

基于 M M O 的节能无线传感器网络

赵保华, 李 婧, 张 炜, 屈玉贵

(中国科学技术大学计算机科学技术系, 安徽合肥 230027)

摘 要: 当今无线传感器网络主要是同构网络, 即网络中传感器节点结构相同, 该结构不适合基于组的传感器网络. 本文通过使用多天线传感器节点作为无线传感器网络中的组长节点将 M M O 和 S M O 方式引入组间层和组内层组员与组长之间的通讯. 文中介绍了该异构网络的基本通讯机制并对其实现进行了讨论, 并提出了 M M O 的传感器网络功耗和延迟模型. 通过模拟实验验证了该模型优于同构网络.

关键词: 无线传感器网络; 多天线节点; M M O; 功耗; 延迟

中图分类号: TP393.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 08-1415-05

M M O-Based Energy-Efficient Wireless Sensor Networks

ZHAO Bao-hua LI Jing ZHANG Wei QU Yu-gui

(Department of Computer Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract Most architectures of wireless sensor networks (WSN) are built as homogeneous networks where all sensor nodes have the same structure. But it is not suitable for cluster-based WSN. By using multi-antenna sensor nodes as cluster heads in wireless sensor networks we import M M O and S M O communication modes into inter-cluster layer and inner-cluster layer when sensor nodes communicate with the head. We introduce the basic communication modes in inhomogeneous networks and discuss the realization. The power consumption and delay model of M M O-based sensor networks are given. We verify that this model is better than homogeneous networks by analysis and simulations.

Key words wireless sensor network; multi-antenna node; multiple input multiple output (M M O); power consumption; delay

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是当今无线网络研究中的一个热点. WSN 按网络中传感器节点 (Sensor Node, SN) 结构是否相同分为同构和异构网络. 同构网络中所有传感器节点结构一致, 组划分时需要使用软件进行组长选举过程, 而且组长功能受 SN 结构限制. 异构网络包含特殊节点和普通节点. 特殊节点的结构和能量异于普通节点, 它可以被选作组长, 再由组长确定其组员以形成组^[1]. 因此, 异构网络能更方便、有效地实现自组织的分组 WSN. 现阶段对异构网络的研究主要针对特殊节点是高能节点的组长选举算法和组划分方法, 而对特殊节点的实际结构及其与普通节点的通讯机制鲜有研究, 这是本文的重点.

近年来对多入多出通讯模型 (Multiple Input Multiple

Output M M O) 的研究成为无线通讯中的重点. Alamouti 在文 [2] 中提出了一种抑制干扰效果较好的空时编码方案, 本文将其作为研究基础. M M O 通讯方式较单入单出通讯模型 (Single Input Single Output SISO) 有较优的信噪比和发送速率. Shuguang Cui 等在文 [3] 中分析了在相同误码率要求下多天线节点传输单位比特的总耗能, 并提出随着距离的增加, SISO 耗能与 M M O 耗能的比值逐渐增大, 距离的平衡点为几米量级. 我们利用 M M O 适合远距离传输的特点将其应用到 WSN 中.

基于组的 WSN 分为组间层和组内层. 网络中节点分为组长节点 (Cluster Head Sensor Node, CHSN)、普通传感器节点 SN 和基站 (Base Station, BS). 组间层由 BS 和全体 CHSN 构成, 组内层由一个 CHSN 及其 SN 构成. 我们使用多天线传感器节点 (Multi-Antenna Sensor Node, MASN) 作为特殊节点将 M M O 和 S M O 方式引入组间层和组内层

收稿日期: 2004-12-17 修回日期: 2005-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (No. 90104010); 自然科学基金 (No. 60241004); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2001AA 121016); 国家 973 重点基础研究发展规划 (No. 2003CB 314801)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

SN 与 CHSN 间的通讯,并介绍了本文所提 WSN 的基本通讯机制和实现细节问题,进一步建立了以 MASN 为特殊节点的 WSN 模型和该模型下的网络功耗和延迟模型。

