

# HM-MAC: 一种支持广播的多信道传感器网络 MAC 协议

张德升 李金宝 郭龙江 纪守领 王宇

(黑龙江大学计算机科学技术学院 哈尔滨 150080)

(黑龙江省数据库与并行计算重点实验室 哈尔滨 150080)

(jbli@hlju.edu.cn)

## HM-MAC: A Multi-Channel MAC Protocol for Sensor Network with Broadcast Supporting

Zhang Desheng, Li Jinbao, Guo Longjiang, Ji Shouling, and Wang Yu

(School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080)

(Key Laboratory of Database and Parallel Computing of Heilongjiang Province, Harbin 150080)

**Abstract** Aiming at single radio multi-channel MAC protocol's problems, such as the requirement of time synchronization and lots of orthogonal channels, large number of multi-channel hidden terminals, loss of single-hop multi-channel broadcast data, etc, the authors propose a competition based multi-channel MAC protocol, called HM-MAC, to tackle those problems for wireless sensor network. In HM-MAC, all the nodes work without time synchronization, use few orthogonal channels and take advantage of handshake mechanism to reduce the number of multi-channel hidden terminals. Meanwhile, a probability based sender adjustment broadcast scheme is presented, which reduces the loss of data and improves broadcasting efficiency. By theoretical analysis of the unicast mode, the number of used channel as well as the number of multi-channel hidden terminals are obtained. And, via theoretical analysis of the broadcast mode, the broadcasting efficiency of HM-MAC broadcast scheme is also obtained. More importantly, broadcast efficiencies of current multi-channel broadcast scheme are analyzed theoretically. In addition, a detailed comparison between HM-MAC broadcast scheme and other multi-channel broadcast schemes is presented. Finally, the theoretical analysis is verified via simulation experiments. The results of simulation experiment show that HM-MAC reduces the number of multi-channel hidden terminals effectively, and improves broadcasting efficiency as well as network throughput significantly.

**Key words** WSN; multi-channel MAC protocol; multi-channel hidden terminal; time synchronization; multi-channel broadcast

**摘要** 针对单 Radio 多信道 MAC 协议需要全网时间同步、占用大量正交信道、多信道隐终端较多以及单跳多信道广播数据大量丢失等问题,提出了一种基于竞争的多信道 MAC 协议——HM-MAC。该协议无需全网时间同步,通过动态预约技术降低了正交信道占用量,利用握手机制减少了多信道隐终端数目,同时, HM-MAC 采用基于概率的广播发送者协调机制,减少了广播数据丢失,提高了广播效率。

收稿日期:2009-08-13;修回日期:2009-10-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(60803015);中国博士后基金项目(20080430902);黑龙江省教育厅科学技术研究重点项目(1154Z1001);黑龙江省博士后基金项目(LRB08-021);黑龙江省科技计划基金项目(QC04C40);黑龙江省教育厅科学技术研究指导项目(11533045,11531276);黑龙江省研究生创新科研项目(YJSCX2009-019HLJ);哈尔滨市青年科技创新人才研究专项基金项目(2008RFQXG107,2009RFQXG080)

在理论上分析了所用信道数目、多信道隐终端数目以及广播效率等性能参数。实验结果表明: HM-MAC 可以有效地解决多信道隐终端数目较多的问题, 显著地提高了广播效率和网络吞吐量。

**关键词** 无线传感器网络; 多信道 MAC 协议; 多信道隐终端; 时间同步; 多信道广播

**中图分类号** TP393

在 WSN 中, MAC 协议处于 WSN 协议栈的底层, 决定着无线信道的使用方式, 用于建立点到点、点到多点的通信链路, 是所有数据包在无线信道上传输的直接控制者, 因此 MAC 协议将直接影响网络的整体性能, 是 WSN 协议栈研究的重点问题之一<sup>[1]</sup>。

目前, 研究人员相继提出了一些针对 WSN 不同特点的 MAC 协议, 其中大部分是基于单信道的 MAC 协议, 如 S-MAC<sup>[2]</sup> 等。这些协议通过竞争或调度机制, 使用同一信道传输控制信息和数据, 降低了信道利用率。而且对于部署密度较高的 WSN, 单信道 MAC 协议会产生大量数据包冲突, 从而导致网络吞吐量较低和时延较大等问题。

针对上述问题, 国内外学者对 WSN 中的多信道 MAC 协议进行了研究<sup>[3-5]</sup>。在 WSN 中, 节点的通信带宽有限, 多信道有利于更好地提供通信服务。相对于单信道 MAC 协议, 多信道 MAC 协议在增加网络吞吐量和减少时延等方面的性能均有提高。而且现今最常见的半双工 Radio (如 CC2420) 都已经提供了多个信道, 因此设计基于单 Radio 多信道的 MAC 协议具有重要意义。但是现存的多信道 MAC 协议<sup>[5-7]</sup> 一般都存在需要时间同步、需要大量正交信道、多信道隐终端较多以及多信道广播数据大量丢失等问题。

针对现有多信道 MAC 协议存在的问题, 本文提出了一种基于竞争的单 Radio 多信道 MAC 协议。该协议利用一个控制信道和多个数据信道进行通信, 节点在控制信道上通过竞争的方式动态预约数据信道, 并在其上进行数据传输。

本文主要贡献如下: 提出了一种无需全网时间同步的单 Radio 多信道 MAC 协议——HM-MAC (Heilongjiang University multi-channel MAC)。该协议只需较少的信道, 在较大程度上解决了多信道隐终端问题。同时, HM-MAC 利用一种基于概率的发送者协调机制, 提高了广播效率和网络能量的利用率。最后, 本文对单 Radio 多信道的单播机制和广播机制进行了理论分析和模拟实验。

