

多输入多输出的异构无线传感器网络 时分多址调度算法

王庆华, 屈玉贵, 柏荣刚, 赵保华

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 230027, 合肥)

摘要: 针对基于多输入多输出技术的无线传感器网络中节点接入信道过程复杂、容易产生碰撞等问题, 提出了采用异构无线传感器网络模型和基于该网络模型的集中式时分多址调度算法. 网络模型中的节点分为普通节点和带有多天线的特殊节点, 节点被分为多个簇, 特殊节点担当簇头角色, 且在特殊节点间建立树形路由. 该网络模型有效解决了分配时隙时节点的传输方向性问题. 基于该模型的时分多址算法首先根据特殊节点的冲突节点度大小为节点染色, 然后根据节点的数据包数与距基站跳数的乘积确定节点分配时隙的先后次序. 实验结果表明, 该算法可以有效避免冲突, 提高时隙利用率, 具有时延小、吞吐量大、适用于基于多输入多输出技术的无线传感器网络等优点.

关键词: 多输入多输出; 无线传感器网络; 节点染色; 时隙分配

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1402-06

TDMA Scheduling Protocol for MIMO-Based Heterogeneous Wireless Sensor Networks

WANG Qinghua, QU Yugui, BAI Ronggang, ZHAO Baohua

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to solve the problems that the process of accessing channel is complex and pronely causes collision in MIMO-based wireless sensor networks (WSN), a heterogeneous WSN model and a centralized time division multiple access (TDMA) scheduling algorithm based on the network model are proposed. The nodes of the network model are classified into common nodes and special nodes with multiple antennas, and are divided into clusters. The special nodes act as cluster headers, and tree-routes are constructed among them. The network model effectively solves the problem of transmission direction as assigning time slot. The scheduling algorithm based on the model first colors the nodes with considering the conflict node degree of special node, then decides the scheduling priority according to the product of node packet number and hop to the base station. The simulations show that the algorithm enables to effectively avoid conflict and raises utilization rate of slot with better performances in latency, throughput and suitability for the MIMO-based WSN.

Keywords: multiple-input multiple-output; wireless sensor network; node coloring; slot scheduling

按网络中节点结构是否相同, 无线传感器网络 (WSN) 可分为同构网络和异构网络^[1]. 同构网络中

所有节点结构一致,异构网络包括特殊节点与普通节点,特殊节点的结构和能量异于普通节点.在目前的研究中,基于多输入多输出技术(MIMO)的 WSN 多采用同构网络^[2],且节点一般采用协作式 MIMO^[3-4],因而其通信和能耗模型不同于普通的 WSN,节点在空间和时间上对无线资源的占用更加复杂^[5].协作节点间通信过程的复杂化、节点覆盖模型的不确定性和同步要求等,使 MAC 协议的设计变得异常复杂.

与同构网络相比,异构网络在网络协议设计、拓扑控制、时间同步、数据管理等方面都具有便利性和易操作性.为避免引入协作式技术带来的众多问题,同时又能充分利用 MIMO 技术能耗小、误码率低等优点,本文采用特殊节点安置多天线的异构 WSN 结构.

节点以 MIMO 方式通信时,其通信半径比单入单出(SISO)方式大^[2],易对其他节点造成干扰,若采用基于竞争的 MAC 协议,则会因碰撞而浪费大量能量,而时分多址(TDMA)机制可以避免竞争机制的碰撞问题,因此适用于基于 MIMO 技术的 WSN. TDMA 机制分为分布式和集中式 2 种.分布式 TDMA 需节点间多次交互协商来确定与所有邻居节点都不冲突的时隙,这个过程耗能多且不能得到较优结果,而集中式 TDMA 可由基站集中分配所有节点的无冲突时隙,且可节省节点能量.本文提出一种基于 MIMO 技术的异构 WSN 集中式 TDMA 调度算法(heterogeneous WSN centralized TDMA scheduling, HWCTS),包括 2 部分:第 1 部分通过建立特殊节点的独立集为节点染色;第 2 部分在染色的基础上,兼顾特殊节点的数据包数和距离基站的跳数来确定节点的优先级并为其分配时隙,实现多个特殊节点以 MIMO 方式在同一时隙中的无冲突传输,从而可以充分利用无线信道,减小网络延时.