2 MIMO 背景知识

2.1 通讯方式与增益

无线通讯模式主要有四种:单入单出(SISO)、单入多出(SMO)、多入单出(MISO)和多入多出(MMO),应用最广泛的 SISO 使用单天线收发,是传统无线通讯方式;而多天线系统因其具有增大信道容量的潜力而受到越来越广泛的重视和研究^[4],其结构见图 1。

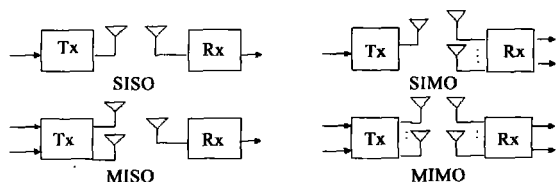


图 1 SISO、MISO、SIMO 和 MIMO 结构图

如图 1 所示,SMO 有一根发射天线和多根接收天线,MISO 有多根发射天线和一根接收天线,而 MMO 有多根发射和接收天线。衡量各通讯方式使用三种增益:矩阵增益、多样性增益和空间多路传输增益。矩阵增益由每个接收端天线输出所需部分信号的相干叠加和噪声部分非相干叠加获得,使合并后输出的平均信噪比(SNR)比单根天线高 N 倍(N 为矩阵中天线元素数目)。多样性增益与合并前信号的 SNR 相异程度相关,每根天线多路径衰减无关性越大,该增益越大^[5]。由于信号发送质量和 SNR 相关,这两种增益可延伸信号的传送距离。多路传输增益可理解为将要发送的比特流分离成 M 个子流,调制后从每根天线同时发送出去;接收端在较好信道条件下能很好的鉴别这些信号的空间签名,区别并提取同信道中各信号,解调后合并得到原始比特流。因此,多路传输速率的增加与发送接收天线对成线性关系^[4]。

2.2 编码方案与干扰性

MMO 使用空时编码,分为空时块码(STBC)和空时格码(STTC)^[4]。STBC 编码方式较简单,它对一段输入信号进行处理,产生一个列表时间、行表天线的矩阵。STTC 较复杂,它一次对一个输入信号进行处理,产生一个向量长度代表天线数的符号序列。文[2]中提出了一种可解决多径衰减效应的 STBC 编码方案。在该方案中,信号的空间签名用来将同信道中各信号区别开来,以抑制干扰,从而 MISO 和 MMO 系统有较强的自抑制干扰特性。本文基于文[2]中编码方案并假设节点间信道是瑞利衰减方式。

3 基于 MIMO 的异构 WSN 模型及实现

本节讨论将 MMO 和 SMO 应用到 WSN 中的具体问题。首先,说明了网络模型和节点结构;然后,介绍了在邻

域发现(Neighbor Discovery, ND)和动态参与度模型(Dynamic Joining Model DM)基础上的动态组划分、路由、动态组休眠和组长更换等相关机制。

3.1 WSN 通讯机制及节点结构

本文讨论的 WSN 采用二层架构,传感器节点角色分为 CHSN 和 SN。其中,CHSN 是 MASN,网络拓扑如图 2 所示。

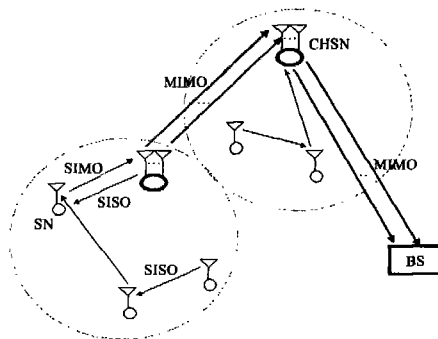


图 2 异构 WSN 通讯模型

SN 间传输消息使用 SISO 方式;SN 发消息给 CHSN 采用 SMO 方式。CHSN 间消息传输使用 MIMO 方式,CHSN 向 SN 发送消息使用 SISO 方式。两种节点都含有感知、发送和接收模块。发送模块由数模转换模块(DAC)、滤波器(Filter)、混合器(Mixer)、频率合成器(LO)和功率放大器(PA)构成,接收模块由 Filter LNA, Mixer IFA, LO 和模数转换模块(ADC)构成^[3](本文未考虑感知模块耗能)。