## 1 相关工作

近几年, 国内外学者提出了一些基于多信道的 MAC 协议。文献[3]提出了一个多信道 MAC 协议 MMSN, 该协议是第一个针对 WSN 的特点设计的多信道 MAC 协议, 但是该协议需要时间同步。文献[4]提供了一种能量有效且无冲突的 MAC 协议 HyMAC, 该协议需要节点之间精确时间同步。文献[5]提出了一种基于多信道的混合型 MAC 协议 TFMAC, 该协议改进了传统的 TDMA 技术, 也需要时间同步。文献[6]提出了一种多信道的 MAC 协议 Y-MAC, 该协议在 Crankshaft 协议的基础上, 引入了多信道机制。文献[7]提出了一种基于随机跳频的多信道 MAC 协议 McMAC, 但该协议需要较多正交信道和严格时间同步。文献[8]提出了一种通用的多信道 MAC 协议, 该协议不针对任何特殊的网络通信模式, 但机制较为复杂。文献[9]提出了一种无需时间同步的多信道协议, 但该协议主要是利用多信道建立一个优化的拓扑结构, 而不是 MAC 协议。

上述 MAC 协议提高了网络吞吐量, 降低了网络时延, 使网络性能进一步提高。但上述协议大部分存在以下问题: 1) 上述 MAC 协议大部分是基于调度机制, 需要全网保持严格时间同步。2) 上述协议通常为两跳之内的节点分配互不相同的信道, 所需的信道数大约等于两跳之内的节点数。3) 现存采用竞争机制的协议分配信道后, 在某个节点的信道上进行的握手通信不能被其邻居监听。这就会导致多信道隐终端大量增多的问题。4) 在基于竞争机制的多信道 MAC 协议中, 某一时刻一个广播发送节点只能处于一个信道, 所以只有部分邻居节点可以收到广播数据包。

## 2 HM-MAC 协议设计

### 2.1 HM-MAC 单播机制

HM-MAC 协议将无线信道分为一个控制信道 (control channel, CC) 和  $K$  个数据信道 (data channel,

DC),  $K$  个 DC 编号为  $1, 2, \dots, K$ . CC 为所有节点的默认信道, 当节点没有数据传输时在 CC 上监听邻居节点发送的控制信息. DC 为数据通信信道, 源节点  $S$  有数据报文到达时, 通过握手机制和目的节点  $R$  在 CC 上动态预约 DC, 然后切换到约定好的 DC 上进行通信, 通信完毕后一起切换到 CC 上.

在 HM-MAC 中, 每个节点有一个邻居节点表  $NT$  (neighbor table), 该表记录了邻居节点所处的信道和剩余通信时间  $RT$  (remaining time), 该时间通过剩余数据包数衡量. 每个节点有一个信道状态表  $CST$  (channel status table), 该表记录了  $K$  个 DC 的状态. 节点通过在 CC 上监听, 更新自身  $NT$  和  $CST$ .

一次数据传输过程如图 1 所示. ① 当路由层单播报文 (unicast message, UM) 到达源节点  $S$  的 MAC 层时, 如果目的节点  $R$  在 CC 上且 CC 空闲,  $S$  准备发送 RTS. 因为存在隐终端问题, 所以 HM-MAC 让  $R$  决定每次通信使用的 DC 序号.  $S$  把自身的  $CST$  和本次 UM 长度  $l$  写入 RTS, 发送给  $R$ . ②  $R$  收到 RTS 之后把其中  $S$  的  $CST$  和自身的  $CST$  进行比较, 如果有相同的空闲 DC, 则在其中随机选择一个 DC, 把其序号  $n$  和报文长度  $l$  写入 CTS, 发回给  $S$ . 而  $R$  在 CC 上的邻居通过监听该 CTS 来更新各自的  $NT$  和  $CST$ . ③  $S$  收到 CTS 之后得知 DC 序号  $n$ , 但有些是  $S$  的邻居却不是  $R$  的邻居的节点, 并不知道 DC 序号  $n$ . 此时,  $S$  需要再次发送一个含有具体 DC 序号  $n$  和 UM 长度  $l$  的 SRTS (second RTS). ④  $S$  发送 SRTS 之后切换到  $n$  号 DC 上,  $R$  在接收到 SRTS 之后也切换到  $n$  号 DC 上.  $S$  在  $n$  号 DC 上载波监听之后, 通过数据包 (DATA) 和确认包 (ACK) 的方式同  $R$  传输数据. HM-MAC 在 CC

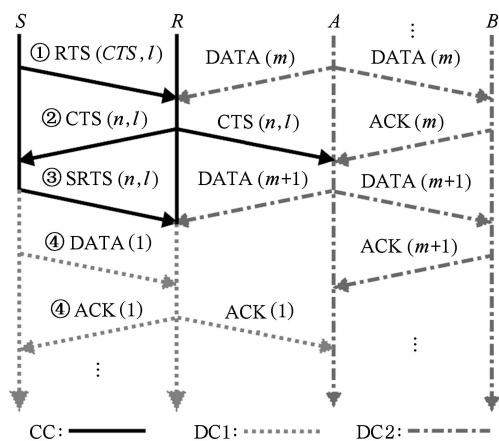


Fig. 1 HM-MAC communication scheme.