1 时隙分配的有关问题和网络模型

1.1 利用图染色方法分配时隙的有关问题

在研究 TDMA 时隙分配算法时,可采用图染色的方法为节点分配时隙^[6-8].与单纯的图染色问题相比,TDMA 时隙分配要复杂得多.

首先,TDMA 时隙分配需要考虑无线传输中的干扰问题.干扰主要分为主干扰和次干扰^[8].主干扰是指一个节点同时发送和接收数据,或同时有 2 个不同的节点向同一个节点发送数据;次干扰是指当

节点 A 接收 B 的数据时,同时也收到了节点 C 向 D 发送的数据.分配时隙时,在同一时隙传输的节点间彼此不能产生主干扰和次干扰.

其次,TDMA 时隙分配需要考虑节点传输的方向问题.由于节点间的数据传输具有方向性,即使采用顶点染色的方法为节点分配一个不同于其邻居节点的时隙,当节点通信的目的节点不同时,也会给其他节点造成干扰.与顶点染色相比,用边染色的方法可以获得更有效的分配结果.为 2 个节点间的无方向边染色后,由于数据传输的方向性,需将该边的颜色映射为 2 个时隙,如果映射过程分配不佳,会带来隐藏或暴露终端问题^[8].

最后,在多跳传感器网络中,如果时隙分配不当,会造成某些节点无数据发送,而其他一些节点却存储了大量数据.因此,多跳网络中的时隙分配应根据节点的数据包数量来调整分配次序.

1.2 网络模型

根据以上对利用图染色为节点分配 TDMA 时隙问题的讨论,我们给出本文所采用的网络模型,如图 1 所示.网络中的节点被分成多个簇,特殊节点配置有多天线,担当簇头的角色,普通节点为簇内节点.将节点分簇便于网络拓扑的管理、节点的同步和路由表的建立,并且基站执行 TDMA 调度算法时,只需为簇头节点分配时隙,大大减小了计算复杂度.簇头节点配置多天线有以下好处:①由于簇头间的通信距离比簇内节点大得多,因此多天线簇头节点以 MIMO 方式通信比传统的 SISO 方式可节省大量能量^[2];②簇头避免了寻找协作式节点的操作,可减少管理信息的交互,节省节点的能量.

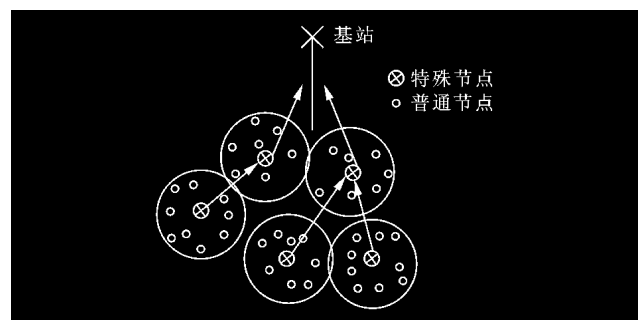


图 1 网络模型示意图

分簇后的网络路由分为簇内路由和簇间路由.簇内路由由簇头管理,这部分本文不做考虑.簇间路由采用文献[9]中所提路由算法,在特殊节点和基站间建立以基站为根节点的路由树,即每个特殊节点都以它附近的一个距离基站更近的特殊节点为转发父节点.如图 1 所示,箭头所指即为父节点.

建立路由后即确定了特殊节点间数据传输的方向性,每个特殊节点只需将数据传送给其父节点.这使得点染色等价于边染色,每一边的颜色只与一个时隙对应,无需再映射.该网络模型解决了利用图染色分配时隙时的传输方向性问题,同时传输方向性的确定也简化了干扰问题,有助于得到更优的分配结果.