在我们所提异构网络中,SN 是单天线节点并使用 SISO 编解码模块。CHSN 使用空时编解码模块、信号合成器(SMO 解码模块)和判定电路。其中,发射模块分两部分:发射前先通过判定电路判断,若向 MASN 发送消息,首先进行空时编码然后几根天线同时发送消息;若向 SN 发消息,则使用单根天线以普通方式发送。MASN 接收模块也分两部分:天线收到信号并解调得到多路接收信号后判断接收的信号是从 SN 还是 MASN 发来的(发送信号编码时加入标识以区别),若为前者,利用信号合成器进行解码得原始信号;否则,利用空时解码器得到多路子信号,进而合并成原始信号流。

3.2 WSN 网络层相关协议

基于上节介绍的节点结构和通讯机制,该异构 WSN 有如下假设:

(1)网络中 SN 密集分布,且 SN 和 MASN 是均一分布;

(2)网络层从下到上依次分为 ND 协议、DM 模型和路由协议等。

ND 协议是网络层的基础,它负责实时广播节点自身状态信息(包括节点标识、与周围邻居的平均丢包率和消息序列号等)、接收并更新邻居节点的状态信息。文[6]使用该协议以及时发现网络中的拓扑变化,为上层协议提供

节点和链路状态信息。

由于 SN 密集分布, 我们在 ND 协议提供必要数据的基础上使用了动态参与度模型 (DM), 即在某一时刻只有部分节点参与组建网络。DM 根据网络环境变化改变网络中各节点的状态, 以保证数据传输可靠性和负载平衡。为最大化网络寿命, DM 只启动部分节点到 active 状态以采集周围环境信息和传送数据。处于 idle 状态的节点实时接收节点和链路状态信息, 监测网络通信情况。当链路丢包率大于门限值时 idle 节点考虑参与网络。其余节点处于 sleep 状态以节能。具体细节参见文 [6]。

3.3 异构 WSN 模型的实现

异构 WSN 的动态组划分是指传感器节点投撒后由 MASN 竞争当组长唤醒周围 SN、自动划分并建立组以有效地向 BS 传送消息。网络初始时 MASN 和 SN 都处于 idle 状态。MASN 开始收集周围环境信息, 若采集消息量未达到门限且没有收到 BS 的启动命令, 节点按 DM 状态转换机制经过 T_i 时间后进入 sleep 状态, 休眠 T_s 后又转为 idle。当采集的消息量或消息强度达到门限时说明该节点周围有情况出现。该 MASN 发送组长宣告消息 (h_a 包含采集的信号强度信息) 准备当组长。若在 t_1 时间内收到与之距离小于 $R_{mm}/2$ 的 MASN 发送的 h_a 先比较消息中的信号强度再比节点 ID, 信号强度大或信号强度相等时 ID 大的节点保持竞争状态; 否则, 退出该轮组长竞争; 如果没有收到 h_a 或与发送 h_a 的 MASN 距离不小于 $R_{mm}/2$ 时, 节点维持竞争状态。 t_1 时间后, 竞争状态的 MASN 当选 CHSN 并广播建立组消息 (ec)。

设 MASN 和 SN 的初始能量分别为 E_{MASN} 和 E_{SN} , 且 $E_{MASN} = \omega E_{SN}$, ($\omega \geq 1$)。异构 WSN 组划分时, CHSN 间距离 R_{mm} 为 M MO 传送距离, 组半径 $r_m \approx R_{mm}/2$ 。MASN 可以两种方式发送 ec 以最大功率广播或通过 SN 中继广播 ec 。前者只有 MASN 发送 ec , 而后者多个 SN 都要发送消息, 会引起广播风暴。发送 ec 消息给某边缘节点的耗能比值, $\eta = r_{mm}^2 \setminus \sum_{i=1}^n r_i^2$, 其中 $\sum_{i=1}^n r_i = r_{mm}$, ω 较大时使用变功率发送 ec 较优。