图 1 HM-MAC 传输机制

上的 3 次握手机制在 UM 较小的情况下可能代价过高. 所以 HM-MAC 规定当节点产生 UM 的数据较小时, 可以直接在 CC 上发送 UM.

## 2.2 HM-MAC 广播机制

在广播机制下中, 发送节点在 CC 上通过计算接收节点数目的期望来选择一个时刻进行广播, (broadcast on CC one later, BCOL). 当广播发送节点  $S$  在时刻  $T_0$  有广播报文 (broadcast message, BM) 要发送时 (假设在  $S$  的一跳范围内有  $k$  个 DC 被占用),  $S$  针对每一个被占用的 DC 上数据传输的结束时间  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , 计算一跳范围内 CC 上节点数目的期望值  $E_{T_1}, E_{T_2}, \dots, E_{T_k}$ , 每个期望值  $E_{T_i}$  表示: 如果  $S$  在时刻  $T_i$  发送广播包, 收到该广播包的节点数目的期望. 具体计算公式在第 3 节性能分析中给出.

## 2.3 HM-MAC 的节点状态转换

HM-MAC 节点状态转换如图 2 所示. 节点  $S$  首先处于空闲状态 I (idleness), 然后进入一般等待状态 G (general waiting), 然后等待中断发生. 中断主要包括 4 种类型, 其类型的具体响应过程及节点状态转移如图 2 所示.

在图 2 中, 4 种类型的中断如下所示.

1) 当路由层下发报文时:

① 如果是 UM, 则  $S$  创建一个 RTS, 然后把 UM 转化为多个单播数据包 (unicast packet, UP). 按照 RTS 在前, 多个 UP 在后, 放入发送队列  $Q$  (Queue);

② 如果是 BM, 则把 BM 转化为多个广播包 (broadcast packet, BP), 放入发送队列  $Q$ ;

③ 返回状态 G.

2) 当发送中断到达时, 如果  $Q$  为空, 则返回状态 G; 如果  $Q$  不为空, 则取出一个包:

① 对于 UP, 如果是 RTS, 则把当前  $NT$  放入 RTS 然后发送; 如果是 DATA 且  $S$  在 DC 上, 则发送该包; 如果是 DATA 且  $R$  在 CC 上, 则发送该包, 而如果  $R$  不在 CC 上,  $S$  退避一段时间再试;

② 对于 BP, 如果最优发送时刻是当前时刻, 则立即发送; 否则设定定时器 1, 延时发送 BP;

③ 返回状态 G.

3) 当定时器 1 中断到达时发送 BP, 然后返回状态 G.

4) 当接收一个包后:

① 如果该包是 BP, 则直接传递给路由层;

② 如果该包是 UP 且目的地址不是自身的地

址,则更新  $NT$  和  $CST$ ; 如果是自身的地址,则根据 UP 类型进行处理,主要分 4 种情况:

- (i) 如果 UP 是 DATA,则传递给路由层;
- (ii) 如果 UP 是 RTS,则根据其中的  $NT$  计算是否与源节点有相同的空闲 DC,如果有相同的空闲 DC 则创建 CTS,发送 DC 序号  $n$  和报文长度  $l$  回

源节点,如果没有,则丢弃该包;

- (iii) 如果 UP 是 CTS,则创建 SRTS 把 CTS 中 DC 序号  $n$  和长度  $l$  发送回目的节点,然后切换到  $n$  号 DC 上;
  - (iv) 如果 UP 是 SRTS,则切换到  $n$  号 DC 上.
- ③ 返回状态 G.

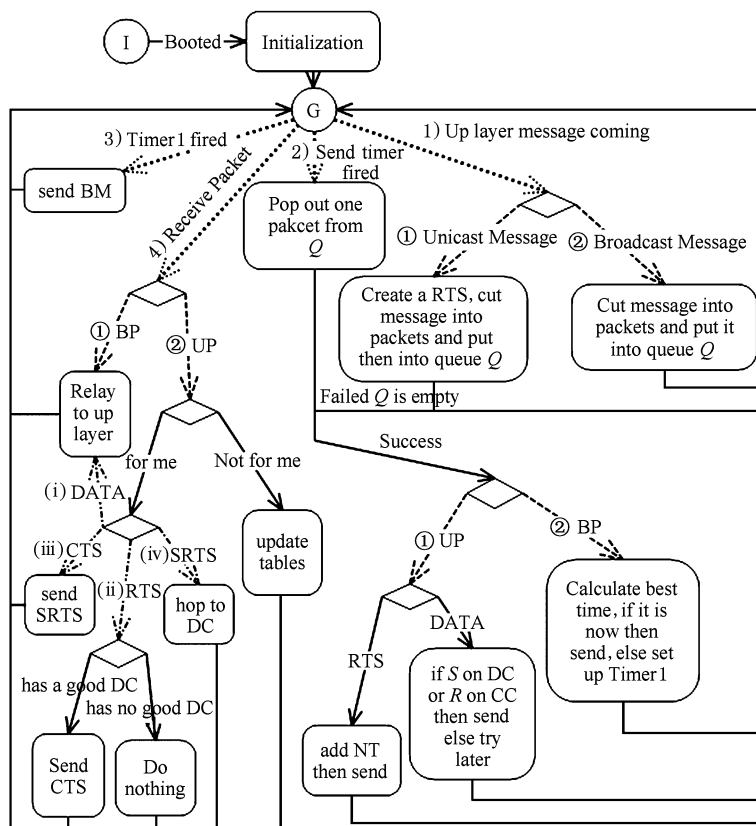


Fig. 2 Node state transition diagram.

