

无线传感器网络环境下基于事件驱动应用的节能 TDMA 协议

龚海刚¹, 刘 明¹, 余昌远², 王晓敏¹, 陈力军³

(1. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川成都 610054;

2. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084;

3. 南京大学计算机软件与新技术国家重点实验室, 江苏南京 210093)

摘 要: 媒质接入控制是无线传感器网络设计的关键问题之一. 由于媒质接入控制协议直接控制着节点无线通信模块的活动, 而无线通信模块是传感器节点能量消耗的主要来源, 因此 MAC 协议节能效率的好坏将严重影响网络的性能. 基于 TDMA 的 MAC 协议具有固有的节能特性, 即通过合理的 TDMA 调度避免传输碰撞以及减少节点空闲监听的时间. 本文提出了 ED-TDMA 协议, 一种面向事件驱动的传感器网络应用的 TDMA 协议. 该协议根据当前源节点的数目动态地改变 TDMA 帧的长度, 提高了信道利用率; 同时采用位图方式的 TDMA 调度, 极大地减少了 TDMA 调度的开销, 节约了能量. 此外, 通过引入簇内覆盖的思想, 使得簇内的活动节点数目为一常数, 同时减少了工作节点的数目, 从而延长网络的生命周期, 并在一定程度上提高了系统的可伸缩性. 实验结果显示, ED-TDMA 协议更适用于网络负载较低、节点密度高的无线传感器网络.

关键词: 无线传感器网络; 媒质接入控制; 时分复用; 事件驱动; 簇内覆盖

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 10-1843-06

An Energy-Efficient Event Driven TDMA Protocol for Wireless Sensor Network

GONG Hai-gang¹, LIU Ming¹, YU Chang-yuan², WANG Xiao-min¹, CHEN Li-jun³

(1. College of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: One of the key problems for Wireless Sensor Network (WSN) is the design of Medium Access Control (MAC) protocol. MAC protocol controls the activity of wireless communication module of sensor nodes, which is the major consumer of sensor energy. The energy efficiency of MAC protocol makes a strong impact on the network performance. TDMA based MAC protocol is inherently collision free, and can rule out idle listening since nodes know when to transmit. In this paper, we present ED-TDMA, an event driven TDMA protocol for wireless sensor network. ED-TDMA improves channel utility by changing the length of TDMA frame according to the number of source nodes, while saving energy with bitmap assisted TDMA schedule. In addition, ED-TDMA employs intra cluster coverage to prolong network lifetime and to improve system scalability. Simulation results show that ED-TDMA performs better for wireless sensor network with high density deployment and low traffic.

Key words: wireless sensor networks; media access control; TDMA; event driven; intra cluster coverage

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)由大量廉价的、低功率的无线传感器组织而成的无线网络, 传感器节点之间能够协作地监测、感应其网络覆盖区域内的多种环境信息并传送到远处的基站进行处理. 无线传感器网络具有广泛的应用场景, 可以应用于国防军事、工

业控制、环境监测、交通管理等领域, 因此引起了各国军事部门、工业界和学术机构的极大关注^[1, 2].

然而在多数应用中, 传感器节点的能量无法得到补充(如被部署在敌后或者环境恶劣的地区), 这使得如何有效利用能源, 延长网络的工作寿命成为设计上需要考虑的关键因素之一. 目前大量的研究工作集中在如何有效使用有限的能量以延长传感器网络的寿命^[3~6].

在传感器节点中,无线通信模块被认为是传感器节点中能量消耗的主要所在^[2],而由于媒质接入控制(Medium Access Control, MAC)子层直接与物理层接口,即 MAC 协议直接控制着无线通信模块的活动,因此 MAC 协议的节能效率的好坏将严重影响网络的生命周期. MAC 协议的研究包括基于竞争的 MAC 协议和基于 TDMA 的 MAC 协议两类,其中基于 TDMA 的 MAC 协议调度节点在不同时隙内收发数据,避免了与邻居节点发生碰撞;同时,节点仅在其分配的时隙内打开无线收发器,进行可能的通信,大大减少了空闲监听的时间,因此 TDMA 协议具有内在的节能特性,从而得到了广泛的关注. 传统的 TDMA 调度仅适用于连续数据收集的网络应用,如温度、湿度地连续监控等. 由于传感器始终有数据需要传送,因此 TDMA 调度可以获得较高的信道利用率. 但是对于无线传感器网络中的另一类典型应用——基于事件驱动的应用,如地震监控、火灾预警、目标跟踪等应用中存在一定局限. 此时,传感器仅在某些特定的事件发生时才有数据需要传输(定义有数据需要传输的节点为源节点),而传统的 TDMA 协议不适合此类应用,存在着带宽利用率低,能量浪费大的缺点.

