

# 无线传感器网络媒质接入控制协议的研究进展<sup>\*</sup>

龚海刚 刘明 易发胜 余玲飞 王晓敏

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**摘要** 媒质接入控制(Medium Access Control)是无线传感器网络设计的关键问题之一。由于无线通信模块是传感器节点能量消耗的主要来源,而媒质接入控制协议则直接控制着节点无线通信模块的活动,因此 MAC 协议节能效率的好坏将严重影响网络的性能。本文首先介绍了 MAC 层能量消耗的主要来源,阐述了无线传感器网络中 MAC 协议的研究内容和设计目标,并讨论了影响 MAC 协议性能的若干参数指标,随后介绍了几类典型的 MAC 协议,最后对 MAC 协议的发展方向进行了总结和展望。

**关键词** 无线传感器网络,媒质接入控制,能量有效性,MAC 协议

## Research of Medium Access Control Protocol in Wireless Sensor Networks

GONG Hai-Gang<sup>1</sup> LIU Ming<sup>2</sup> YI Fa-Sheng YU Ling-Fei<sup>1</sup> WANG Xiao-Min<sup>2</sup>

(College of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China)<sup>1</sup>

**Abstract** One of the key problem 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. This paper describes the sources of energy consumption in MC layer and the design of MAC protocol. Then some factors impacting on the performance of MAC protocol and metrics of performance evaluation are discussed. Finally, the future research direction is summarized.

**Keywords** Wireless sensor network, Medium access control, Energy efficiency, MAC protocol

## 1 引言

随着传感器技术、嵌入式计算技术、低功耗无线通讯技术的飞速发展,具备感应、无线通讯以及信息处理能力的微型无线传感器也开始出现。这些廉价的、低功率的传感器组织成无线网络,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(Wireless Sensor Networks)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<sup>[1,2]</sup>。目前无线传感器网络已经发展成为一个重要的计算平台<sup>[3]</sup>。

由于受到成本以及体积等原因的限制,无线传感器节点的处理能力、通信带宽以及电池容量等资源更为有限<sup>[2]</sup>。尤其是在多数应用中,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),使得如何有效利用能源,延长网络的工作寿命成为无线传感器网络设计上需要考虑的关键因素之一。

在无线传感器网络系统中,媒质接入控制(Medium Access Control)是确保无线传感器网络高效运转的一个关键技术。MAC 协议的功能是解决多个节点共享单个信道的问题,并决定节点何时占用无线信道进行数据的传输,同时避免节点之间的传输发生碰撞。由于无线传感器网络的设计首要目标是能量的有效性,因此 MAC 协议的设计也必须遵循节能思想。目前,对于大多数传感器硬件平台而言,无线通信模块

是传感器节点能量的主要消耗者,而 MAC 子层直接与物理层接口,即 MAC 协议直接控制着无线射频收发器的活动并决定着何时将数据发送出去或接收数据,所以 MAC 协议的节能效率的好坏将严重影响着网络的生命周期。因此,设计高效节能的 MAC 协议具有重要的现实意义,其研究也引起了广泛的关注。

在无线网络的 MAC 层中,引起能量浪费的来源主要有以下几个方面<sup>[4]</sup>:①空闲监听(idle listening)。由于节点不知道何时能收到其邻居发送的消息,因此节点将一直监听信道,以接收可能的数据。这种过度的空闲监听造成的能量消耗是没有必要的,尤其是在网络中传送的数据频率较小时,节点之间的传输时间有限,能量将主要浪费在空闲的监听上;②碰撞(collision)。两个节点同时传送数据时将发生碰撞,干扰彼此的数据传送,导致数据包的损坏。传送和接收这些数据以及随后的数据重传都将耗损能量,造成无谓的能量浪费;③控制开销(control packet message)。在控制节点之间的信道分配时,MAC 协议引入了一些控制信号,这些控制信号不包含数据信息,发送和接收这些控制信号也将消耗一部分能量,同时还将降低网络的吞吐率;④串音(overhearing)。无线介质是共享的媒质,节点可能收到目的地为其它节点的数据,用于接收和处理这些数据的能量是不必要的。尤其是当网络负载很高,节点密度很大时,串音现象将会造成相当大的能量浪费;⑤负载的波动(traffic fluctuation)。网络中的负载变化较大时,突然增大的负载将增加碰撞的几率,能量和时间将大量

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(No. 60573132),国家“863”高技术研究发展计划(No. 2004AA112090)。龚海刚 博士,主要研究方向为无线传感器网络、无线网状网络;刘明 博士研究生,研究方向无线传感器网络。