图 2 节点状态转换图

### 3 HM-MAC 的性能分析

本节将对 HM-MAC 进行理论分析. 为了便于分析,本文作出下列 2 个假设: 1) 只考虑广播发送节点  $S$  一跳范围内的节点,它们组成网络  $A$ ,  $A$  内有  $N$  个节点. 2) 时间被划分为多个时槽,其长度为节点发送一个数据包的时间  $T$ . 为方便理论分析,本节设信道切换时间等于  $T$ .

#### 3.1 占用信道数目

在基于节点 (node-based) 分配信道的 MAC 协议中,  $N$  个节点固定占用  $N$  个信道,而网络最多利用  $N/2$  个信道 (设  $N$  为偶数,奇数同理),这就产生了很大的浪费. 而 HM-MAC 最多占用  $N/2 + 1$  个信道,所以 HM-MAC 占用的信道较少且信道利用

率高.

HM-MAC 占用的信道数的上界为  $N/2 + 1$  ( $N/2$  个 DC, 1 个 CC), 下界为 1 (1 个 CC). 下文主要利用排队论,讨论 HM-MAC 协议所占用的 DC 数  $k$  的平均值.

规定网络  $A$  内 (即全网) 所有节点的路由层 (routing layer, RL) 为从 RL 到达 MAC 层 (mac layer, ML) 的单播报文 (UM) 向 ML 付费. 设  $\lambda_M$  等于网络  $A$  的 ML 赚钱的平均速率,即  $N$  个节点的 ML 赚钱的平均速率之和; 设  $C$  等于网络  $A$  的 RL 为达到 ML 的每个 UM 向 ML 所付的平均金额; 而  $\lambda$  为网络  $A$  的 RL 的 UM 到达 ML 的平均到达速率,即  $N$  个节点 UM 的平均到达速率之和.

引理 1. 在长程意义下:

$$\lambda_M = \lambda \times C. \tag{1}$$

证明. 当  $t$  较大且为一个常数时, 有两种方法可以计算到  $t$  为止网络  $A$  的 ML 赚到的平均金额  $m$ . 一方面可以近似地由网络  $A$  的 ML 赚钱的平均速率  $\lambda_M$  乘以时间  $t$  得到, 即  $m = \lambda_M \times t$ ; 另一方面可以利用网络  $A$  的 RL 为每个 UM 平均支付的金额  $C$ , 乘以到时间  $t$  为止进入网络  $A$  的 ML 的平均 UM 数目计算, 而平均 UM 数目近似等于  $\lambda \times t$ , 从而  $m = \lambda \times t \times C$ . 所以式(1)两边同时乘以  $t$  近似等于到时间  $t$  为止 ML 赚到的平均金额  $m$ . 当  $t$  趋于无穷时, 式(1)成立. 证毕.

下面利用引理 1 推导出在长程意义下, 协议所占用的 DC 数  $k$  的均值. 假设一个路由层 UM(单播报文)可以分为多个 MAC 层 UP(单播包)且 UP 的个数  $z$  服从参数为  $p$  的几何分布.

**定理 1.** 在长程意义下:

$$k = \lambda \times (1/p). \quad (2)$$

证明. 设每个 UM 在 ML 期间, 只有在接受某个 DC 传输服务时, RL 才向 ML 每单位时间  $T$  付 1 元, 即发送一个 UP, RL 付 1 元. 那么 ML 赚钱的平均速率  $\lambda_M$  等于正在 DC 上传输的 UM 的个数, 即占用的 DC 数  $k$ ; 网络  $A$  的 RL 为每个 UM 平均支付的金额  $C$  等于平均每个 UM 转换成 UP 的个数  $z$ . 而  $z$  服从参数为  $p$  的几何分布, 所以  $z$  的期望为  $1/p$ . 根据引理 1,  $\lambda_M = \lambda \times C$ . 在此付费规则下  $\lambda_M = k$ ,  $C = 1/p$ , 而  $\lambda$  与付费规则无关,  $\lambda$  不变, 所以式(2)得证. 证毕.

基于节点分配信道的 MAC 协议占用信道数固定且数目为  $N$  个, 而 HM-MAC 最多占用  $N/2 + 1$  个信道, 最少占用 1 个信道, 平均占用  $\lambda \times (1/p) + 1$  个信道.

### 3.2 多信道隐终端数目

在基于节点分配信道的 MAC 协议中, 其信道预约机制大都是在目的节点  $R$  的私有信道上进行. 如果假设  $R$  的邻居也是  $N - 1$  个, 除了与其进行握手的源节点  $S$  以外,  $R$  一跳范围内的其他邻居节点都是其多信道隐终端. 设其多信道隐终端的个数为  $h_1$ , 那么  $h_1 = N - 2$ , 即除去  $S$  的所有邻居数. 而 HM-MAC 的预约机制在公共信道 CC 上进行,  $R$  所有在 CC 上的邻居都可以监听到其预约信息. 当  $S$  向  $R$  在 CC 上发送握手信息时,  $R$  在 CC 上的邻居数  $NNC$ (neighbor number on CC, 包括  $S$ ) 总是大于等于 1. 所以如果设 HM-MAC 中节点的多信道隐终端的个数为  $h_2$ , 则  $h_2$  加  $NNC$  等于  $R$  两跳内所有节点数即  $N - 1$ . 因为  $NNC \geq 1$ , 所以  $h_2 \leq N - 2$ . 从而  $h_2$  总是小于等于  $h_1$ .