本文提出了 ED-TDMA 协议,一种面向事件驱动的传感器网络应用的 TDMA 协议. 该协议根据当前源节点的数目动态地改变 TDMA 帧的长度,提高了信道利用率;同时采用位图方式的 TDMA 调度,极大地减少了 TDMA 调度的开销,节约了能量. 此外,通过引入簇内覆盖的思想,使得簇内活动节点为一常数,同时减少了工作节点的数目,从而延长网络的生命周期,并在一定程度上提高了系统的可伸缩性.

2 问题描述

为了提高系统的可伸缩性,TDMA 协议通常和成簇(clustering)的管理方式相结合,如比较典型的 LEACH 协议^[7]和 HEED 协议^[8],都是先将网络划分为若干个簇,簇头节点做为集中控制点,对簇内成员进行 TDMA 调度(时隙分配),各簇内成员在其分配的时隙内将数据发送到簇头. 基于簇的 TDMA 协议适用于大规模部署的无线传感器网络,能够自组织地进行网络管理,因此极大地提高了系统的可伸缩性. LEACH 和 HEED 都是按轮(round)运行的数据收集协议,两者通过成簇管理并结合传统的 TDMA 调度,其帧结构如图 1 所示. 每轮包含一个 setup 阶段和稳定阶段. 设置阶段选举若干簇头,形成多个独立的簇. 稳定阶段首先由簇头将 TDMA 时隙分配给簇内成员,每轮只需调度分配一次. 紧接着是 n 个长度相等的帧,每帧对应一个 data cycle,即对簇内成员的一次数据收集. 由于簇头节点负责接收转发成员的

数据,能量消耗较大,因此在 n 帧之后进入下一轮,重新进行成簇、调度等工作,由其他能量充足的节点来充当簇头节点.

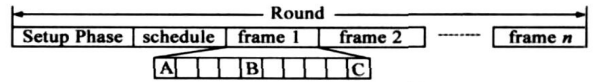


图 1 传统 TDMA 的帧结构

显然,若节点始终有数据传输(连续数据收集的网络应用),传统的 TDMA 调度是非常有效的. 但是对于基于事件驱动的网络应用,则存在以下缺点: (1) 信道利用率低. 如图 1 所示,若仅有少数节点需要传输数据,在每一帧中将存在不少空的时隙,如节点 A, B, C 分别在第 1, 5, 10 时隙传送数据,则有 7 个时隙是空的,浪费了带宽; (2) 簇头节点能量的无谓浪费. 由于簇头节点不知道哪些成员在此帧发送数据,因此即使没有任何节点需要传送数据,簇头节点在整个帧长内仍必须始终保持监听状态,从而造成了能量的浪费.

BMA 协议^[11]改进了传统的 TDMA 协议,即在每帧开始时有一个竞争阶段,当传感器节点有需要传输数据的节点向簇头发送 1 个比特的控制消息预定时隙,这样簇头节点知道在当前帧内有哪些节点需要传送数据,并给这些节点分配时隙. 在这些节点传送完数据后,簇头节点可以进入睡眠,并在下一帧开始时苏醒. 由于簇头节点无需在整个帧长保持激活,因此极大地节约了簇头节点的能量. 然而,在 BMA 协议中,其 TDMA 帧的长度仍然是固定的,因此与传统的 TDMA 协议相比,其信道利用率并没有得到提高. 此外,由于每一帧的数据传输之前,都需要进行一次 TDMA 调度,即簇头节点需要广播一次 TDMA 调度消息,该消息包含簇内成员的节点 ID 和分配给该节点的时隙号,因此 TDMA 调度的开销较大,尤其是当成员较多时,广播和接收此调度消息所消耗的能量是比较可观的.