浪费在节点的碰撞处理过程中。对于事件驱动的无线传感器网络应用,事件发生时网络内将产生大量的数据,引起数据传输的冲突。

因此,MAC协议设计的主要思想就是在上述能量消耗的5个方面避免或减少能量的浪费,控制无线收发器在必要的时候启动,以达到节能的目的。

## 2 MAC协议的分类

MAC协议的分类没有一个统一的标准,根据使用信道的数目可分为单信道(single channel)和多信道(multi-channel)的MAC协议;根据控制的方式可分为集中控制和分布式控制的MAC协议;根据传输的发起者可分为接收者发起(receiver initiated)和发送者发起(sender initiated)的MAC协议;根据媒质接入方式的不同,又可分为基于竞争(Contention-based)的MAC协议和基于调度(Schedule-based)的MAC协议。本文从媒质接入方式的角度出发,介绍基于竞争的MAC协议和基于调度的MAC协议。

### 2.1 基于竞争的MAC协议

基于竞争的MAC协议即节点通过相互竞争来获得对共享媒质的控制权,对节点是或然性的协调。节点发送数据时,以某种竞争机制访问无线信道,在竞争过程中将不可避免地产生碰撞,此时需要采取适当的机制解决由于竞争产生的碰撞,并重发数据,直到数据发送成功或丢弃数据。

ALOHA协议<sup>[5]</sup>是早期提出的MAC协议,节点只要有数据发送就直接将分组发至信道。若收到应答,则表明此次传送是成功的,否则表明传送发生碰撞,需要进行重传。ALOHA协议的简单性导致了系统吞吐率极其低下,仅有18%。载波监听多址接入(CSMA)协议<sup>[6]</sup>则是另一典型的基于竞争的MAC协议,其基本思想是节点在数据传输前先监听一段时间无线信道。若信道空闲,则将数据发出,否则随机等待一段时间在信道空闲后发出数据。CSMA协议可以获得比较大的吞吐率(50%~80%),远高于ALOHA协议,但是不能解决隐藏终端问题。随着20世纪90年代MACA协议<sup>[7]</sup>的提出,隐藏终端问题的解决,基于竞争的MAC协议得到了迅速的发展。

基于竞争的MAC协议主要有3个优点:第一,基于竞争的MAC协议对网络拓扑的动态变化具有较强的自适应性;其次,节点可以随时地按需访问无线信道,不受节点密度的影响,可伸缩性较好;再次,节点之间不需要严格的时钟同步,节省了用于时钟同步的开销。但是对于基于竞争的MAC协议,最主要的缺点就是能量使用的效率非常低,例如节点无线收发器始终处于激活状态,极大地消耗了能量;存在竞争和碰撞也带来了竞争开销和能量的浪费;串音现象和其它协议开销也将耗费一部分能量。因此,在无线传感器网络中采用基于竞争的MAC协议需要克服这些能量浪费的问题。

### 2.2 基于调度的MAC协议

基于调度的MAC协议就是存在一个集中控制点,通过广播一个调度消息预先安排其控制的所有节点在互相独立的子信道接入共享媒质,从而避免节点的传输碰撞。显然,节点进行传输的时间和时长是由集中控制点预先调度的,因此不存在节点竞争信道的开销。此外,节点接入信道的方式是确定性的,对于语音或流媒体等实时服务可以提供确定上限的延迟(Delay-bounded)。因此,基于调度的MAC协议广泛应用于移动通信中,如时分复用TDMA、频分复用FDMA及码

分多址CDMA等方案,其对应的子信道分别为时隙(TDMA)、子频带(FDMA)或不同的正交码(CDMA)。其中基于TDMA的MAC协议因其信道分配的简单而成熟的机制,得到了广泛的研究。

TDMA机制将信道划分为帧(frame),每帧又分为N个时隙(slots)。由集中控制点将时隙分配给其管理的节点。在任一时隙,仅有一个节点能够发送数据,从而避免了传输碰撞。TDMA方案广泛应用于GSM系统中。在每个蜂窝内,基站将时隙分配给移动节点并提供同步服务。移动节点通常只与基站通信,节点之间没有直接的点对点通信,节点在自身时隙到来时将数据发送至基站。