设  $h_1$  和  $h_2$  的差值为  $h$ , 则  $h$  是 HM-MAC 协议与传统协议相比多信道隐终端数目的减少值, 而  $h = h_1 - h_2 = N - 2 - h_2 = N - 1 - h_2 - 1 = NNC - 1$ , 即所有  $NNC$  减去  $S$ . 所以当  $NNC$  较大时, 即  $R$  在 CC 上的邻居节点较多时, HM-MAC 的多信道隐终端数目大量减少.

### 3.3 广播效率

设广播接收率(broadcast reception ratio,  $BRR$ )为发送节点  $S$  一跳范围内的接收节点数, 除以  $S$  一跳范围内总节点数. 设广播包发送数(broadcast send number,  $BSN$ )为同一个广播包重复发送的次数. 设平均接收时延(average delay,  $AD$ )为从广播包到达发送节点  $S$  的 MAC 层开始, 到可以接收的节点接收完毕时, 所有节点的平均时延, 该值用时槽  $T$  的倍数衡量.

**定义 1.** 广播效率(broadcast efficiency,  $BE$ ). 广播效率定义为广播接收率与广播包发送数的比值.

$$BE = \frac{BRR}{BSN}. \quad (3)$$

设当  $S$  要广播时, 有  $k$  对节点在  $k$  个 DC 上进行通信, 且没有节点和  $S$  在 CC 上竞争. 现存基于竞争的单 Radio 多信道 MAC 协议普遍使用以下 3 种方式: 1) 把广播变为多个单播(broadcast to unicast, BTU); 2) 一旦节点有 BM 到达, 立即在 CC 上广播一次(broadcast on CC one, BCO); 3) 一旦节点有 BM 到达, 立即在 CC 广播一次, 然后在所有被占用的 DC 上再依次广播一次(broadcast on CC one and DC  $K$ , BCO $DK$ ). 为方便分析, 设 BM(广播报文)长度为 1 个 BP(广播包), 即 BP 的个数等于 BM 的个数.

#### 3.3.1 BTU 机制分析

在 BTU 机制中,  $S$  将一个广播转换为  $N - 1$  个不同目的地址的单播, 则  $BRR = 1$ ; 由于各种协议预约机制不同, 所以在此作出一个简要的分析,  $BSN \geq N - 1$ ;  $AD \geq N$ . 根据式(3),  $BE \leq 1/(N - 1)$ .

#### 3.3.2 BCO 机制分析

在 BCO 机制中, 当有 BM 到达时,  $S$  直接在 CC 上广播一次. 而 CC 上的节点数等于  $N - 2k$ , 所以  $BRR = (N - 2k)/N$ ;  $BSN = 1$ ;  $AD = 1$ . 根据式(3),  $BE = (N - 2k)/N$ .

#### 3.3.3 BCO $DK$ 机制分析

在该机制中,  $S$  首先在 CC 上广播一次, 然后依次在每个被占用的 DC 上再广播一次,  $BSN = 1 + k$ . 为方便推导, 设从 DC 上回到 CC 上的节点不会在

广播过程中再次进入 DC.

S 首先在 CC 上广播一次后, 接收到的节点为  $N-2k$  个. 如果设  $E$  为 S 在  $k$  个 DC 上依次进行广播时收到 BP 的总节点数的期望, 那么

$$E = \frac{2(1-p)(1-(1-p)^k)}{p}, \quad (4)$$

其中  $p$  为 UP 个数服从几何分布的参数,  $k$  为 DC 数. 通过式(4),

$$BRR = (N-2k+E)/N. \quad (5)$$

因为 CC 上的  $N-2k$  个节点的平均时延都等于 1. 而当 S 在 DC 上第  $i$  次广播 BP 后, 收到 BP 的节点的时延为  $2i+1$ , 所以

$$AD = [(N-2k) \times 1 + \sum_{i=1}^k 2 \times (1-p)^i (2i+1)] / (N \times BRR). \quad (6)$$

根据式(3),  $BE = BRR / (k+1)$ .

### 3.3.4 BCOL 机制分析

HM-MAC 针对 WSN 中最关键的制约因素——能量, 提出一种广播机制, 该机制的主要思想是发送节点通过计算接收节点数目的期望, 选择一个时刻在 CC 上发送广播包, 即延时广播一次 (broadcast on CC one later, BCOL), 从而提高广播效率. 当 BM 到达 S 时, 如果有  $k$  个 UM 在  $k$  个 DC 上传输, 那么节点 S 已经记录了  $k$  个时刻, 每个时刻对应着  $k$  个 UM 传输结束的时间. 每个时刻对应一对节点完成数据传输从 DC 回到 CC. S 首先进行期望计算, 然后以能量有效为目标选择一个最佳时间发送 BP.

假设时刻  $T_0$  BM 到达,  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , 为  $k$  个 UM 结束的时间, 即每个时刻都有一对节点回到 CC. 如果设每个节点 UM 到达过程服从参数为  $\lambda$  泊松到达过程且所有节点之间相互独立, 那么网络 A 内所有节点 UM 到达的过程服从参数为  $\lambda = N\lambda$  泊松到达过程.

