liu Feng Xu Jin-wu Yang Jian-hong Li Min

(School of Mechanical Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The industrial wireless sensor networks may suffer serious random fading of wireless channel in industrial environment which is induced by the metallic equipments and apparatus. By analyzing the radio signals in industrial environment, an antenna attitude optimized system is presented based on the polarization diversity technology considering the limitation of size and cost for wireless sensor networks. The performance comparison between selection-diversity system and antenna attitude optimized system is carried out, and an antenna optimization scheme is put forward suitable for wireless sensor networks, with high effectiveness verified by measurements in actual industrial environment.

Key words: Wireless sensor networks; Wireless channel; Industrial environment; Diversity

1 引言

无线传感器网络由大量传感节点组成, 通过多跳的方式将采集数据传递到控制中心。由于组网灵活、施工方便, 在工业中得到越来越广泛的应用。在工业现场, 由于金属设备对电磁波的遮挡、反射, 无线信道严重恶化, 发生随机衰落, 导致无线传感器网络节点间通信受阻, 降低了网络的连通度。传感器节点, 由于监测需要, 紧贴设备安装, 安装空间及安装位置均受到限制, 同时由于节点数目众多, 节点成本敏感, 研究体积及成本均受限的情况下, 无线传感器网络的抗衰落技术, 具有重要意义。

针对信道衰落已经提出多种有效解决方法。多入多出(MIMO)技术可充分利用多径效应, 提高通信系统的信道容量, 然而 MIMO 技术不仅需要传感器节点加装多根天线, 而且还要根据信道的估计对基带和射频信号进行实时处理, 需引入复杂的软

硬件处理模块, 限制了在无线传感器网络中的应用。将协作式 MIMO 应用于无线传感器网络, 无需在节点加装多根天线, 利用多个相邻节点的协作通信可实现虚拟的 MIMO, 成为近期无线传感器网络研究的热点^[1-4]。文献[4]的研究表明, 虚拟 MIMO 对通信性能的提高主要体现在远距离簇间通信, 在工业无线传感器网络中, 簇头之间及簇头到会聚节点之间一般通信状况良好, 而簇内通信由于节点安装位置受限, 工作环境恶劣, 需要优化信道。在簇内通信应用虚拟 MIMO, 对通信质量的提高有限, 反而因为本地节点间的数据交换、时钟同步及数据汇集增加了能耗^[5]。同时, 协作式 MIMO 只是减少了射频解调电路的配置, 信道运算仍然需要高速 AD 电路及高速逻辑电路的参与, 不适用于电路结构相对简单的无线传感器网络节点。因此需要对适用于无线传感器网络的分集技术进行研究。

文献[6]的研究表明, 在体积受限的场合, 使用极化分集天线, 可以获得与空间分集相同的增益。工业应用中, 无线传感器一般安装于待监测设备表面, 理论分析和实际测量表明, 此区域无线信号的衰落主要来自于电磁波极化方向的随机偏转, 极化

2009-11-27 收到, 2010-08-23 改回

国家自然科学基金(50674010)和国家 863 计划项目(2007AA04Z169)资助课题

通信作者: 刘锋 feng007liu@163.com

偏转带来信号衰落的同时, 也引起信号交叉极化分辨率(Cross-Polarization Discrimination, CPD)下降, 有利于极化分集技术的应用。在工业无线传感器网络中, 可使用多天线极化分集来抵抗信号随机衰落, 考虑传感器节点电路相对简单, 应采用简单的分集合并方案, 比如选择式合并分集。然而在有些场合, 仍然面临体积受限, 而无法使用多天线极化分集的情况。考虑到选择式极化分集是对不同极化方向的信号进行取优, 并且工业无线传感器网络一般工作于准静态信道, 如果在节点摆放之初, 对节点天线姿态进行优化, 找寻最佳信号强度, 也将获得一定信道增益。本文首先对工业环境无线传感器网络的通信特点进行分析, 然后对极化分集与天线姿态寻优所带来的增益进行了理论分析和仿真, 通过实际测量环境进行了实验对比, 最后, 在实验基础上提出在体积和成本受限时, 适用于工业无线传感器网络的天线分集方案。