TDMA协议的主要优点就是具有内在的节能特性:节点无需竞争信道,且在不同时隙内收发数据,因此不存在竞争开销和传输碰撞;节点仅在固定分配的时隙内打开无线收发器,进行可能的通信,在其余时间则关闭无线收发器,大大减少了空闲监听的时间;除了调度开销外,数据传输时不需要其他任何控制消息。此外,TDMA协议能够确保延迟在一定范围内,适合一些有时间要求的实时应用。然而,TDMA协议也存在一些缺点。首先,TDMA协议需要节点之间比较严格的时钟同步,各节点的时钟不同步,会导致节点分配的时隙互相重叠,节点无法在正确的时间激活并传送数据,TDMA调度失去了意义。其次,TDMA协议的可伸缩性较差,对网络拓扑变化的适应性也存在不足。当新节点加入或旧节点失效时,难以改变TDMA帧的长度和时隙的分配。然而由于TDMA协议的固有节能特性,不少研究者针对TDMA协议的不足,同时结合具体的网络应用,对基本的TDMA协议进行了扩展,例如时隙并不仅仅用于传输数据,在时隙内还可以引入一些竞争机制等。

### 2.3 混合接入的MAC协议

基于调度的MAC协议和基于竞争的MAC协议各有其适用的场合和优缺点,因此有研究者结合两种接入方式的优点,设计混合接入的MAC协议。即网络运行时,在某一阶段采用基于竞争的接入方式,在另一阶段则采用基于调度的接入方式。这样可以避免两种接入方式的缺点,获得比采用单一接入方式更好的性能以及更为广泛的应用范围。

## 3 无线传感器网络MAC协议的设计

### 3.1 MAC协议的设计目标

对于传统的无线网络而言,MAC协议的设计目标主要有以下几点。

(1)公平性:反映了不同用户、节点或应用平等接入媒质的能力,这是MAC协议设计的重要目标之一。应尽可能保证网络中任一节点占用共享媒质的机会是均等的,每个节点都有机会发送或接收数据。

(2)系统吞吐率:在给定时间内由发送者成功发送到接收者的数据量,反映了网络的容量。

(3)数据延迟:发送者产生数据分组时到此分组被接收者成功接收到的时间,对于实时应用,MAC协议的设计应尽可能降低数据的延迟。

(4)信道利用率:反映了信道的全部带宽利用的程度,又称带宽利用率。

(5)可伸缩性和自适应性:反映了网络适应拓扑动态变化的能力。在无线网络,节点可能由于多种原因失效,同时新节点不断加入网络,而节点自身也可能移动到其他位置,这些因

素都导致网络拓扑的变化。一个设计良好的 MAC 协议应该能够优雅地适应这些变化。

然而,对于无线传感器网络,由于其不同于传统无线网络的特性,使得传感器网络的 MAC 协议不能按照传统无线网络的要求设计。例如在传感器网络中,单个节点或单个用户的公平性是没有意义的,因为在传感器网络中所有节点的目的是协作完成一个共同的任务,系统性能评价是针对整体而言,而非单个节点。又如数据延迟,在无线传感器网络中其重要性取决于具体应用的要求。对于事件驱动的应用,应当具有较低的延迟;而对于室温监控、土壤酸碱度监控等应用,可以不用考虑数据的延迟大小。根据无线传感器网络的特点,其 MAC 协议的设计目标应为:

(1)能量有效性(Energy efficiency),即节点能量的高效使用。传感器网络的一个显著特点是节点资源匮乏,通常节点以干电池、纽扣电池等提供能量,并且电池能量一般难以进行补充。事实上,在多数应用中,传感器节点的成本低廉,在电池耗尽后一般就被抛弃而不是回收。而传统无线网络中的节点,一般不存在能量的供应问题,如笔记本电脑、手机、PDA 等设备,都能够方便地补充能量。由于在大多数硬件平台中,无线收发模块是能量的主要消耗者,而 MAC 协议直接控制着无线收发器的活动,因此 MAC 协议的节能效率的好坏严重影响着网络的生命周期。

(2)可伸缩性和自适应性。传感器网络的另一特点是网络规模大、节点数目众多、分布密度高,且拓扑结构动态变化较大。尽管传统的无线网络的 MAC 协议同样要满足可伸缩性和自适应性的要求,然而对于传统的无线网络,通常节点的数量和规模都远小于传感器网络,因此在可伸缩性和自适应性方面,无线传感器网络的 MAC 协议设计面临着更严峻的挑战。

(3)应用相关性。无线传感器网络是一个应用相关的网络,不同的应用对应着不同的任务。在这些应用中,数据的传送方式、网络的路由机制、网络的负载等都不尽相同,因此 MAC 协议的设计应是面向应用的。根据具体的应用背景,结合协议栈其他各层的细节,设计既简单又优化的 MAC 协议,获得性能的提升。

所以,无线传感器网络 MAC 协议的主要设计目标是能量有效性和可伸缩性,网络的公平性、系统的吞吐量等在传感器网络中是次要的考虑因素。在多数情形下,MAC 协议的设计是能量有效性和其他性能的折衷或平衡,即在满足一定能量有效性的前提下,同时满足延迟、吞吐量等指标的要求。