时刻  $T_i$  在 CC 上的节点数的期望

$$E_{T_i} = E_{T_0} + 2NBN_i - 2NL_i. \quad (7)$$

$E_{T_0}$  为在 BM 到达时刻即时刻  $T_0$  在 CC 上的节点数.  $NBN_i$  (number of back node until  $T_i$ ) 为从  $T_0$  到  $T_i$  期间因为数据传输结束而回到 CC 上的节点对的数目.  $NL_i$  (number of lost node) 为从  $T_0$  到  $T_i$  期间由 CC 上切换到 DC 上的节点对数目的期望, 其包括两部分: 1) 时刻  $T_0$  在 CC 上, 但是之后离开 CC 进入 DC 且在时刻  $T_i$  还没有回到 CC 上的节点对数目的期望  $OLNT_i$  (original lost node until  $T_i$ ); 2)

时刻  $T_0$  不在 CC 上, 但是回到 CC 后又经过预约再次进入 DC, 并且在  $T_i$  时刻还没有回到 CC 上的节点对数目的期望  $ALNT_i$  (additional lost node until  $T_i$ ), 设  $ALNT_0 = 0$ .

由定义可知,  $E_{T_0} = N-2k$ ,  $NBN_i = 2i$ . 由于  $NL_i$  的上界对协议性能有很大影响, 所以本节推导  $NL_i$  的上界. 设所有 UM 都涉及不同的节点且忽略预约 DC 的过程.

设  $T_0 = 0$ , 令  $E[OLNT_i]$  为  $OLNT_i$  期望, 则

$$E[OLNT_i] = \lambda \int_0^{T_i} Q(T_i - S) dS. \quad (8)$$

$Q(T_i - S)$  为事件“UM 在时刻 S 到达而它的传输时间却大于  $T_i - S$ ”发生的概率. 所以,  $Q(T_i - S) = (1-p)^{T_i - S}$ . 根据式(8)可得:

$$E[OLNT_i] = (N-2k-1)\lambda_i \times \frac{(1-p)^{T_i} - 1}{\ln(1-p)}. \quad (9)$$

$$E[ALNT_i] = 2\lambda_i \times \frac{\sum_{j=1}^{i-1} [(1-p)^{T_i - T_j} - 1]}{\ln(1-p)}. \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可得:

$$NL_i = \frac{\lambda_i}{\ln(1-p)} \times \{ (N-2k-1) \times [(1-p)^{T_i} - 1] + 2 \sum_{j=1}^{i-1} [(1-p)^{T_i - T_j} - 1] \}. \quad (11)$$

如果  $E_{T_b} = \max_{T_1 \leq TX \leq T_k} \{E_{TX}\}$  且  $E_{T_b} > E_{T_0}$ , 那么 AD 为  $T_b - T_0$ .  $BRR = (N-2k+2b-NL_b)/N$ ;  $BSN = 1$ ;  $BE = BRR$ .

### 3.3.5 多信道广播机制性能比较

从以上的分析可以看出 BCOL 广播机制性能比其他机制有较大提高. BCOL 与 BTU 相比, 虽然 BRR 小, 但是 BSN 减少, AD 且 BE 提高; 与 BCO 相比, BSN 相同, AD 有所增加, 但是 BRR 提高, 所以 BE 提高; 与 BCODK 相比, AD 较小, BSN 减少且 BE 提高.

## 4 实验与分析

本节对 HM-MAC 进行模拟实验, 进一步验证其性能.

### 4.1 网络吞吐量实验分析

本小节系统参数设置如下: 系统为  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  网络; 节点数为 289 且均匀分布; 通信模式为随机

选择一跳内的任一节点进行单播; 数据负载长度为 32 B; 传输比特率为 250 Kbps; 传输半径为 40 m.

本文将 HM-MAC 与 MMSN 和单信道 CSMA 进行对比, 结果如图 3 所示. 由于 HM-MAC 至少需要 1 个 CC 和 1 个 DC, 所以当信道总数等于 1 时 HM-MAC 无实验结果.

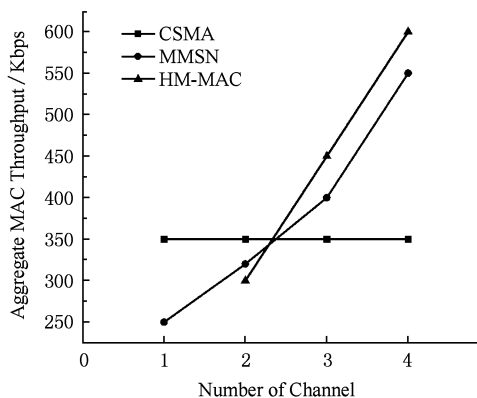


Fig. 3 Analysis of throughput.

图 3 吞吐量分析

从图 3 可以看出: 1) 当信道数为 2 时, MMSN 和 CSMA 协议的吞吐量好于 HM-MAC. 这主要是由于在 DC 只有 1 个的情况下, HM-MAC 中多对节点同时利用 3 次握手机制预约 1 个 DC, 从而造成较多冲突, 使吞吐量下降. 2) 当信道数较多时, HM-MAC 的吞吐量要好于 MMSN 和 CSMA, 主要原因是当信道较多时, 隐终端问题较为严重, HM-MAC 在 CC 上的 3 次握手机制缓解了隐终端问题.

#### 4.2 广播效率实验分析

本小节考察两种效率较高的广播机制 BCO 和 BCOL. 实验模型设置如下: 网络是以节点 S 为圆心, 传输距离 R 为半径的圆形; S 一跳范围内的节点均匀分布; 单跳节点数 N 为 10, 其他参数同上节. 设广播接收率增益  $G(\text{gain})$  为 BCOL 的 BRR 减去 BCO 的 BRR, 即延迟广播后 BRR 的增益, 则有 4 个参数影响  $G$ , 即 DC 占用数  $k$ , UM 长度  $1/p$ , UM 到达率  $r$ , 通信节点对回到 CC 的时间间隔长度  $ITL$ .