2 工业环境无线网络面临的信道衰落

2.1 工业无线传感器网络节点接收信号模型

生产设备的故障诊断与监测需要对振动、温度、湿度、压力等物理量进行采集, 经 AD 转换及特征值提取, 采集数据由无线传感器网络转发至控制中心。由于数据量小, 通信速率一般设置为 10 kbps 左右, 信道带宽窄, 远小于相干带宽, 可视为平坦衰落信道。无线通信系统一般具有 3 个独立的特征现象: 随距离而变的路径损耗, 对数正态阴影效应及多径效应^[7]。其中, 多径效应引起信号幅度随机变化, 可能产生 30~40 dB 的深度衰落, 成为影响通信的主要因素。工业环境中无线传感器网络一般采用分簇结构, 每簇的覆盖范围在十几米到几十米之间, 节点的高度参数相对于水平距离来说, 已经成为一个不可忽略的参数, 并且由于传播距离短, 水平极化的电波, 因地面影响而受的衰减较小, 因而需在 3 维空间分析电波传播, 此时还需考虑多径效应引起的电波极化偏转。

由于金属设备引起电波的大量绕射和反射, 在整个立体角度范围内, 各个方向均有大量随机到达的电磁波。考虑空间笛卡尔坐标, 将各到达波按照 3 个坐标方向进行矢量分解, 可将 3 维空间的电波传播分解为在 XOY, XOZ, YOZ 3 个平面内的 2 维传播问题。在任一平面内, 由于存在大量散射波, 并且由于设备遮挡, 一般不存在一条主入射径时, 为简化分析, 可认为信号符合瑞利衰落。任一接收位置的信号, 均可用图 1 所示模型进行描述。

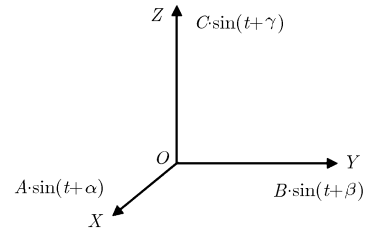


图 1 信号模型

如图 1 所示, 电场矢量信号可分解为在 X, Y, Z 3 个坐标方向的分量, 分别为, $A \cdot \sin(t + \alpha)$, $B \cdot \sin(t + \beta)$, $C \cdot \sin(t + \gamma)$, 其中, A, B, C 符合独立的同参数瑞利分布, α, β, γ 符合 $[0, 2\pi]$ 区间上的独立均匀分布。

2.2 极化分集的数学模型

由于无线传感器网络节点成本及能耗限制, 无法应用最大增益比合并及等增益合并等天线合并方式, 宜采用选择式分集, 并且天线一般采用结构简单的线天线。

考虑使用一根竖直放置的发射线天线, 和 3 根相互正交的接收线天线的情况。3 根接收天线的接收信号幅度可视为独立同分布的瑞利变量, 设 3 根天线的接收信号幅值分别为 x, y, z , 且概率密度函数均为 $p(r)$, 其中 r 为接收信号幅度。3 根天线选择最优接收值时, 接收到的信号幅值为 $\max(x, y, z)$, 其概率分布为

$$P(r) = 3p(r) \cdot \int_{-\infty}^r p(y)dy \cdot \int_{-\infty}^r p(z)dz = 3p(r) \cdot \left(\int_{-\infty}^r p(y)dy \right)^2 \quad (1)$$

设单根天线的信号包络符合瑞利分布, 式(1)可重写为

$$\begin{aligned} P(r) &= 3 \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2} \cdot \left(\int_{-\infty}^r \frac{y}{\sigma^2} e^{-y^2/2\sigma^2} dy \right)^2 \\ &= 3 \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2} \cdot (1 - e^{-r^2/2\sigma^2})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 σ 为单根天线信号幅值平方期望的一半, r 的取值范围为非负实数。由式(2)可知, 当 $r < 1.72\sigma$ 时, 取优后的信号幅度概率密度小于原来的瑞利分布, 即经过 3 根天线取优后, 信号出现深度衰落的概率减小了, 信道质量得到了改善。

由于电磁波中的电矢量末端轨迹, 总是一个平面椭圆, 线极化与圆极化可认为是椭圆极化的特殊形式。当使用一根线天线进行接收时, 如果天线方向正好处于椭圆的长轴位置, 此时存在一个最大接收电平值。如果节点的天线能够保持在这个最大接收方向, 相对于竖直天线, 可获得一定增益。此时