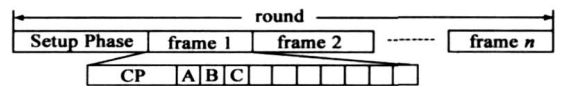


图 2 BMA 协议的帧结构

而 ED-TDMA 协议则通过长度不等的帧长提高网络的信道利用率,并通过位图方式的 TDMA 调度极大地减少了 TDMA 调度开销,减少了能量的消耗,同时通过引入簇内覆盖的思想,进一步优化了系统性能.

3 ED-TDMA 协议描述

3.1 基本协议

与 HEED、BMA 协议相同,ED-TDMA 按轮运行. 每轮同样包括设置阶段和稳定阶段,如图 3 所示. 设置阶段主要完成时钟同步和成簇的工作,将网络中的节点以簇的方式进行组织管理. 稳定阶段由 n 个长度不等的

帧组成, 每帧对应一次簇内的数据收集, 由预定、调度和传输三个阶段组成。

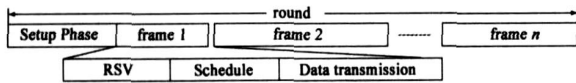


图 3 ED-TDMA 协议帧结构

预定阶段由 m 个 mini slot 组成, m 为簇内成员的数目, 成员节点根据其 ID 大小而顺序占用此 m 个 mini slot (在设置阶段成员节点可以知道本簇其他成员节点的 ID 大小)。若节点检测到某事件发生 (即有数据需要传送时), 将在其 mini slot 内向簇头节点发送 RSV 消息预定时隙, 如同 BMA 协议, RSV 消息可以仅为 1 位, 则预定阶段的长度为发送 m 比特数据的时间。由于各成员在不同的 mini slot 内向簇头节点发送 RSV 消息, 因此不存在碰撞的现象。

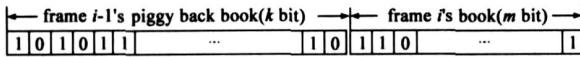


图 4 TDMA 调度数据包

在调度阶段, 簇头节点根据预定阶段中成功收到的 RSV 消息, 广播一个 TDMA 调度数据包。数据包的格式为一个位图序列, 如图 4 所示。该序列由二部分组成, 第一部分为前一帧的捎带 (piggybacking) 预定, 其长度为 k 位; 第二部分为当前帧的预定结果, 其长度为 m 位。 k 的值是不断变化的, 在每轮数据收集的第一帧, k 为 0。此后, k 为前一帧传输阶段总的时隙数, 即源节点的数目, 且有 $0 \leq k \leq m$ 。在调度序列中, 1 表示该位对应的源节点预定了时隙, 0 则反之。各源节点在本帧预定的时隙号是由本节点的对应位在调度包序列中的次序决定的。若源节点在本帧的第 i 个 mini slot 预定了时隙, 其对应的位为调度包序列后 m 位中的第 i 位。若源节点在前一帧通过捎带在本帧预定了时隙, 假定其在前一帧的时隙号为 j , 即在第 j 个数据时隙传送数据, 则其对应的位为调度序列前 k 位中的第 j 位。各源节点根据序列中本节点对应位之前子序列中 1 的个数确定为本节点在本帧的时隙号 (计算 1 的个数时包含本节点的对应位)。显然, 调度序列中 1 的个数表明本帧数据传输的总的时隙数。簇内所有节点由调度序列中获得本帧的时隙数 k , 并在 k 个数据时隙后, 进入下一帧的预定阶段。当网络负载较小时, 如只有 2、3 个节点有数据需要传输, 此时帧的长度较短, 将引起频繁的预定和调度开销, 因此定义一个默认的最小帧长为 $T_{frame\ min}$ 个时隙, 即当前帧长如果小于此最小帧长 $T_{frame\ min}$ 时, 则当前帧长设置为 $T_{frame\ min}$ 。