当  $k=4$  且  $ITL=100\text{ms}$  时, 针对不同的  $r$  和  $1/p$ ,  $G$  的变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出: 1) 当  $p$  不变而  $r$  逐渐增大时,  $G$  逐渐降低. 这是因为当每个节点的  $r$  都增大时, 在 CC 上的所有节点总的 UM 到达率也增大, 从而在单位时间内将会有更多的节点切换到 DC 上, 所以  $G$  会随着  $r$  的增加而减少. 2) 当

$r$  不变而  $p$  增大时,  $G$  逐渐增加. 这是因为当  $p$  增大时 UM 长度减小, 每对节点返回 CC 的速度加快, 从而导致 BCOL 具有更高的广播接收率, 所以  $G$  增加.

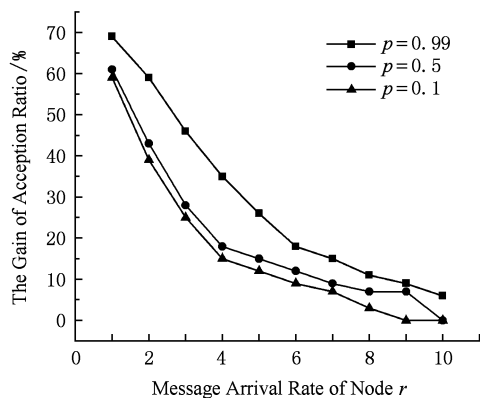


Fig. 4 Analysis of gain (1).

图 4 接收率增益分析(1)

当  $p=0.5$  且  $r=5$  时, 针对不同的  $ITL$  和  $k$ ,  $G$  变化趋势如图 5 所示. 从图 5 可以看出: 1) 当  $k$  不变而  $ITL$  逐渐增加时, 在该时间内切换到 DC 上的节点逐渐增加, 所以  $G$  逐渐减少. 2) 当  $ITL$  不变而  $k$  减少时, 即通信节点对数目减少时, 在 CC 上的节点数增加, 因此 CC 上所有节点总 UM 到达率增加, 所以有更多的节点切换到 DC 上, 所以  $G$  逐渐减少.

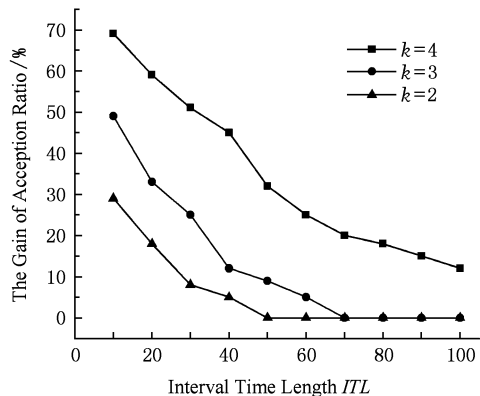


Fig. 5 Analysis of gain (2).

图 5 接收率增益分析(2)

## 5 结 论

针对现存多信道 MAC 协议存在的问题, 本文提出了一种基于竞争的多信道 MAC 协议——HM-MAC. 该协议无需全网时间同步, 通过动态预约技术降低了正交信道占用量, 利用握手机制减少了多信道隐终端数目, 同时, HM-MAC 采用基于概率的

广播发送者协调机制, 减少了广播数据丢失, 提高了广播效率. 本文在理论上分析了单播机制中所用信道数目、多信道隐终端数目以及广播机制中广播效率等性能参数. 实验结果表明: HM-MAC 可以有效地解决多信道隐终端数目较多的问题, 显著地提高了广播效率和网络吞吐量.

## 参 考 文 献

- [1] Li Jianzhong, Gao Hong. Survey on sensor network research [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 1-15 (in Chinese)  
(李建中, 高宏. 无线传感网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15)
- [2] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network [C] //Proc of IEEE INFOCOM'02. Washington: IEEE, 2002: 1567-1576
- [3] Zhou G, Huang C, Yan T, et al. MMSN: Multi-frequency media access control for wireless sensor network [C] //Proc of IEEE INFOCOM'06. Washington: IEEE, 2006: 1-13
- [4] Mastrooreh S, Soroush H, Kalis A, et al. HyMAC: Hybrid TDMA/FDMA medium access control protocol for wireless sensor network [C] //Proc of IEEE PIMRC'07. Washington: IEEE, 2007: 1-5
- [5] Jovanovic M D, Djordjevic G L. TFMAC: Multi-channel MAC protocol for wireless sensor network [C] //Proc of IEEE ELSIKS'07. Washington: IEEE, 2007: 23-26
- [6] Youngmin K, Hyojeong S, Hojung C. Y-MAC: An energy-efficient multi-channel MAC protocol for dense wireless sensor network [C] //Proc of ACM IPSN'08. New York: ACM, 2008: 53-63
- [7] Hoi-Sheung S, Jean W, Jeonghoon M. McMAC: A parallel rendezvous multi-channel MAC protocol [C] //Proc of IEEE WCNC'07. Washington: IEEE, 2007: 334-339
- [8] Hieu K L, Dan H, Tarek A. A practical multi-channel media access control protocol for wireless sensor network [C] //Proc of ACM IPSN'08. New York: ACM, 2008: 70-81
- [9] Yafeng W, John S, Tian He, et al. Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor network [C] //Proc of IEEE INFOCOM'08. Washington: IEEE, 2008: 1193-1201

## Research Background

Emerging as one of the dominant technology trends, WSN have a wide range of potential applications. Being an essential layer of the communication stack, the media access control (MAC) layer sits on top of the physical layer and controls radio. Therefore, MAC protocols are responsible for coordinating the access between nodes and wireless medium. In response to the problems of current multi-channel MAC protocols, we propose an asynchronous contention-based multi-channel MAC protocol, called HM-MAC, for WSN. HM-MAC works without time synchronization uses few orthogonal channels and takes advantage



**Zhang Desheng**, born in 1985. Since 2008, he has been a master candidate in the School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, China. Student member of China Computer Federation. His current

research interests include WSN and mobile computing.