### 3.2 MAC 协议的性能评价

影响 MAC 协议性能的主要参数如表 1 所示。

表 1 影响 MAC 协议性能的参数

参数名	说明
Duty cycle	占空比
N	传感器节点的数量
S	网络监测区域的面积
p	节点发送几率
T <sub>interval</sub>	分组发送间隔
L <sub>data</sub>	数据分组的长度

占空比是决定节点能量损耗的主要参数,因此对能量的使用效率有着较大的影响。占空比定义为空负载情形下无线收发器在活动状态下的时间与网络运行时间的比值。显然,

占空比越小,节点的能量消耗也就越小。

传感器节点的数量 N 是影响 MAC 协议性能的一个重要参数,用以验证各 MAC 协议在不同规模的节点部署下的性能,从而反映协议的可伸缩性。网络监测的面积也在一定程度上影响着协议的可伸缩性,大面积的监测区域使得节点之间只能经过多跳的形式进行传输。

p 为网络中的节点有数据要传送的几率,即 p 决定着传感器网络中源节点的数目的多少,T<sub>interval</sub> 则决定了分组产生的时间间隔,两者控制着网络的负载大小,用以验证在不同网络负载下各 MAC 协议的性能变化。

数据分组长度 L<sub>data</sub> 也在一定程度上影响着 MAC 协议的性能,特别是对采用了控制消息的协议。若分组长度太小,控制消息的开销在消耗的总能量中将占较大的比重,降低了能量使用效率。

无线传感器网络中 MAC 协议设计的首要目标是能量的高效使用。显然,能量的消耗取决于传感器节点的无线收发器的活动时间的长短,即要在保证能够正常地传输数据的前提下,尽可能使无线收发器处于睡眠状态。单纯的用一段时间内的能量消耗并不能衡量能量使用效率的高低,还应该考虑同一时间段内收集的信息量的多少。例如 A、B 两协议在相同时间内消耗的能量各为 10J、12J,而前者收集的信息量为 100,后者收集的信息量为 300,显然不能说协议 A 的性能更好。因此我们定义能量使用效率为消耗单位能量所收集的网络信息量的多少。网络信息量可以用数据吞吐率表示,可写为

$$\eta_E = \frac{\text{throughput}}{\text{Energy consumed}} \quad (1)$$

MAC 协议设计的第二个目标是可伸缩性。并没有直接的指标可以反映协议的可伸缩性的好坏。通常情形下,可通过改变节点的分布密度等措施,验证 MAC 协议对网络规模的可伸缩性。

MAC 协议设计的第三个目标是应用相关性。体现在对数据延迟、数据吞吐率、带宽利用率等指标上,不同的应用对这些指标的需求也不同。这些指标是传统无线网络中首要考虑的因素,在无线传感器网络中则成为次要的考虑因素。一般情况下,MAC 协议的能量使用效率与数据延迟、吞吐率等指标之间是一个折衷平衡的关系。要获得较高的能量使用效率,就必须以数据延迟等其它性能指标为代价。如何在节能与其它指标之间获得平衡,与具体的网络应用相关。

## 4 典型的 MAC 协议介绍

无线传感器网络的特点决定了传统无线网络的 MAC 协议无法直接应用在传感器网络,并带来了特殊的设计要求。研究者们提出了一些符合传感器网络特点的 MAC 协议<sup>[8-27]</sup>,如表 2 所示。

### 4.1 S-MAC 协议

S-MAC(Sensor-MAC)协议是 Ye 等人提出的一个典型的、适用于无线传感器网络的 MAC 协议,是在 802.11 MAC 协议的基础上,针对传感器网络的节省能量的需求而设计的。在 802.11 协议中,假定网络中所有节点都能相互通信,即单跳的网络不符合传感器网络多跳的特性。此外,节点始终处于监听状态,浪费了大量能量,因此 802.11 协议不适合传感器网络。为了节省能量,S-MAC 协议首先引入了周期性活动/睡眠(active/sleep)的低占空比(duty cycle)机制,通过控