举例说明, 假定 A, B, C, D 四个源节点分别第 1 帧的第 1, 2, 4 和 m 个 mini slot 向簇头节点发送 RSV 消息预定

隙, 簇头节点广播相应的 TDMA 调度数据包, 如图 5 所示, 则在调度序列中, 四个节点对应的位为第 1, 2, 4 和 m 位, 表明本帧的总的的数据时隙为 4 (即下一帧的 k 值)。确定具体的时隙时, 由于 A 的对应位之前的子序列为 1, 故 A 占用时隙 1; C 对应的位之前的子序列为 1101, 1 的个数为 3, 故 C 占用时隙 3; 同理, B 和 D 分别占用时隙 2 和时隙 4。假定在第 2 帧时, 节点 A, C, D 在第 1 帧数据传输时进行了捎带预定, 节点 E, F 在第 3, 5 个 mini slot 发送了 RSV 消息, 那么簇头节点广播的调度数据包包含两部分, 前 4 位为第 1 帧的捎带预定, 后 m 位为本帧的预定。此时, A, C, D 在序列中的对应位为第 1, 3, 4 位 (即在前一帧中的时隙序号), E, F 的对应位为序列后 m 位的第 3, 5 位, 则 A, C, D 在本帧的时隙号为 1, 2, 3。而节点 E 的对应位之前的子序列为 1011001, 1 的个数为 4, 故 E 占用时隙 4, 同样 F 占用时隙 5, 本帧总的的数据时隙数为 5。

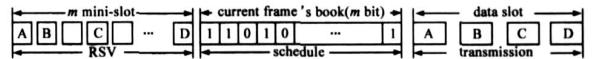


图 5 第 1 帧的 TDMA 调度

在数据传输阶段, 源节点在其占用的时隙内进行数据传输, 若节点在此次传输后仍有数据需要传输, 则在发送给簇头的数据包中捎带一个标志, 进行下一帧的时隙预定。在下一帧的预定阶段, 节点不必再发送 RSV 消息, 只需在接收到调度数据包后确定自身在下一帧占用的时隙号即可。

需要注意的是, 当调度序列中 1 的个数为 0 时, 表明本帧没有节点有数据需要传送, 即特定事件已经消失, 此时所有成员节点同样将睡眠一个缺省帧长, 如 $T_{frame\ def}$, 以避免频繁的预定和调度。与最小帧长为 $T_{frame\ min}$ 不同, $T_{frame\ def}$ 的设置与具体应用相关, 若应用对时间要求不敏感, $T_{frame\ def}$ 可设置得长一些, 反之可设置得短些。

3.2 簇内覆盖

由于无线传感器网络一般具有较高的节点密度 (密度可高达 $20\text{nodes}/\text{m}^3$), 节点的感知范围存在重叠, 因而节点的监测信息将存在大量的冗余。此外, 在实际应用中, 要完全覆盖整个监测区域也是难以达到的, 只能满足一定的网络覆盖率。因此我们引入了簇内覆盖的思想, 在满足覆盖监测区域的前提下, 选取活动的节点工作子集, 同时保证网络拓扑的连通性。非工作子集中的节点即为冗余节点, 冗余节点进入睡眠状态以减少冗余信息并节省能量, 在恰当的时候重新被激活执

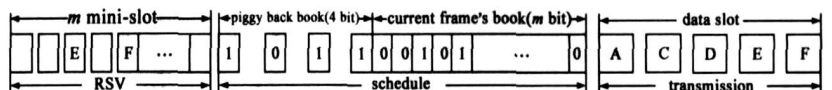


图 6 第 2 帧的 TDMA 调度 (含捎带预定)

行监测任务. 在前期工作中^[10, 11], 我们研究了工作节点数量与期望覆盖率之间的关系, 如式(1)所示:

$$P_{\text{cover}} = \sum_{i=K}^{m'} C_m^i \left(\frac{r}{R}\right)^{2i} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{m'-i} \quad (1)$$