天线的接收信号可视为由前述 3 根天线的接收信号矢量合成的结果。考虑 3 根天线接收信号幅度为相互独立的瑞利分布情况, 并设 3 根天线信号的相位均符合 $[0, 2\pi]$ 区间上的均匀分布, 则空间合成信号的幅值为

$$r = \sqrt{x^2 \cdot \sin^2(A) + y^2 \cdot \sin^2(B) + z^2 \cdot \sin^2(C)} \quad (3)$$

其中 x, y, z 符合瑞利分布, 而 A, B, C 为时变量, 取值分别为 $A = \omega t + \alpha, B = \omega t + \beta, C = \omega t + \gamma$ 。其中 ω 为信号角频率, α, β, γ 分别符合 $[0, 2\pi]$ 区间上的均匀分布。电矢量在时间上的最大值, 就是使用线天线能够在空间找到的最优接收信号幅值。对式(3)在时间域取最大值, 结果如式(4)所示。

$$r_m = \sqrt{\frac{U + \sqrt{V + 2((xy)^2 M + (yz)^2 N + (xz)^2 O)}}{2}} \quad (4)$$

其中 $U = x^2 + y^2 + z^2, V = x^4 + y^4 + z^4, M = \cos(2\alpha - 2\beta), N = \cos(2\beta - 2\gamma), O = \sin(2\alpha - 2\gamma)$ 。

经过一定运算后, r_m 的概率密度分布难以通过显式表达, 通过对大量数据进行仿真统计, 可得到接近理论值的概率密度曲线。

2.3 分集增益的计算和测量

对于分集所带来的信道质量改善, 可以通过分集增益来衡量。分集增益 D 的定义为

$$D = - \lim_{\frac{S}{N} \rightarrow \infty} \left(\frac{\lg P_e}{\lg(S/N)} \right) \quad (5)$$

但是在实际测量中, 只能在有限信噪比条件下进行, 文献[8]定义了有限信噪比条件下, 在给定误码率时的分集增益。由于无线传感器网络节点安装位置固定, 小尺度衰落带来的影响不再是随节点移动而产生的时变误码率, 而体现为整个网络的连通过程度。按照文献[9]中的方法, 将有限信噪比分集增益定义中的误码率置换为接收信号功率的累积概率密度, 更适合衡量无线传感器网络的分集性能。使用分集技术后, CDF 曲线向右移动, 在某一 CDF 值下的移动距离, 即为相应的分集增益。

对使用 3 根空间正交的线天线的选择式分集与天线姿态寻优两种天线接收方案的增益进行仿真, 得到 CDF 曲线, 如图 2 所示, 仿真使用的瑞利信道, 瑞利分布参数为 $10E-5$ 。

图 2 中, 虚线表示的是信道间存在相关性, 并且相关系数为 0.25 时的分集增益, 实线表示非相关信道下的分集增益。由图 2 看出, 使用选择式分集和天线姿态寻优后, CDF 曲线均向右移动, 其中, 在非相干信道下, 20% 的累积概率密度时, 选择式分集增益可获得约 5.6 dB 的增益, 天线姿态寻优可获得约 7.3 dB 的增益, 当信道间存在相关性时, 分

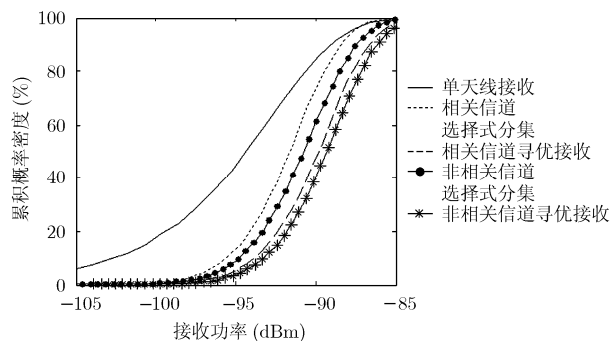


图 2 天线分集增益曲线

集增益分别下降为 3.8 dB 和 5.8 dB。

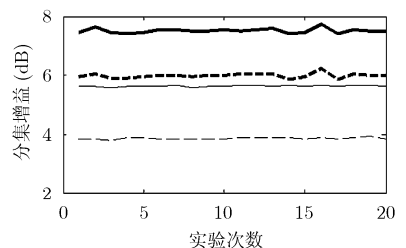
由于图 2 所示结果是通过大量数据仿真实验的结果, 为验证结果的正确性和可重复性, 针对同一瑞利信道进行了多次重复实验, 然后对不同瑞利信道进行重复实验, 统计 CDF 在 20% 时的分集增益, 如图 3 所示, 图中, 细虚线为相关信道选择式分集, 细实线为非相关信道选择式分集, 粗虚线为相关信道寻优接收, 粗实线为非相关信道寻优接收。