SN 若在 t_2 时间内收到多个 CHSN 发送的 ec 选择相距最短的 CHSN 作组长 (可由接收信号强弱判断)。 t_2 后根据 DM 决定是否启动到 active 状态。若转为 active 状态, 返回加入组消息 ($Join$) 和邻居状态表给组长; 否则保存组长节点标识维持 idle 状态。该过程使用直接传送协议 (SN 发送 $Join$ 消息给 CHSN, 并将接收到第一个回应消息对应的节点作为中继)。CHSN 获得组内拓扑后, 根据文 [7] 链路代价最小计算组员路由表并按传回路径发送给每个 SN; 组间路由方法和组内基本一致, 组长确定后利用直传协议发送消息给 BS 以获得组间路由表。

当 MASN 密集分布时, 也可考虑划分组时半径较小, 组内采用直接发送方式和组长通讯。动态组休眠机制适合

跟踪目标等特定应用, 分两种情况: BS 向 CHSN 发送休眠命令和 CHSN 根据组内信息采集情况自动进行状态转换。对后者, CHSN 依据一段时间内组内 n 个 SN 传送的消息量 $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$ (只考虑采集数据量不考虑控制和状态消息) 和消息优先级 (与消息类型和强度相关) $P = \max_{i=1, \dots, n} \{P_i\}$ 判断是否休眠。当 Q 和 P 都小于门限时运行组休眠。组长决定休眠时, 广播组休眠消息 (cs) 给组内 SN, CHSN 和 SN 休眠 T_{cs} 时间后同时苏醒。

当某 CHSN 的剩余能量低于门限时, 该节点发送更换组长消息给其他 MASN, 若同时有几个 MASN 竞争组长, 同一组内、链路代价较小的节点获胜。任务转交后由该 MASN 开始新的组划分, 在新组长完成路由计算前原组长继续中继消息。若有 SN 发现自己不属于任何组 (消息无法被传送), 则发送寻找组消息并由其他节点中继找到最近的组长并加入该组。

4 系统功耗与延迟模型

4.1 节点功耗和延迟公式

本小节给出图 2 中各方式下的节点功耗和延迟公式。假设数据传送误码率相同, 重要变量及说明见表 1 (其他参量值见附录参数表):

表 1 变量表

P_b	信号平均误码率。本文中设为 0.05
E_b	给定误码率下单位比特发送部件耗能
γ_b	接收端信噪比 SNR
R_b	数据发送率。Mica2 节点的极限速率为 19.2 kbps
M_t	发射天线数
H	A km out 机制下的信道衰减矩阵
b	每 s 每 Hz 带宽传送的比特数。 $b = L / (T_{on} B)$
α	M QAM 方案下由 b 值确定的比值
E_{bt}	发送单位比特节点总耗能

其中, SISO、SMO 和 M MO 的 H 分别为 $[h_1]$ 、 $[h_1 h_2]$ 和 $\begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix}$, h_i 代表发送接收天线对间的信道。 H 的 F 范式

$\|H\|_F = \sqrt{\sum_{N=1}^n \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2}$ 。所以有 $\|H_{mm}\|_F > \|H_{sn}\|_F > \|H_{ss}\|_F$, 信道不同三者比值也不同。

传感器节点功耗主要分为电路模块功耗和 PA 功耗两部分。由 3.1 节中节点的内部结构可得 SN 总功耗 P_c 为 [3]:

$$P_c \approx (P_{DAC} + 2P_{mix} + P_{fil1} + 2P_{syn} + P_{LNA} + P_{FA} + P_{filr} + P_{ADC}) + P_{PA} \quad (1)$$

设收发天线数均为 M , CHSN 总功耗见公式 (2):

$$P_c \approx [M (P_{DAC} + 2P_{mix} + P_{fil1} + P_{filr} + P_{LNA} + P_{FA} + P_{ADC}) + 2P_{syn} + P_{en\&le}] + P_{PA} \quad (2)$$