其中 P_{cover} 为簇覆盖的期望几率, r 为传感器的传感半径(即监测半径), R 为簇半径. P_{cover} 根据具体应用的需求设定, P_{cover} 越大, 表明数据精度要求越高, 簇内参与监测的活动节点就越多. 例如, 在 $100 \times 100 \text{m}^2$ 的区域均匀分布 200 个节点, $r = 12 \text{m}$, $R = 30 \text{m}$, 则每个簇中的平均节点数约为 60. 根据公式(1), 若要求达到 99% 的覆盖率, 即 $P_{\text{cover}} = 99\%$, 每个簇只需要 27 个节点工作, $m' = 27$; 若要求达到 95% 的覆盖率, 则 m' 仅为 16. 可见, m' 的值都远小于簇内成员数, 且只与期望覆盖率 P_{cover} 及传感半径与簇半径的比值有关, 与节点的数目无关, 从这个意义上, 簇内覆盖提高了网络的伸缩性. 此外, 工作节点数目 m' 不随节点密度的增加而增大, 因此节点密度越高, 睡眠的节点数目也越多, 每轮的平均能量损耗就越少, 网络的生命周期也就越长. 同时, 预定阶段和调度数据包的长度也将保持不变, TDMA 的帧长也可限制在 m' 个时隙之内, 使得数据延迟不随节点密度的增加而增大.

4 性能评价

4.1 参数设置

我们模拟实现了 ED-TDMA、ED-TDMA1、BMA 以及传统的 TDMA 协议并进行了性能比较, 其中 ED-TDMA1 协议是集成了簇内覆盖的 ED-TDMA 协议. 实验参数如表 1 所示, 无线通信模块的参数与文献[8]中的相同. 假设网络负载的产生遵从伯努利过程, 即节点有数据需传送的几率为 p , 通过设置 p 值的大小控制网络的负载.

表 1 实验模拟参数

参数	值	参数	值
Sensor area	$100 \times 100 \text{m}^2$	n	10
Node number	300	T_{slot}	45ms
Sensing radius(r)	12m	$T_{\text{frame min}}$	495ms
Cluster radius(R)	30m	$T_{\text{frame def}}$	9.9s
P_{cover}	95%	$T_{\text{rsv}} + T_{\text{schedule}}$	45ms

4.2 实验结果及分析

图 7 和图 8 为不同网络负载下每分钟内网络进行的平均数据收集次数和源节点发送的总的数据包数目. 一次数据收集表示网络内各簇完成一次簇内成员节点的数据收集. 由图 7 可见, 网络负载较低时, ED-TDMA 协议的数据收集次数远高于 BMA 和 TDMA, 约为后者的 2 倍左右. 这是因为 ED-TDMA 协议的帧长是随着源节点的数目变化, 负载较低时源节点数目少, 其帧长

较短, 故能进行更多轮次的数据收集, 因此在负载相同的情况下能够发送更多的数据包. 而 BMA 和传统的 TDMA 的帧长是固定的, 与簇内成员数目相关(包括源节点与非源节点), 因此其帧长要大于 ED-TDMA 的帧长, 故相同的时间内进行的数据收集次数少, 发送的数据包的数目也远小于 ED-TDMA 协议. 随着负载的增大, 源节点的数目增多, ED-TDMA 协议的帧长也增大, 故其数据收集次数逐渐减小并趋近于 BMA 协议. 而 ED-TDMA1 协议由于采用了簇内覆盖, 故簇内成员数固定为 16, 因此 ED-TDMA1 协议的数据收集次数比 ED-TDMA 协议更多, 且基本不随网络负载变化. 在轻负载时, ED-TDMA1 协议中发送的数据包的数目与 BMA 协议大致相同而远小于 ED-TDMA 协议, 这是由于 ED-TDMA1 协议仅选择了若干传感器节点进行工作, 因此源节点数目相对很少的缘故. 由此可见, ED-TDMA 协议的信道利用率远高于 BMA 及 TDMA, 且在相同的时间内能传递更多信息.