本网络模型是基于周期性操作的,网络中的普通节点按一定的周期采集数据并发送给簇头,特殊节点接收完本簇内的数据后进行数据融合,以减少冗余.假设基站已知每个特殊节点在每周周期产生的融合数据包数,在1个周期内要将所有的数据传送给基站,因此TDMA调度算法要分配尽可能少的时隙来完成数据传输.

2 HWCTS 调度算法

文献[10]已经证明,寻找最小时隙数的TDMA调度问题是一个NP完全问题.求解该问题最优解的时间复杂度很高,这在WSN中是不现实的.因此,本文利用独立集和图染色的思想,提出HWCTS调度算法来为节点分配时隙.

由于在WSN中基站的能量一般不受限制,因此该调度算法由基站执行.为执行调度算法,基站需获得特殊节点的路由连接关系和冲突表.由于节点间已经建立了路由表,因此特殊节点只需将各自的路由信息发送给基站即可.基站根据所有特殊节点的路由信息,得到网络的路由连接图 $G=(V, E)$,其中 V 为特殊节点集合, $N=|V|$ 为 V 中的顶点数, $E \subset V \times V$ 是特殊节点的路由连接关系.图 G 是一个以基站为根的树,每个特殊节点的父节点即为其转发节点.

为获得冲突表,首先应建立特殊节点的干扰表.根据在NS2中的实验知,如果2个节点间的距离在2倍通信半径内,则它们互为干扰节点.因此,将每个特殊节点的广播半径扩大为正常通信半径的2倍,广播交互信息,获得其2跳范围内的邻居节点表,并发送给基站.基站得到所有特殊节点的邻居信息表后,建立特殊节点的干扰表 $G_1=(V, E_1)$,其中 $E_1 \subset V \times V$ 是网络中彼此干扰的特殊节点构成的边的集合.

基站根据获得的网络路由表和干扰表,采用文献[11]中的方法获得冲突表 $G_c=(V, E_c)$, $E_c \subset V \times V$ 是网络中所有彼此冲突的特殊节点构成的边的集合.基站获得冲突表后,即可执行HWCTS调度

算法.算法分为2部分,第1部分是为节点染色,第2部分是利用染色结果为节点分配时隙.

2.1 染色

根据图染色理论,染同一颜色的节点间是不相邻的,即独立的,因此可通过寻找图的独立集来给节点染色,每个独立集中的节点可以染同一颜色,独立集的数量即为需用的颜色数.

为使染同一颜色的节点尽可能多,也即所用颜色数尽可能少,本文采用建立极大独立集的方法为图染色.所谓极大独立集是指:设 S 为图 $V(G)$ 的一个独立子集,如果 $\forall v \in V \setminus S$,都存在 $u \in S$,满足 u, v 是相邻的,则 S 为图 $V(G)$ 的一个极大独立集.由于基站不占用时隙传输数据,故无需为基站染色.需要染色的冲突图为 G_c 除去与基站有关项的图 $G_{c,b}$,即 $G_{c,b}=(V_b, E_{c,b})$,其中 $V_b=V \setminus B_s$, B_s 表示基站, $E_{c,b}$ 为 E_c 中除去与基站相连的边的集合.

寻找图的极大独立集的算法如图2所示,算法执行一循环程序,每次循环中,首先将节点按其冲突节点度从大到小排序,度大的节点优先被归入独立集.每次循环获得一极大独立集,并将该独立集和其连接边从原图中删除.去掉度大的节点大大减小了剩余节点的冲突节点度,则剩余节点具有更大的自由度来寻找无冲突节点,从而使每个独立集的节点数尽可能多.从算法中可以看出, S_1 是图 $G_{c,b}$ 的极大独立集, S_2 是图 $G_{c,b}-S_1$ 的极大独立集, S_n 是图 $G_{c,b}-(S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_{n-1})$ 的极大独立集.该算法的复杂度为 $O(N^2)$, N 为特殊节点总数.