由图 3 看出, 不同实验次数, 及不同瑞利信道参数下, 分集增益的标准差均在 0.1 dB 以下, 说明仿真数据是有效可靠的, 并且, 分集增益只与信道支路间的相关性有关, 而与信道支路自身参数关系不大。

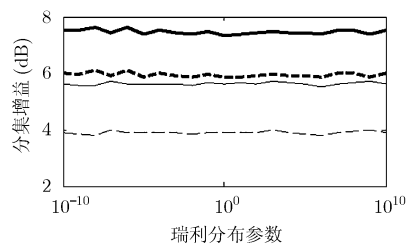
3 工业环境分集增益的评估和测量

3.1 工业环境信道相关性测量

为了对工业环境无线传感器网络信道进行评估, 选择一个实际工业环境进行了测量, 如图 4 所示。其中, 测点 1, 2, 11 为信号直达区域, 5, 7 号为部分遮挡区域, 其它测点为设备阴影区域。



(a) 分集增益与实验次数的关系



(b) 分集增益与瑞利分布参数的关系

图 3 CDF 为 20% 时的分集增益

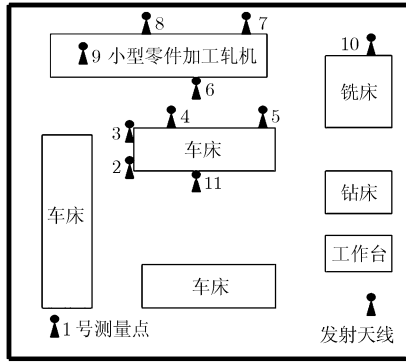


图 4 工业环境示意图

测量使用的无线收发信机为实际应用的无线传感器网络节点。定义直角坐标系中的坐标轴 Z 为垂直方向, X 轴与 Y 轴为水平方向, 将收发天线分别按照直角坐标系中的 X, Y, Z 3 个方向进行放置并进行接收功率测量, 测量结果如图 5 所示。其中, 每种收发天线组合可视为一个信道, 将各信道进行编号, 如表 1 所示。

表 1 信道编号表

信道号	天线配置	信道号	天线配置	信道号	天线配置
C_1	$T_x R_x$	C_4	$T_y R_x$	C_7	$T_z R_x$
C_2	$T_x R_y$	C_5	$T_y R_y$	C_8	$T_z R_y$
C_3	$T_x R_z$	C_6	$T_y R_z$	C_9	$T_z R_z$

注: 天线配置中的 T 表示发射天线, 其下标表示发射天线的放置方向, R 表示接收天线, 其下标表示接收天线的放置方向

信道间的相关系数由式(6)给出,

$$C(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

其中 $C(X, Y)$ 为 X 信道与 Y 信道的相关系数, n 为信道测量样本个数, x_i 为 X 信道的第 i 个测点处的样本值, \bar{x} 为 X 信道样本均值, y_i 为 Y 信道的第 i 个测点处的样本值, \bar{y} 为 Y 信道样本均值。信道 C_1 到 C_9 间的相关系数矩阵为

1	-0.39	0.36	0.26	-0.32	0.47	0.16	0.43	0.21
	1	-0.36	0.47	-0.13	0.2	0.14	0.03	-0.14
		1	0.05	0.18	0.54	0.53	0.02	0.35
			1	-0.15	0.4	0.46	0.34	0.42
				1	-0.11	-0.27	-0.05	-0.1
					1	0.57	0.65	0.46
						1	0.31	0.35
							1	0.35
								1