张德升, 1985年生, 硕士研究生, 中国计算机学会学生会员, 主要研究方向为无线传感器网络与移动计算.



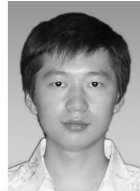
**Li Jinbao**, born in 1969. He is a professor of Heilongjiang University. Member of China Computer Federation. His main research interests are WSN, database principles, mobile computing and parallel computing.

李金宝, 1969年生, 教授, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为无线传感器网络、数据库原理、移动计算和并行计算.



**Guo Longjiang**, born in 1973. He is a professor of Heilongjiang University. Member of China Computer Federation. His main research interests are WSN and data mining.

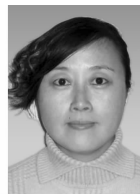
郭龙江, 1973年生, 教授, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为无线传感器网络和数据挖掘.



**Ji Shouling**, born in 1986. Since 2007, he has been a master candidate in the School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, China. Student member of China Computer Federation. His current research interests include

WSN and database principles.

纪守领, 1986年生, 硕士研究生, 中国计算机学会学生会员, 主要研究方向为无线传感器网络与数据库原理.



**Wang Yu**, born in 1973. She is a lecturer of Heilongjiang University. Her main research interests are CAD and WSN.

王宇, 1973年生, 讲师, 主要研究方向为计算机辅助设计和传感器网络.



of handshake mechanism to reduce the number of multi-channel hidden terminals. Meanwhile, HM-MAC employs the probability-based sender adjustment mechanism to tackle the problem of the loss of broadcasting data and to improve broadcast reliability. In the future, for the considerable overhead and complexity that time synchronization incurs, the asynchronous MAC protocols are promising. We focus on MAC protocol in this paper and leave sophisticated channel selection scheme as a future work. Moreover, under the current multi-channel MAC protocols, all idle nodes are required to overhear the channel, so the sleeping scheme, i. e., duty cycling, is not considered in the present study. We are going to investigate this problem in our future work too. Our work is supported by the National Natural Science Foundation of China for Young Scholar.

## 第 12 届中国机器学习会议征文通知

2010 年 8 月 6—8 日 济南

### The 12th China Conference on Machine Learning

August 6—8, 2010, Jinan

第 12 届中国机器学习会议(CCML2010)由中国人工智能学会机器学习专业委员会和中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会联合主办,山东大学承办,河北大学协办.该系列会议每两年举行一次,现已成为国内机器学习界最主要的学术活动.此次会议将为机器学习及相关研究领域的学者交流最新研究成果、进行广泛的学术讨论提供便利,并且将邀请国内机器学习领域的著名学者做精彩报告.

#### 征稿范围(征求但不限于如下主题)

- |                    |              |                  |
|--------------------|--------------|------------------|
| • 机器学习的新理论、新技术与新应用 | • 人类学习的计算模型  | • 计算学习理论         |
| • 监督学习             | • 非监督学习      | • 半监督学习          |
| • 强化学习             | • 多示例学习      | • 神经网络           |
| • 集成学习             | • 多策略学习      | • 特征选择           |
| • 流形学习与降维          | • 基于案例的推理    | • 增量学习与在线学习      |
| • 对复杂结构数据的学习       | • 增强学习系统可理解性 | • 数据挖掘与知识发现      |
| • 聚类               | • 生物特征识别     | • 进化计算           |
| • 人工生命             | • 模糊集与粗糙集    | • 多 Agent 系统中的学习 |
| • 模式识别             | • 信息检索       | • 生物信息学          |
| • 语音、图像处理与理解       | • 自然语言理解     |                  |

#### 投稿要求

- 论文必须未公开发表过,一般不超过 6000 字;只接受中文稿;
- 论文应包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键字、正文和参考文献;另附作者通讯地址、邮编、电话或传真及 E-mail 地址;
- 参选优秀学位论文的稿件请注明(须由在校博士生、硕士生或本科生为第一作者,在稿件最后注明“参选优秀学位论文”字样);
- 本会议采用在线投稿方式,网址为:<http://ccml2010.sdu.edu.cn>;
- 会议咨询电话:0531-88391367, 邮件地址:ccml2010@sdu.edu.cn.

#### 重要日期

征文截止日期:2010 年 1 月 20 日;录用通知日期:2010 年 4 月 15 日;会议召开日期:2010 年 8 月 6—8 日

#### 论文出版

会议录用论文将被推荐到《计算机研究与发展》、《模式识别与人工智能》、《山东大学学报》(工学版)、《计算机工程与应用》、《广西师范大学学报》、《广西大学学报》等期刊的正刊上发表.会议还将评选优秀论文奖与优秀学位论文奖,并颁发证书和奖品.