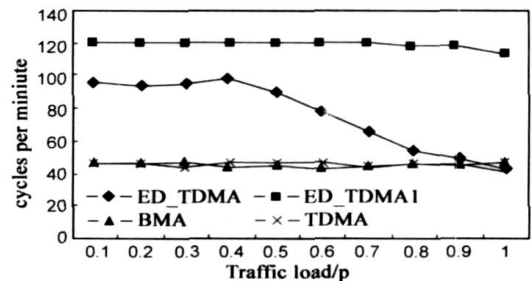


图 7 单位时间的数据收集次数

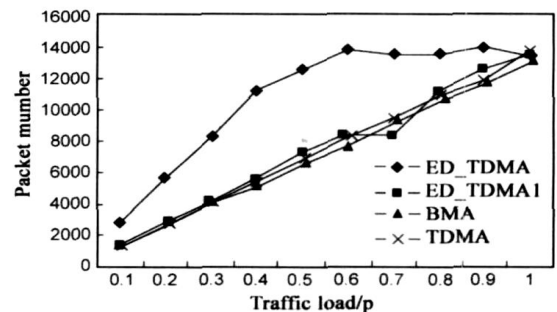


图 8 相同时间网络发送的数据包数目

图 9、图 10 分别为不同节点密度部署以及不同网络负载的情形下, 网络进行了 5000 次数据收集后的 TDMA 调度开销. 传统的 TDMA 协议仅在每轮开始时进行一次 TDMA 调度, 而 BMA 和 ED-TDMA 在每轮中都有若干次 TDMA 调度, 因此仅对 BMA 和 ED-TDMA 协议进行了比较. 显然, 随着节点密度的增大(即簇内成员数目 m 的增多), BMA 协议的 TDMA 调度开销迅速增长, 远高于 ED-TDMA 协议. 如在节点密度为 0.04nodes/m^2 时, BMA 协议的调度开销是 ED-TDMA 协议的 3 倍. 同样, 在不同的负载相同的节点密度下, 由于源节点数目的增多, BMA 协议的 TDMA 调度数据包长度也增加, 其

调度开销同样急剧增加. 而 ED-TDMA 协议的调度数据包最大为 $2m$ 比特, 故其调度开销增加缓慢. 对于 ED-TDMA1 协议, 由于工作节点远小于前两者, 并且工作节点的数目是固定的, 因此其调度开销极小, 且与节点密度和网络负载都无关.

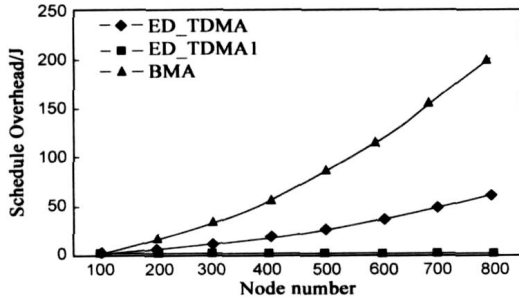


图 9 不同节点密度部署下的 TDMA 调度开销 ($p=0.3$)

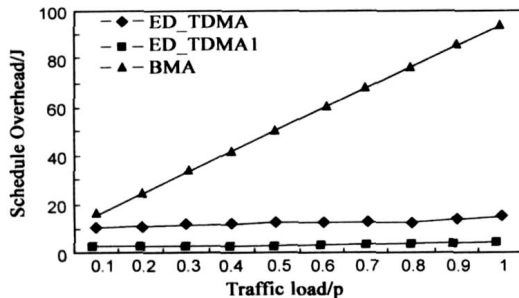


图 10 不同负载下的 TDMA 调度开销 (300nodes)

图 11、图 12 则分别为不同节点密度部署以及不同网络负载的情形下, 网络进行了 5000 次数据收集后的能量消耗情况. 由图可知, 随着节点密度的增大或网络负载的增大, 各协议的能量消耗也随之增加. 显然 BMA 协议的能量消耗增长速度比 ED-TDMA 协议更快, 如节点密度为 0.03 node/m^2 时, BMA 的能量消耗分别比 ED-TDMA 和 ED-TDMA1 多 25% 和 91%; 节点密度为 0.06 node/m^2 时, 其能量消耗则分别是 ED-TDMA 和 ED-TDMA1 的 1.5 倍和 2.7 倍. 对于 TDMA 协议, 由于簇头节点在一轮的时间内始终处于工作状态, 因此浪费了大量的能量, 尤其是在低负载时. 而当网络负载 p 超过 0.8 时, TDMA 协议的能量消耗反而比 ED-TDMA 协议少, 这是由于负载较高时, 所有协议下的簇头节点工作时间都很长, 而 ED-TDMA 协议还存在调度开销的缘故.