矩阵中第 i 行, j 列的数据表示信道 C_i 与信道 C_j 间的相关系数。从矩阵中看出, 部分信道间存在负相关性, 说明信道间存在一种此消彼长的关系, 这与极化偏转造成的极化方向间的能量转移是相吻合的。当信道间为负相关时, 两信道同时发生深度衰落的概率是很低的。正相关的信道, 其相关系数也均在 0.65 之下, 并且多集中在 0.3 左右, 一般认为当信道间相关系数在 0.7 以下便可获得良好的分集效果, 因此, 在工业环境应用天线极化分集技术

可大幅提高信道增益, 有效对抗信号的随机衰落。

3.2 工业环境极化分集效果实际测量

在图 4 所示工业环境中, 随机选择 80 处接收位置对 3 天线选择式分集与天线寻优式虚拟分集方案进行了测量比较。测量时, 发射天线为单根垂直放置的线天线, 接收端使用 3 根空间正交的线天线进行选择式分集接收, 然后使用一种特制装置进行寻优接收, 并分别统计其 CDF, 得出分集增益。

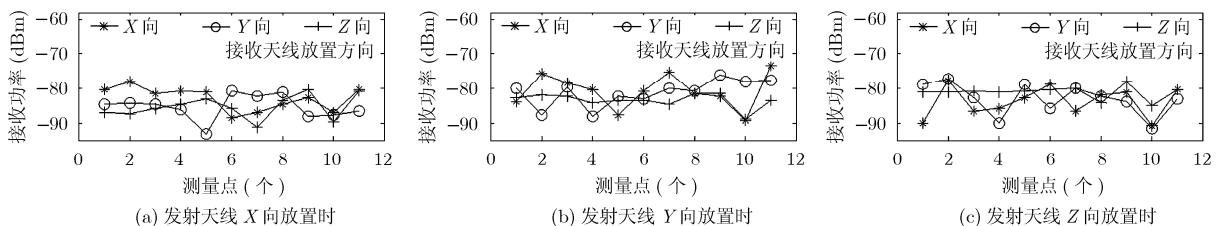


图 5 工业环境信号接收功率测量

寻优接收装置由配备 433 MHz 线天线的无线传感器网络节点及相应支撑结构组成。待测节点安装于旋转平台上,在电机驱动下改变俯仰角和方位角,利用节点电路中射频芯片 CC1100 的接收电平指示功能对电场强度进行测量,并通过无线方式将测量结果发送到控制节点,然后转发至笔记本电脑。为减弱装置本身对电磁波的散射影响,平台的支撑结构均为竹木材质,电机位于结构的底端,距离测量平台 1 m 左右。

对工业环境两种接收方式分集增益的测量结果如图 6 所示。

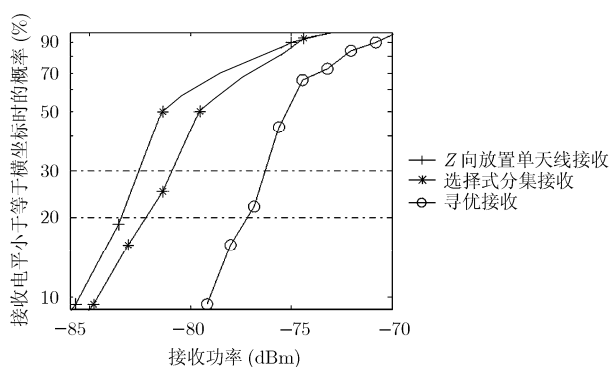


图 6 工业环境实测分集增益

图 6 表明,在实际工业环境,使用 3 根正交天线的选择式分集接收时,可在 CDF 为 20% 时获得高于 1 dB 的分集增益。而使用天线姿态寻优接收时,则可获得 5 dB 以上的增益。选择式分集的实测效果低于仿真结果,而寻优接收的实测结果则与仿真结果基本吻合。这是因为实际测量时,传感器节点的电路板也会对电磁波产生反射和遮挡,而寻优接收,不仅可以避开这种影响,而且还可以通过调整节点姿态充分利用这种反射,因而可获得更高的信号增益。

对于时变信道,即使节点在安装时进行了姿态寻优,也会在后续工作中由于信道变化,而偏离最优状态。工业现场的各种设备及障碍物一般位置固定,监测节点多为固定安装,可以认为无线传感器网络工作于准静态信道,姿态寻优做出的天线调整,可在较长时期内保持性能稳定。