制节点的睡眠来降低能量消耗;其次,沿用了 802.11 的 RTS/CTS 机制降低碰撞几率;第三,通过网络分配矢量避免

串音现象;第四,将长消息分割为若干段消息并集中突发传送以减少协议控制消息的开销。

表 2 无线传感器网络 MAC 协议的相关研究

协议	接入方式	可伸缩性	能量有效性	应用场合需求
SMACS <sup>[8]</sup>	基于调度	一般	较好	节点功能强,成本低
DE-MAC <sup>[9]</sup>	基于调度(TDMA)	较差	一般	节点规模较小
S-MAC <sup>[10]</sup>	基于竞争	好	较好	负载波动较小
SIFT <sup>[11]</sup>	基于竞争	一般	较好	事件驱动
TRAMA <sup>[12]</sup>	基于调度(TDMA)	好	好	节点计算能力强
WiseMAC <sup>[13]</sup>	基于竞争	较好	较好	发送者多于接收者
B-MAC <sup>[14]</sup>	基于竞争	好	较好	发送者多于接收者
J-MAC <sup>[15]</sup>	基于竞争	好	较好	负载波动较小
LMAC <sup>[16]</sup>	基于调度(TDMA)	较好	较好	节点密度较小
SS-TDMA <sup>[17]</sup>	基于调度(TDMA)	差	好	节点规则部署
RMAC <sup>[18]</sup>	基于调度(TDMA)	较差	较好	无
ZMAC <sup>[19]</sup>	混合接入(TDMA+竞争)	较好	好	节点密度适中
TEEM <sup>[20]</sup>	基于竞争	较好	较好	负载波动较小
CSMAC <sup>[21]</sup>	基于调度(CSMA)	一般	好	节点计算能力强
DMAC <sup>[22]</sup>	基于竞争	较好	较好	节点为树状结构
GTDMA <sup>[23]</sup>	基于调度(TDMA)	较差	较好	集中控制

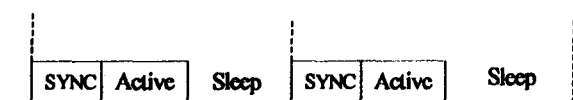


图 1 S-MAC 协议帧机构示意图

如图 1 所示, S-MAC 协议将时间分为若干帧,每帧包括一个同步阶段、活动阶段和睡眠阶段。在同步阶段,节点广播一个同步分组 SYNC,包含本节点的调度信息(节点何时睡眠);在睡眠阶段,节点关闭无线收发器以节省能量;在活动阶段,节点参照邻居的调度信息与邻居进行通信,并发送(或转发)在睡眠阶段中发送队列内积存的数据分组。由于数据的收发仅在每帧的活动阶段进行而非整个帧长,因此极大地减少了空闲监听的时间,从而节约了能量。

S-MAC 协议实现简单,从 4 个方面节省了能量的开销,既减少了空闲监听时间,避免了传输碰撞和串音现象,同时减少了协议控制开销。但是 S-MAC 协议由于周期性睡眠的原因,数据的延迟较大,在不同的网络负载下尤其是负载波动剧烈的情况下算法的效率将降低。

#### 4.2 WiseMAC 协议

WiseMAC 协议是基于竞争的 MAC 协议,采用了 np-CSMA 机制,并通过先序采样(preamble sampling)技术达到减少节点空闲监听时间的目的。所谓先序采样,即节点发送数据包之前先发送一个先序(preamble),网络中的节点周期性地对媒质进行采样。如果发现媒质忙(即监听到此先序数据),则继续监听并接收可能的数据。B-MAC 协议<sup>[14]</sup>采用的先序数据的长度与采样的周期相同,而 WiseMAC 协议则根据接收者的采样调度动态地调整先序数据的长度。当节点要传送数据至其邻居时,先检查该邻居的采样调度,并在该邻居采样之前发送一个较短的 preamble,则邻居活动后将检测到此先序并很快进入接收数据状态。因此,适中长度的先序不仅节约了发送方的能量,也缩短了接收方等待接收数据的时间。

WiseMAC 协议获得了比 S-MAC 更好的性能,其动态地先序长度调整能适应网络负载的变化,在协议的内部可以处

理时钟的漂移。由于节点的睡眠调度是相互独立的,节点邻居的睡眠、活动时间各不相同,这对消息的广播非常不利。广播的数据包将在每个邻居苏醒时发送,因此广播数据包需要进行缓存并要发送多次,这些冗余的传送将带来较高的延迟和能量消耗;此外,WiseMAC 协议不能处理隐藏终端问题。