其中, P_{syn} 为频率合成器的功耗。除 P_{PA} 以外, 上式中各功耗值见附录参数表。 $P_{PA} = (1 + \alpha)P_{out}$, P_{out} 为发射信号功耗。 α 值的确定见文 [9], P_{out} 使用式 (3) 求解:

$$P_{\text{out}} = \overline{E_b R_b} \times \frac{(4\phi d)^2}{G_r G_r \bar{f}} M_i N_f \quad (3)$$

由于接收端 SNR 公式为 $\gamma_b = \frac{[H]_F^2 E_b}{M_i N_0}$, 误码率与 SNR 的关系为 $P_b = Q(\sqrt{2\gamma_b})^{1.4}$, 其中 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp^{-t^2/2} dt$ 因此, 数据传送耗能与误码率之间的对应关系如式 (4):

$$\overline{E_b} = \frac{M_i N_0 (Q^{-1}(P_b))^{-2}}{2[H]_F^2} \quad (4)$$

在固定发送速率下, 节点发送单位比特数据耗能 $E_{bt} = P_c / R_b$. 考虑到 WSN 中节点产生消息速率不固定, 因此, 变速率系统中发送单位比特数据的总耗能如式 (5) 所示^[3]:

$$\begin{aligned} E_{bt} &= P_c / R_b \\ &= \frac{(P_c - P_{PA})}{(bB)} + \frac{2}{3} (1 + \alpha) \left(\frac{P_b}{4} \right)^{-1M_i} \frac{2^b - 1}{b^{1M_i+1}} M_i N_0 \\ &\quad \times \frac{(4\phi d)^2}{G_r G_r \bar{f}} M_i N_f \end{aligned} \quad (5)$$

WSN 中信息的延迟由数据传送时间和节点本身延迟构成. 由分析得, 数据传输的延迟决定于数据传送时间. 节点按周期 T_s 发送信号单元, $T_s = T_{on} / (L/b) \approx 1/b$. 传送 L 比特数据的节点延迟为式 (6):

$$D = T_s \frac{L}{b} \approx \frac{L}{bB} \quad (6)$$

4.2 网络功耗和延迟模型

计算异构 WSN 功耗和延迟模型基于如下假设:

- (1) 利用节点标识段的编码区别 MASN 和 SN;
- (2) 只考虑 T 时间内 active 节点的耗能和延迟, idle 和 sleep 节点耗能忽略;
- (3) 组内 active 节点数保持不变;
- (4) 已知组间组内路由、链路代价和节点传送的消息量 (忽略控制消息的耗能).

在不影响结果有效性的前提下, 假设 DM 下网络中活跃节点集合在 T 时间内保持不变. 该集合 $U = M \cup S$, 其中 M 和 S 分别代表 MASN 和 SN 集合. M_i, M_r 代表节点发射和接收天线数. $\forall r_{ij} \in R_i$ (R_i 为路由集合), 对应从节点 i 到节点 j 的有向路径. 节点间距离 $d(r_{ij}): R_i \rightarrow R^+$, 链路误码率 $P_b(r_{ij}): R_i \rightarrow [0, 1]$, i 到 j 链路上传送的消息量 $Q(r_{ij}): R_i \rightarrow N$. $\forall i \in U, q(i): U \rightarrow N$, 对应 i 节点产生的消息量. 对 $\forall i \in U$ 发送单位比特数据节点的总耗能 $E_{bt} = f(d(r_{si}), M_i, M_r)$. T_{on} 代表期限 T 内实际传送消息的时间, 有 $(T - T_{on})$ 时间节点处于 idle 或 sleep 状态. $b(r_{ij}): R_i \rightarrow N$ 是 i 到 j 链路上根据传送数据量和期限时间对 E_{bt} 求最小值获得的最优值 (公式见 4.1 节).