3.3 工业环境无线传感器网络分集方案设计

无线传感器网络用于工业监测时,多采用分簇拓扑结构,如图 7 所示。

簇头节点的安装位置一般较为开阔,而监测节点则多受空间限制。虽然天线姿态寻优可获得比选择式极化分集更高的增益,但是使用单天线时,无

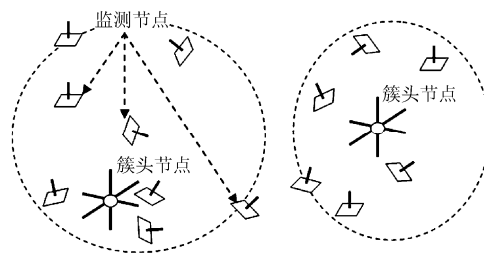


图 7 工业无线传感器网络结构示意图

法保证簇头天线对所有簇成员节点保持最优,因此簇头节点只能使用极化分集,为降低能耗和电路复杂度,优先考虑选择式合并分集,在成本及供电方式允许时,可以采用最大增益比合并的分集方式。而簇成员节点由于安装位置限制,有的节点无法加装多根天线,可在安装之初对此类节点的天线姿态进行优化,以改善通信质量。

4 结论

设备密集的工业环境,电磁波发生大量反射和绕射,由于节点间通信距离短,无线传感器网络中的电波传播应以 3 维方式进行分析。由于不同立体方向大量随机到达波的迭加,可认为在 3 个相互正交的极化方向存在 3 条相对独立的信号传播路径,针对独立瑞利衰落信道的理论推导及仿真表明,在接收信号强度累积概率密度为 20% 时,3 根正交天线组成的极化分集可获得 5.6 dB 左右的增益,而天线姿态寻优可获得 7.3 dB 左右的增益,当信道间存在相关系数为 0.25 的相关性时,分集增益分别下降为 3.8 dB 和 5.8 dB。对实际工业环境 3 个相互正交极化方向使用线天线分别进行接收测量,结果表明各极化支路间的相关系数均低于 0.7,并且由于极化偏转造成支路间能量互相转移,出现负相关,说明在所测量工业环境可获得较高的极化分集增益。在实际工业环境进行接收信号功率累积概率密度统计,结果表明在累积概率密度为 20% 时天线姿态寻优可获得 5 dB 以上的增益,选择式极化分集可获得 1 dB 以上的增益。因此,对于体积和能量受限的无线传感器网络,宜采用出在簇成员节点使用天线姿态寻优,而在簇头节点使用选择式极化分集的天线优化方案。

参考文献

- [1] Long Cheng-zhi, Chen Hui, and Li Li-hong. Energy-efficiency cooperative communications with node selection for wireless sensor networks. Computational Intelligence and Industrial Application, Wuhan, 2008: 761-765.
- [2] Nguyen T D, Berder O, and Sentieys O. Cooperative MIMO schemes optimal selection for wireless sensor networks.

- Vehicular Technology Conference, Dublin, 2007: 85-89.
- [3] Mi-Kyung Oh, Ma Xiao-li, and Giannakis G B, *et al.* Cooperative synchronization and channel estimation in wireless sensor networks. Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, 2003, 1: 238-242.
- [4] Shuguang C, 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.
- [5] Wang W, Peng D M, and Wang H G, *et al.* Position based unequal error protection for image transmission with energy constraint over multirate XPD MIMO sensor networks. IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, 2008: 1-5.
- [6] Nabar R U, Bolcskei H, and Erceg V, *et al.* Performance of multiantenna signaling techniques in the presence of polarization diversity. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2553-2562.
- [7] Stüber G L. Principles of Mobile Communication. 2nd Edition, Norwell Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 2004: 41-44.
- [8] Durgin Gregory D. Space-Time Wireless Channels. 1st Edition, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall Press, 2004: 156.
- [9] Tounou C, Decroze C, and Carsenat D, *et al.* Diversity antennas efficiencies enhancement. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu, HI, 2007: 1064-1067.
- 刘 锋: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络在工业环境中的应用.
- 徐金梧: 男, 1949 年生, 教授, 研究方向为设备故障诊断与状态监测.
- 阳建宏: 男, 1978 年生, 副教授, 研究方向为设备故障诊断与状态监测.
- 黎 敏: 女, 1980 年生, 讲师, 研究方向为设备故障诊断与状态监测.