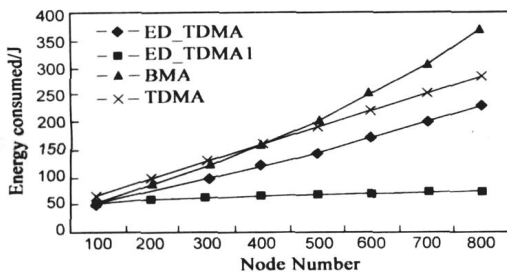


图 11 不同节点密度部署下消耗的能量 ($p=0.3$)

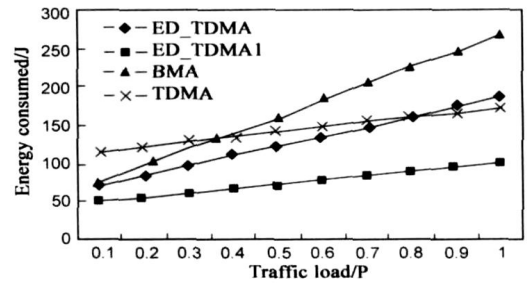


图 12 不同负载下消耗的能量 (300nodes)

综上所述, ED-TDMA 协议更适用于网络负载较低、节点密度高且数据包长度较长的无线传感器网络.

5 结论

本文提出了一种基于事件驱动的传感器应用的 TDMA 协议, ED-TDMA 协议. 该协议根据当前源节点的数目动态地改变 TDMA 帧的长度, 提高了信道利用率; 同时采用位图方式的 TDMA 调度, 极大地减少了 TDMA 调度的开销, 减少了能量消耗. 此外, 通过引入簇内覆盖的思想, 使得簇内活动节点为一常数, 延长了网络的生命周期, 同时提高了系统的可伸缩性. 实验结果显示, 在节点密度较高、网络负载较低 ($p < 0.5$) 时, ED-TDMA 协议具有较高的信道利用率, 在相同的时间内能够传送更多的信息; 进行相同次数的数据收集时, 所消耗的能量及 TDMA 调度开销更少. 因此, ED-TDMA 协议更适用于网络负载较低、节点密度高且数据包长度较长的无线传感器网络.

参考文献:

- [1] D Estrin, et al. Next century C challenges: Scalable coordination in sensor networks [A]. Proc of ACM MobiCom [C]. New York: ACM press, August 1999. 271-278.
- [2] I F Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [3] W Ye, J Heidemann, D Estrin. Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. ACM/IEEE Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-506.
- [4] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks [A]. Proc of ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems [C]. New York: ACM press, 2005: 356-365.
- [5] T Van Dam, K Langendoen. An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks [A]. Proc of ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems [C]. New York: ACM press, 2003. 171-180.
- [6] K. Langendoen, G Halkes. Energy Efficient Medium Access

- Control. Embedded Systems Handbook[M]. CRC press, Aug, 2005.
- [7] W R Heinzelman, et al. An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4) : 660- 670.
- [8] O Yonis, et al. HEED: a hybrid, energy efficient, distributed clustering approach for adhoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4) : 366- 379.
- [9] J Li, et al. A bit-map assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor network [A]. Proc of IPSN04[C]. CA: IEEE Computer Society, 2004. 55- 60.
- [10] Ming Liu, Jiannong Cao, Li Xie, Wei Lou. Coverage analysis in wireless sensor network[A]. Proc of International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Networks[C]. Berlin: Springer, 2005.
- [11] 刘明, 龚海刚, 毛莺池, 陈力军, 谢立. DEEG: 一种高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议[J]. 软件学报, 2005, 16(12) : 12.
- LIU Ming, et al. A distributed energy efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(12) : 12. (in Chinese)

作者简介:



龚海刚 男, 1975 年生于江西南昌, 博士、讲师. 主要研究方向: 无线传感器网络、延迟容忍网络、新型网络体系结构.

E mail: ghgang@ tom. com



刘明 男, 1972 年生于四川成都, 博士研究生. 研究方向: 无线传感器网络、延迟容忍网络、新型网络体系结构.