对 $\forall i \in U$ 要传送的消息量 $Q_i = q(i) + \sum_{r_{si} \in R_i} Q(r_{si})$. T 时间内节点 i 总耗能公式如下式:

$$E_i = Q_i E_{bt} = \left[q(i) + \sum_{r_{si} \in R_i} Q(r_{si}) \right] f(d(r_{ij}), M_i, M_r) \quad (7)$$

节点 i 延迟公式为:

$$D_i = T_s \frac{Q_i}{b(r_{ij})} \approx \frac{1}{B} \sum_{r_{ij} \in R_i} \frac{Q(r_{ij})}{b(r_{ij})} \quad (8)$$

如 3.3 节中考虑, 在跟踪目标等特定应用中, 网络中某些组发现跟踪目标已经过后, 可暂时转为休眠态以节能. 假设任一节点只加入一个组, 设 T 时间内由 γ 确定的活跃组节点集合为 U_A , $|U_A| = \gamma |M + N|$, 其中, 网络平均活跃组百分比 $\gamma \in (0, 1]$ (在全范围监测的应用中 $\gamma = 1$). 则 T 时间内网络耗能为式 (9):

$$\begin{aligned} E_T &= \sum_{i \in U_A} E_i = \sum_{i \in U_A} Q_i E_{bt} \\ &= \sum_{i \in U_A} \left\{ \left[q(i) + \sum_{r_{si} \in R_i} Q(r_{si}) \right] f(d(r_{ij}), M_i, M_r) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

因为 SN 节点延迟与同构网络相同, 故这里不作考虑. T 时间内组长节点延迟为:

$$D_{CH} = \sum_{i \in (U_A \cap M)} D_i \approx \frac{1}{B} \sum_{i \in (U_A \cap M)} \sum_{r_{ij} \in R_i} \frac{Q(r_{ij})}{b(r_{ij})} \quad (10)$$

5 分析与模拟

首先比较固定速率下 SISO、SMO 和 MMO 的发送半径. 将式 (4) 代入式 (3) 中得到发送距离 d 的表达式为:

$$d = \sqrt{\frac{2[H]_F^2 P_{out} G_r G_r \bar{f}}{M_i N_0 (4\phi Q^{-1}(P_b))^{-2} R_b M_i N_f}} \quad (11)$$

由上式得三者半径的比值为 1: $\frac{[H_{sm}]_F}{[H_{ss}]_F}$:

$\frac{[H_{mm}]_F}{\sqrt{M_t} [H_{ss}]_F}$. 设定 P_{out} 为额定功率可具体算出发送距离 d (其他参数见表 1 和附录参数表). 单天线传感器节点 Mica2 的实际发送半径约为 15 米^[8]. 通过上述比值可知 SMO 和 MMO 发送半径约为 SISO 的 2 和 4 倍. 因此, 基于 MMO 的异构 WSN 最大组半径可为同构网络的 4 倍.

接着, 比较异构和同构 WSN 中某 CHSN 传送相同比特数的消息延迟, 约为 b_s/b_m . 异构网络中组长是 MASN, $b_m > b_s$; 组内节点延迟和同构网络相同. 所以该异构 WSN 延迟小于同构网络.

再比较同构和异构 WSN 中组长发送单位比特数据耗能. 由最优 b 值计算 MMO 和 SISO 传送方式的单位比特耗能 E_{Mbt} 和 E_{Sbt} 见表 2 由下表可看出, 多天线节点适合远距离传输. 距离大于 5 米后, 发送单位比特耗能明显小于单天线节点.

表 2 多天线与单天线 CHSN 发送单位比特数据耗能表

d (m)	1	5	10	20	40	70	100
$E_{Mbt} (10^6 \text{ J})$	2.013	2.684	3.221	4.026	4.061	6.440	6.441
$E_{Sbt} (10^6 \text{ J})$	1.579	3.517	4.221	5.275	5.276	10.553	10.561

为验证该基于组的异构无线传感器网络比普通同构网络节能, 本文在 $50 \times 50 \text{ m}^2$ 的区域模拟生成 500 个传感器节点, 其中, CHSN 的个数随着网络半径的变化而变化. 模拟采用动态组划分和直接传送路由算法, SN 节点参数

参考伯克利大学生产的 M ica2 节点设置, 具体参数见附录参数表.