图3是采用该算法获得极大独立集的例子,节点附近的数字表示该节点的冲突节点度.将初始图中的节点按照节点的冲突节点度从大到小排序为 $\{f, e, a, c, g, i, b, d, h\}$,从排序后的节点中求得第一个极大独立集为 $S_1=\{f, b, d\}$,然后将剩下的节点再按其冲突节点度排序,求其极大独立集,依次计算,最后求得的结果为: $S_2=\{e, g\}$; $S_3=\{h, a, c\}$; $S_4=\{i\}$.

如果找到 n 个极大独立集 S ,易知需用 n 种颜色为图染色,即每帧最大时隙数为 n .算法第2部分解决如何将 n 种颜色分配给节点,即时隙分配.

2.2 分配时隙

TDMA时隙分配方案一般将1帧分为固定数量的时隙,并为每组无干扰节点分配1个时隙.如果在多跳网络中采用此方案,会造成一些节点在某些分配给自己的时隙中无数据传输,从而降低了时隙利用率,扩大了传输延时.

输入: 冲突图 $G_{C,b}=(V_b, E_{C,b})$
 输出: 图 $G_{C,b}$ 的独立集 $(S_1, S_2, \dots)$
 $TempG_C = G_{C,b}$
 $i = 1$
 while $V_b \neq \emptyset$
 将 V_b 按冲突节点度从大到小排序
 $S_i = \text{FindInfIndepSet}(TempG_C)$
 $V_b = V_b \setminus S_i$
 $E_{C,b} = E_{C,b} \setminus \text{the edges link to the nodes of } S_i$
 $TempG_C = (V_b, E_{C,b})$
 $i++$
 end while
 FindInfIndepSet($TempG_C$) 的算法:
 输入: $TempG_C = (V_b, E_{C,b})$
 输出: 极大独立集 S
 $S = \emptyset$
 for each node $m \in V_b$
 if $(m, n) \notin E_{C,b} \forall n \in S$
 $S = S \cup \{m\}$
 end if
 end for

图 2 建立图的极大独立集算法

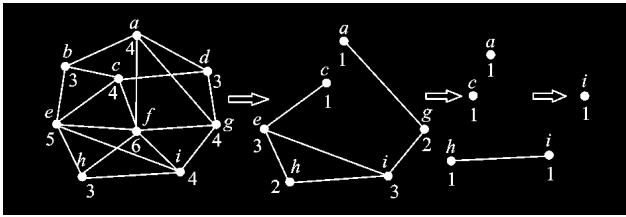


图 3 建立图的极大独立集示例

由于本文所提网络模型是基于周期性操作的, 可以根据节点的数据包数调节每帧时隙数和分配次序, 因此在分配时隙时, 只为有数据要传输的节点分配时隙, 且优先分配给需要时隙数多的独立集中的特殊节点. 由图 4 可知, 当所有特殊节点的数据都到达基站时, 时隙分配算法结束. 在每帧分配时隙时, 首先将独立集按 $\sum_j (\text{hop}_j * \text{packet}_j)$ 的值从大到小排序, 其中独立集 S_i 的 hop_j 为 S_i 的节点 j 到基站的跳数, packet_j 为节点 j 要发送的数据包数, $\text{hop}_j * \text{packet}_j$ 表示节点 j 目前所有数据包要到达基站所需要的时隙数. 按 $\sum_j (\text{hop}_j * \text{packet}_j)$ 排序的目的是, 让 $\sum_j (\text{hop}_j * \text{packet}_j)$ 值大的 S_i 具有优先分配权. 该分配方法既考虑了节点存储的数据包数量, 又顾及了节点距离基站的跳数; 既可以让存储数据多的节点优先发送数据, 防止某些节点存储过多的数据包, 又使距离基站远的节点也拥有发送数据的优先权, 防止数据传输时延太大.