#### 4.3 TRAMA 协议

TRAMA 协议是一种感知路由的分布式 TDMA 调度协议,节点周期性地广播经过本节点的流量信息(包含源节点地址、目的节点地址以及数据包的大小)和邻居信息,这样所有节点都知道其邻居何时收发数据。基于这些信息,作者提出了 NAMA 算法,利用分布式哈希函数,在两跳邻居内选择一个发送者,从而给各节点分配互不冲突的时隙。在 TRAMA 协议中,为了适应网络拓扑结构的变化,将时间划分为交替的随机访问阶段和调度访问阶段,两个阶段具体的时隙数由网络应用决定。随机访问主要用于网络维护,如新节点加入、节点失效等引起的网络拓扑变化要在此阶段完成。通过这种确定性的调度,每个节点知道其邻居何时收发数据,因此可根据这些信息决定何时关闭无线收发器、何时进行传输,从而大大节省了能量。此外,TRAMA 协议根据两跳范围内的邻居节点信息,由节点独立确定自己发送数据的时隙,同时避免把时隙分配给没有信息发送的节点,由此提高了网络吞吐率。然而,TRAMA 协议的算法复杂度很高,在每一个时隙,节点都要计算其两跳邻居在此时隙内的优先级,故 TDMA 调度开销大,并带来了极大的延迟。

#### 4.4 LMAC 协议

LMAC 协议给每个节点分配不同的时隙,32 个时隙构成一帧。时隙分配的原则是保证一帧内节点分配的时隙与其两跳内邻居节点分配的时隙号不同,因此帧的长度与节点的两跳内的邻居数目有关。每个时隙又分为控制段和数据段,节点在控制段中处于监听状态,当节点需要发送数据时,节点等待其分配的时隙的到来,并在时隙的控制段广播 12 个字节的控制消息(包含待发送数据包的目的地址和长度),然后紧接着在数据段内发送数据。其邻居节点在控制段中收到此控制消息后,若无需接收此数据,则关闭无线接收器,否则保持监

听接收此数据。各节点以多跳的方式传送数据,每经一帧节点的数据传送到下一跳,直至其邻近的网关,最后由网关将数据发送给基站。LMAC协议具有良好的灵活性和适应性,支持节点的移动性。但是LMAC协议只适用于小规模部署的网络。若节点密度较大时,两跳内的邻居数目较大,TDMA调度可能发生冲突,浪费能量。此外,当监测区域增大时,节点到网关的跳数增加,数据延迟将加大。

#### 4.5 ZMAC协议

ZMAC协议是Rhee等最近提出的一种结合了TDMA和基于竞争的CSMA协议的MAC协议。该协议根据当前网络中的竞争强度大小,自适应地选取合适的接入方式。在竞争较少的情形下,ZMAC采用基于竞争的接入方式,以获得较高的信道利用率和低延迟;在竞争激烈的情况下,ZMAC采用TDMA的接入方式,同样可以获得较高的信道利用率并减少传输碰撞。在ZMAC协议中,节点可以处于两种工作模式:低竞争模式(LCL)和高竞争模式(HCL)。节点首先在设置阶段,通过邻居发现算法得到其两跳内邻居的信息,并通过DRAND算法分配互不冲突的时隙。在LCL模式下,即竞争强度较小时,节点可以自由竞争任意时隙;而在HCL模式下,即竞争强度较高时,节点只能使用自身在设置阶段中分配的时隙进行数据传输。如果当前时隙的拥有者没有数据需要传输,则其他节点可以竞争该时隙。实验结果显示ZMAC协议具有良好的可伸缩性以及较好的能量有效性。

综上所述,无线传感器网络是应用相关的网络,不同应用对应的需求也不同,因此MAC协议设计时考虑的具体目标也是有差异的。一个适用于所有传感器网络应用的MAC协议是不存在的。无论是采用基于竞争的信道分配,还是采用基于调度的信道分配机制,都要根据具体应用选择不同的协议类型来设计MAC协议。此外,对于基于调度的信道分配,FDMA和CDMA方案(如SMACS和CS-MAC)都能使节点没有冲突地访问共享媒质。然而,FDMA给传感器节点的无线射频收发器的设计带来了额外的设计需求,CDMA更进一步增加了节点硬件设计的复杂性,要求节点具有较高的计算能力以及高效的编解码能力<sup>[28]</sup>。而硬件的复杂设计显然增加了节点的成本,不适合大规模部署的无线传感器网络。

## 5 未来研究方向

结合无线传感器网络MAC协议的当前进展及本文工作,我们认为无线传感器网络MAC协议研究的进一步工作应当包括以下几个方面:

(1)对于基于簇的TDMA协议,在监测区域面积较大时存在着时钟同步开销较大的问题。为了减小这些额外的能量开销对性能的影响,应该增大一轮的时间,也即减少网络重新设置的次数。然而,一轮的时间的长短受到时钟同步算法的同步精度的制约。因此,如何在每轮时间的设置与性能间取得平衡,有待进一步研究。

(2)随着传感器网络的发展,越来越多的新型传感器如图像传感器、摄像传感器等开始出现在传感器网络应用中,这就需要设计能满足一定QoS需求的MAC协议,如实时的MAC协议等,可在MAC层提供服务区分(service differentiation)机制,根据具体的应用将数据流分类,提供不同的服务。