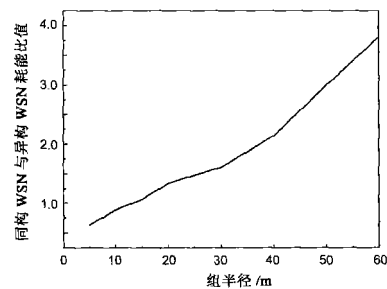


图 3 同构 WSN 与异构 WSN 耗能比值

图 3 所示曲线表示了相同组划分和路由机制下, 同构无线传感器网络和异构网络的耗能比值. 可以看出, 随着网络组半径的增大(组半径大于 15m), MASN 作组长的异构网络耗能明显少于基于组的同构 WSN. 并且, 当 BS 位置离感知网络较远时, 该异构网络也优于同构网络.

6 结论

本文采用 MASN 作组长节点, 将 M MO 和 SMO 方式引入 WSN 中, 提出了对应的异构 WSN 通讯机制和节点结构, 并建立了该系统的功耗及延迟模型, 最后分析验证了该网络在能耗和延迟等方面都优于不使用 M MO 的同构 WSN.

附录

参数表	
l	无线电波长 0.328m , $c=3\times 10^8\text{m/s}$ $f=916\text{MHz}$
M_t, M_r	MASN 发送、接收天线数. 文中均为 2
P_{out}	发射功率. Mica2 发送功率为 $-10\sim -15\text{dBm}$
R_{ss}, R_{sn}, R_{mm}	SISO, SMO, M MO 传送半径
r_{ss}, r_{mm}	同构和异构 WSN 的组半径大小约为 7.5m、 22.5m
$P_{ADC}, P_{DAC}, P_{IFA}$	7mW, 15.4mW, 3mW
$P_{mic}, P_{filt}=P_{fil}, P_{synr}$	30.3mW, 2.5mW, 50mW, 20mW
$P_{LNA}, P_{en\&de}$ $V_{dd}, L_{min}, n1=n2$	3V, 0.5 μm , 10MHz, 10 μA , 1pF, 1, 10KHz
$f_{osc}, I_{off}, C_p, \beta, B$ G_t, G_r	发射天线和接收天线增益 5dBi
M_L, N_f, N_0	40dB, 10dB, -171dBm/Hz

参考文献:

[1] WeiPeng Chen, Hou J C, Lui Sha Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks[J]. Mobile Computing IEEE Transactions 2004, 3(3): 258– 271.

[2] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal 1998, 6(8): 1451– 1458

[3] Shuguang Cui, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-efficiency of M MO and cooperative M MO techniques in sensor networks[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal 2004, 22(6): 1089– 1098

[4] A Paulraj, R Nabar, D Gore Introduction to Space-Time Wireless Communications[M]. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press 2003

[5] Sundaresan K, Sivakumar R, Ingran M A, Tae-Young Chang Medium access control in Ad Hoc networks with M MO links Optimization considerations and algorithms [J]. Mobile Computing IEEE Transactions 2004, 3(4): 350– 365.

[6] Alberto Cerpa, Deborah Estrin ASCENT: Adaptive self-configuring sensor networks topologies[J]. mobile computing IEEE transactions 2004, 3(3):

[7] JaeHwan Chang, Tassiulas L maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. Networking IEEE /ACM Transactions 2004, 12(4): 609– 619.

[8] Thomas Kriz, Oliver Gabel, kuedo uh, uninkl de/volltexte/2004/1687/pdf/MICA2.pdf[DB /OL]. 2004

[9] Shuguang Cui, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-constrained modulation optimization for coded system s[A]. Global Telecommunications Conference[C]. GLOBECOM 03 IEEE, 2003. 372– 376

作者简介:

赵保华 男, 1947 年生, 中国科学技术大学计算机系教授, 博士生导师, 主要研究方向: 无线传感器网络, 协议理论与工程.
E-mail: bhzhao@ustc.edu.cn

李 婧 女, 1983 年生于安徽合肥, 硕士生, 主要研究方向: 无线传感器网络.

张 炜 男, 1983 年生于山东聊城, 硕士生, 主要研究方向: 无线传感器网络.