算法每次循环完成 1 帧时隙的分配, 每帧中有

输入: 网络连接图 $G=(V, E)$, $G_{C,b}=(V_b, E_{C,b})$
 独立集 $(S_1, S_2, \dots, S_n)$
 输出: 网络节点的时隙分配结果
 $\text{slot} = 1, \text{frame} = 1$
 while 还有数据包没有到达基站 do
 将 $(S_1, S_2, \dots, S_n)$ 按 $\sum_j (\text{hop}_j * \text{packet}_j)$ 值从大到小排序
 for $i = 1$ to n
 $\text{set}_i = \{u, u \in S_i \text{ 并且 } u \text{ 有数据包}\}$
 if $\text{set}_i \neq \emptyset$
 $\text{left}_i = V_b \setminus S_i$
 for each node $u \in \text{left}_i$
 if u 有数据包 && $(u, v) \in E_C, \forall v \in \text{set}_i$
 $\text{set}_i = \text{set}_i \cup \{u\}$
 end if
 end for
 将 slot 分配给 set_i
 $\text{slot}++$
 更新该时隙节点数据包的位置
 end if
 end for
 $\text{frame}++$
 end while

图 4 时隙分配算法

数据包 of 的节点至少分得 1 个时隙. 由于某些独立集中有的节点在某帧分配时无数据包发送, 因此该独立集的补集中存在与该独立集中不冲突的节点, 可以与该独立集在同一时隙传输. 此分配策略充分考虑了可同时传输的节点, 有效地利用了每个时隙, 增加了网络吞吐量, 减小了时延. 该算法的时间复杂度为 $O(tn^2 + tdn)$, 其中 t 为分配的总时隙数, d 为特殊节点的最大冲突节点度, n 为独立集数量.

利用图 3 的染色结果并采用此分配算法, 为节点分配 TDMA 时隙的结果如图 5 所示.

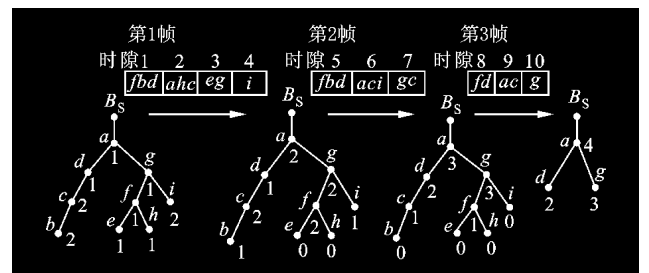


图 5 时隙分配算法举例

假设图 3 中特殊节点的路由连接图如图 5 中第 1 棵树所示, 每个节点附近的数字表示节点要发送的数据包数. 由前 3 帧的分配结果可看出, 多数时隙都有多个节点同时传输, 充分利用了无线信道. 3 帧后只有节点 a, d, g 有数据要传送, 由于 a, d, g 彼此干扰, 每个节点必须占用 1 个时隙传输.

基站执行完分配算法后, 以广播的形式将分配

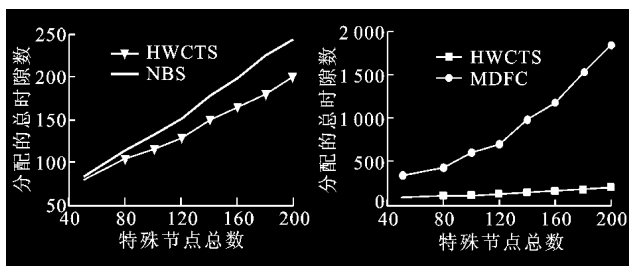
结果传送给每个特殊节点. 在每个周期操作中, 特殊节点按基站预先分配的时隙传送或接收, 其他时隙休眠, 以节省能量.