(3)已提出的传感器网络的MAC协议大多数适用于静态节点,较少考虑节点移动的情况。如S-MAC协议,因为节点的移动使得网络拓扑变化,节点相互之间的睡眠调度将被

打乱。因此,有必要设计能适应移动节点的MAC协议,并可采取一些节点移动预测模型来优化。

(4)在传感器网络MAC的协议中采用传统无线网络中的技术也是研究的一个方向。已有研究将定向天线、MIMO等技术引入传感器网络<sup>[29,30]</sup>。尽管目前传感器节点的硬件设计达不到使用这些技术的要求,但是这些传统技术应用在MAC协议中能改善协议的性能。如定向天线技术,可以提高空间的重用率,有效提高信道利用率和数据吞吐率,提升系统性能。

## 参考文献

- 1 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [M]. *Computer Networks*, March 2002, 38: 393~422
- 2 Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks [C]. In: Proc. of MobiCOM '99, August 1999
- 3 Estrin D, Girod L, Pottie G, et al. Instrumenting the World with Wireless Sensor Networks [C]. In: International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2001), Salt Lake City, Utah, May 2001
- 4 Langendoen K, Halkes G. Energy-efficient Medium Access Control [M]. In: *Embedded Systems Handbook*, CRC press, August 2005
- 5 Abramson N. The ALOHA system - another alternative for computer communications [C]. In: *Fall Joint Computer Conference*, vol 37. Montvale, NJ, 1970. 281~285
- 6 Kleinrock L, Tobagi F. Packet switching in radio channels: Part I-carrier sense multiple access modes and their throughput-delay characteristics [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1975, 23(12):1400~1416
- 7 Karn P. MACA - a new channel access method for packet radio [C]. In: 9th ARRL Computing Networking Conference, September 1990. 134~140
- 8 Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network [J]. *IEEE personal Communications*, 2000, 38(5):16~27
- 9 Kalidindi R, Ray L, Kannan R, et al. Distributed Energy Aware MAC Layer Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. In: Proc of the International Conference on Wireless Networks, Las Vegas, Nevada, June 2003
- 10 Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. *ACM/IEEE Transactions on Networking*, 2004, 12 (3):493~506
- 11 Jamieson K, Balakrishnan H, Tay Y C. Sift: A MAC protocol for event-driven wireless sensor networks; [Tech. Rep]. MIT, 2003
- 12 Rajendran V, Obraczka K, Garcia-Luna-Aceves J. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks [C]. In: 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), Los Angeles, CA, November 2003. 181~192
- 13 El-Hoiydi A, Decotignie J-D, Enz C, et al. Poster abstract: WiseMAC, an ultra low power MAC protocol for the WiseNET wireless sensor network [C]. In: 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), Los Angeles, CA, November 2003
- 14 El-Hoiydi A. Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks [C]. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), New York, April 2002
- 15 van Dam T, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]. In: 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), Los

- Angeles, CA, November 2003. 171~180
- 16 van Hoesel L, Havinga P. A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks [C]. In: 1st Int Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2004), Tokyo, Japan, June 2004
  - 17 Kulkarni S, Arumugam M. TDMA service for sensor networks [C]. In: 24th Int Conf. on Distributed Computing Systems (IC-DCS04), ADSN Workshop, Tokyo, Japan, March 2004. 604~609
  - 18 Datta S. RMAC: a randomized adaptive medium access control algorithm for sensor networks [C]. In: Proc. of SANPA'04, Boston, USA, Aug. 2004
  - 19 Rhee I, Warrier A, Aia M, et al. Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks [C]. In: ACM Sensys, 2005
  - 20 Suh Changsu, Ko Young-Bae. A Traffic Aware, Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. In: IEEE 2005 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'05), May 2005
  - 21 Liu Bao Hua, Bulusu N, Pham H et al. CSMAC: A Novel DS-CDMA Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. Accepted by IEEE GLOBECOM Wireless Ad hoc and Sensor Networks, Dallas Texas, 2004
  - 22 Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks. In: Int Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN), Santa Fe, NM, April 2004
  - 23 van Hoesel L, Nieberg T, Kip H, et al. Advantages of a TDMA based, energy-efficient, self-organizing MAC protocol for WSNs [C]. In: IEEE VTC 2004 Spring, Milan, Italy, May 2004
  - 24 Kulkarni S, Arumugam M. TDMA service for sensor networks [C]. In: 24th Int Conf. on Distributed Computing Systems (IC-DCS04), ADSN workshop, Tokyo, Japan, March 2004. 604~609
  - 25 Langendoen K, Halkes G. Energy-efficient Medium Access Control [M]. In: Embedded Systems Handbook, CRC press, August 2005
  - 26 Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]. In: Proc. of 21st Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). vol3. June 2002. 567~576
  - 27 Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE802.11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(9): 1774~1786
  - 28 Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey [J]. Accepted to IEEE Communications Magazine, 2005
  - 29 Zhang Shen, Datta A. A Directional-Antenna Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. In: Proc. of ICCSA, 2005. 686~695
  - 30 Cui S, Goldsmith AJ, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO in Sensor Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 2004, 22(6)