3 仿真结果和分析

为评估 HWCTS 的性能, 本节给出了对基于 MIMO 技术的 WSN 采用不同 TDMA 调度算法的时隙分配实验结果. 仿真环境设置如下: 在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的区域中, 散播不同数量的特殊节点, 普通节点与特殊节点的数量比固定为 $10:1$. 基站位于部署区域的中心, 基站与特殊节点间建立路由树. 特殊节点的通信半径设为 40 m , 干扰半径为 80 m .

3.1 不同 TDMA 调度算法的性能比较

本节比较了 HWCTS、最大度染色算法 (MDFC) 和基于节点的时隙分配算法 (NBS)^[11] 3 种 TDMA 调度算法的性能, 仿真结果如图 6 所示.



(a) HWCTS 与 NBS (b) HWCTS 与 MDFC

图 6 不同 TDMA 调度算法的比较

在图 6 所示的仿真环境中, 每个特殊节点在每个周期产生 1 个融合数据包. 从图 6a 可以看出, HWCTS 分配的总时隙数小于 NBS 分配的时隙数, 并且差值随特殊节点数的增加而增大. 这是由于 HWCTS 不仅在染色时根据冲突节点度的大小确定其归入极大独立集的先后顺序, 使独立集总数尽可能少, 而且在分配时隙时综合考虑了节点所剩数据包和距基站跳数的信息, 为 $\sum_j (\text{hop}_j * \text{packet}_j)$ 大的独立集优先分配时隙, 优化了多跳网络的时隙分配次序, 减小了网络时延. NBS 算法只是采用启发式算法进行染色和分配时隙, 并未考虑节点的数据包和跳数信息.

从图 6b 可以看出, HWCTS 分配的总时隙数远远小于 MDFC 分配的总时隙数, 这是由于 MDFC 只是在染色时考虑了冲突节点度的大小, 在分配时隙时, MDFC 在每帧为每个节点固定分配一个时隙, 当某节点无数据发送时, 则其时隙被浪费, 因此该算法浪费的时隙多, 导致分配的总时隙数远远大

于 HWCTS.

3.2 网络负载不同时的性能比较

当网络负载不同时, 不同调度算法的性能比较结果如图 7 所示, 图中下标 1、2、4 表示每周期每个特殊节点产生的数据包数分别为 1、2 和 4.

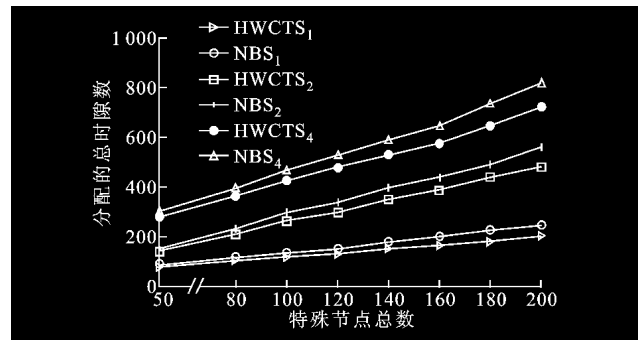


图 7 网络负载不同时的性能比较

从图 7 中可以看出, 在各种情景下 HWCTS 分配的总时隙数都少于 NBS, 并且差值随特殊节点总数和网络负载的增加而略有增大. 这是由于当特殊节点总数增多时, 不同特殊节点的冲突节点度差别增大, HWCTS 充分利用了该信息建立极大独立集, 使每个独立集中的节点尽可能多, 可获得比 NBS 更优的染色结果, 当网络负载增大时, 不同独立集的 $\sum_j (\text{hop}_j * \text{packet}_j)$ 值之间的差异变大, 使得 HWCTS 有更大的空间来优化时隙分配次序, 从而获得优于 NBS 的结果.

3.3 吞吐量比较

在不同网络环境下, 3 种调度算法的网络吞吐量比较见表 1. 网络吞吐量定义为每个时隙平均传输的数据包数.

表 1 网络吞吐量比较

算法	网络吞吐量/包·时隙 ⁻¹			
	$n=50$	$n=100$	$n=160$	$n=200$
HWCTS	2.070 9	2.160 3	2.214 5	2.233 3
NBS	1.946 7	1.918 6	1.906 6	1.897 3
MDFC	0.629 3	0.566 2	0.547 3	0.296 1

n : 特殊节点数.

从表 1 可以看出, HWCTS 的性能优于其他 2 种算法, 并且 HWCTS 的吞吐量随特殊节点总数的增加而增大, 而 NBS 和 MDFC 则随特殊节点总数的增加而减小. 这是由于网络中特殊节点总数的增加为 HWCTS 的“根据节点的冲突节点度为节点染色、根据数据包数与跳数的积为节点安排不同分配优先级”的准则提供了更大的搜索空间, 因此可以优化网络的性能, 而其他 2 种算法则没有利用数据包

数和跳数信息,当网络中要传输的数据包增多时,在某些节点,尤其是边界节点上,某些帧中无数据包传输的概率增大,从而浪费了分配的时隙,使得时隙利用率降低.由此可见,HWCTS的性能随特殊节点的增多而提高,因此适用于大规模的基于MIMO技术的WSN.

4 总 结

本文提出了一种基于MIMO技术的异构WSN模型,以及适用于该模型的集中式TDMA调度算法——HWCTS.该调度算法首先根据冲突节点度的大小将节点排序,通过建立节点的极大独立集为节点染色,使总颜色数尽量少,然后综合考虑节点的数据包数和距基站的跳数信息,确定节点分配时隙的优先级,为节点分配合理时隙,实现多个特殊节点在同一时隙的无干扰传输.仿真结果表明,与NBS和MDFC相比,HWCTS只需较少的时隙即可完成同样数量数据包的传输,且其网络吞吐量大于这2种算法,同时HWCTS的性能随网络规模的增大而提高,因此适用于大规模的基于MIMO技术的WSN.

参考文献:

- [1] CHEN Weipeng, HOU Jennifer, SHA Lui. Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor network. [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(3): 258-271.
- [2] CUI Shuguang, GOLDSMISTH A J, ARS B. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. IEEE Journal, 2004, 22(6): 1089-1098.
- [3] ZHANG Yanbing, DAI Huaiyu. Selecting optimal transmission strategies for cooperative sensor networks [C]//Proceedings of IEEE Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005: 335-341.
- [4] SUDHARMAN K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(5): 984-989.
- [5] 李青, 于宏毅, 刘阿娜. 基于协作分集技术的 WSN MAC 协议设计[J]. 电信科学, 2007, 23 (1): 54-59.
LI Qing, YU Hongyi, LIU A'na. MAC layer study of wireless sensor networks using cooperative transmission [J]. Telecommunications Science, 2007, 23(1): 54-59.
- [6] RAMANATHAN S. Scheduling algorithms for multi-hop radio networks [J]. ACM Transactions on Networking, 1993, 1(2): 211-222.
- [7] GANDHAM S, DAWANDE M. Link scheduling in sensor networks: distributed edge coloring revisited [C]// Proceedings of IEEE INFCOM 2005: Vol 4. New York, USA: John Wiley, 2005: 2492-2501.
- [8] CHENG Maggie, LI Yin. Transmission scheduling in sensor networks via directed edge coloring [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications 2007. New York, USA: John Wiley, 2007: 3710-3715
- [9] 蔺智挺, 赵保华, 屈玉贵, 等. WSN 的动态树型结构 [J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(S): 18-22.
LIN Zhiting, ZHAO Baohua, QU Yugui. Dynamic-tree structure in WSN [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006, 29(S): 18-22.
- [10] ARIKAN E. Some complexity results about packet radio networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1984, 30(4): 910-918.
- [11] SINERM C E, PRAVIN V. TDMA scheduling algorithms for sensor network [R]. Berkeley, CA, USA: University of California Berkeley. Department of Electrical Engineering and Computer Science, 2005.

(编辑 葛赵青 苗凌)