(上接第 51 页)

跳数相同,但经过较低纬度轨道面间 ISL 的路径要比经过高纬度轨道面间 ISL 的路径所具有的时延大很多,从而出现少数峰值。

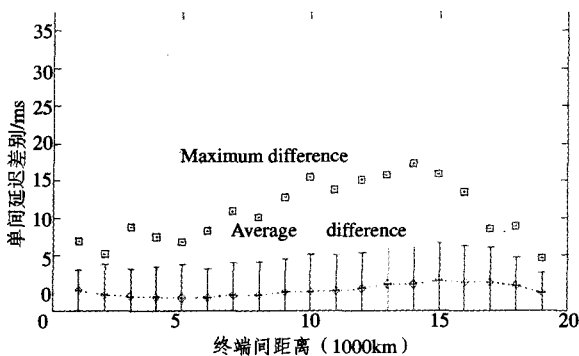


图 5 随机节点对单向时延比较

总体上来看,CPDR 算法在网络负载较小时的时延性能略优于基于最小跳的路由机制,但低于集中式最短路径算法;但当网络负载较大时,CPDR 算法的避免拥塞和丢包的性能要优于集中式最短路径算法和最小跳算法,同时端到端时延性能也在一定范围内相对提高,将优于集中式最短路径算法。

**结束语** 针对 LEO 卫星网络中拓扑高度动态变化、流量非规整性和星上资源受限的特点,本文提出了一种基于路径信息压缩的多路径分布式路由算法。由于链路代价度量不仅受传输时延影响,而且通过期望的队列时延反映流量负载的变化,因此 CPDR 算法具有拓扑自适应和流量自适应能力,它将能够大大提高网络的整体吞吐量和网络链路利用率,降低出现由于流量变化而引起拥塞的概率。其次,算法采用路径信息压缩,一方面简化了数据分组的转发,同时又可避免引入额外控制开销。端卫星所使用的多路径路由算法与压缩编

码机制相互独立,数据源可以控制流量如何映射到各路径上,从而可以实现全网范围内的流量工程目标。通过仿真实验显示,CPDR 算法在平均时延和路由成功率方面均优于单路径路由算法。无论从当前建设我国卫星网络的实际情况来看,还是从应用于已有卫星网络的角度来看,提出的 CPDR 算法都是一种实用的卫星网络路由算法,具有良好的应用前景。

## 参考文献

- 1 Hu Y, Li V O K. Satellite-based internet: A tutorial. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(3): 154~162
- 2 孙利民, 卢泽新, 吴志美. LEO 卫星网络的路由技术. 计算机学报, 2004, 27(5): 659~667
- 3 Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I. IP Routing Issues in Satellite Constellation Networks. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69~92
- 4 Eppstein D. Finding the k shortest paths. In: Proceedings of 35th IEEE Symposium on Foundations on Computer Science, 1994. 154~165
- 5 Charles E F. System Design Consideration for the Development of Iridium World Air Services. In: IEEE 18th Digital Avionics Systems Conference, Atlanta, Georgia, 1999. 61~68
- 6 Henderson T R, Katz R H. Network Simulation for LEO Satellite Networks. In: Proceeding of 18th International Communication Satellite Systems Conference, Oakland, Apr. 2000
- 7 Kandus G, Svigelj A, Mohorcic M. The impact of different scheduling policies on traffic class dependent routing in inter-satellite link networks. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22: 533~546
- 8 Bai JianJun, Lu Xicheng, Lu Zixin, Peng Wei. A distributed hierarchical routing protocol for non-GEO satellite networks. In: Proceedings of International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'04), Montreal, Canada, 2004. 148~155
- 9 白建军, 卢锡城, 卢泽新. 一种 LEO 卫星网络路由协议 S-LSRP. 见: 第九届全国青年通信学术会议论文集, 重庆, 2004
- 10 肖洪亮, 白建军, 卢泽新. 基于 ns2 的 LEO 卫星网络路由算法模拟. 2005 星座卫星通信系统论坛, 南京, May 2005
- 11 Henderson T. Networking over next-generation satellite system: [Ph. D. dissertation]. University of California, Berkeley, 1999