

# 无线传感器网络中采用预约机制的 MAC 协议改进

赵 巍, 瞿志华, 彭 军

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410075)

**摘要:** 提出一种基于信道预约的 MAC 协议 CR-MAC(channel-reservation MAC), 该协议是在 S-MAC(sensor-MAC)协议基础上进行的改进。当有数据需要发送时, 首先以基于竞争的方式发送和接收信道预约信息, 实现信道的按需分配; 信道预约完成后各节点按照预约好的时间片进行激活, 以时分复用的方式传输数据。CR-MAC 协议能够有效地减少节点的空闲侦听和串音干扰, 从而降低能量消耗和传输延时。

**关键词:** 无线传感器网络; 媒体访问控制协议; 信道预约; 能量效率; 延时

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)07-2716-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.089

## Improved MAC protocol for wireless sensor networks by reservation

ZHAO Wei, QU Zhi-hua, PENG Jun

(College of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** This paper proposed a channel reservation based MAC protocol. It was improved on S-MAC protocol. In the data transmission process, it sent and received the information of channel reservation through competition. Every node distributed channel according to need. Then activated each node according to the reserved time slot and transmitted the data by TDMA. The CR-MAC protocol can effectively decrease the idle listening and crosstalk interference of the nodes and reduce the energy consumption and transmission delay. It has some practical significance for development of wireless sensor networks.

**Key words:** wireless sensor networks; MAC(media access control) protocol; channel reservation; energy efficient; delay

### 0 引言

无线传感器网络是通过将具有传感器、数据处理单元及通信模块的微小智能节点密集散布在感知区域, 节点间以自组织方式构成的网络。由于无线传感器网络的特殊性, 其应用领域与普通通信网络有着显著的区别, 主要包括军事应用、环境监控、卫生保健、建筑物状态监控、防灾等方面<sup>[1]</sup>。

无线传感器网络目前所面临的主要问题是能量损耗大和传输延时长。无线节点是通过电池供电来进行环境监测、数据处理和相互之间通信的, 比起有线的网络来说, 其生命周期非常有限, 而且更换电池非常不方便, 很容易由于能量耗尽造成网络瘫痪<sup>[2]</sup>。同时由于无线传感器网络多用在环境监控和军事方面, 对数据的传输延时要求很高。因此采用什么样的方法能够减少不必要的能量损失和传输延时成为了本文研究的重点。

为了解决无线传感器网络的能耗问题, 研究人员从不同的方面提出了多种 MAC 协议改进方法, 一般可以分为基于无线信道随机竞争(CSMA)<sup>[3]</sup>和基于时分复用(TDMA)<sup>[4]</sup>两种。

基于竞争的 MAC 协议采用按需使用信道的方式, 它的基本思想是节点需要发送数据时, 通过竞争方式使用无线信道, 如果发送的数据产生了碰撞, 就按照某种策略(如退避机制)重发数据, 直到数据发送成功或放弃发送。S-MAC<sup>[5,6]</sup>协议是典型的基于竞争的 MAC 协议, 它在基于竞争的 MAC 协议基础

上引入了工作/休眠机制, 将时间分为工作和休眠两个阶段。在休眠阶段, 节点关闭射频模块, 缓存这期间采集到的数据; 在工作阶段, 通过 RTS/CTS(请求发送/允许发送)机制集中发送数据。S-MAC 协议虽然利用随机竞争方式通过休眠机制降低了能量的消耗, 但是由于它固定的工作/休眠时间, 使得每跳数据传输结束都要等待到下一工作阶段到来才能继续传输, 产生了传输的延时<sup>[7]</sup>。

除此之外, 基于竞争的 MAC 协议还有 T-MAC、Sift-MAC 等协议, 这些基于竞争的 MAC 协议往往只从发送数据的节点考虑问题, 可能会出现节点处于休眠状态造成的通信暂时中断, 增大传输延时。

基于时分复用的 MAC 协议主要有分布式能量感知节点活动(DEANA)协议、流量自适应介质访问(TRAMA)协议和 D-MAC<sup>[8]</sup>协议等, 它们大多是为网络中的节点分配各自的时间片, 节点在属于自己的时间片到来时发送或接收数据, 在不属于自己的时间片到来时可以处于睡眠状态<sup>[9]</sup>。TDMA 机制没有竞争机制的碰撞重传问题, 数据传输的过程中也不需要过多的控制信息。当然 TDMA 机制也存在不足的地方, 如很难调整时间帧的长度和时隙的分配, 灵活性较差。

本文通过对无线传感器网络 MAC 协议的分析, 针对现有的一些 MAC 协议传输延时大、能量消耗多、灵活性差的不足, 提出一种基于信道预约的 MAC 协议 CR-MAC。该协议是在 S-MAC 协议基础上进行的改进, 利用随机竞争方式, 通过发送较

收稿日期: 2009-12-06; 修回日期: 2010-01-04

作者简介: 赵巍(1983-), 男, 甘肃嘉峪关人, 助教, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络(zwclooney@yahoo.com.cn); 瞿志华(1963-), 男, 教授, 博导, 长江学者, 主要研究方向为网络协调控制、非线性系统理论; 彭军(1967-), 女, 湖南长沙人, 教授, 博导, 主要研究方向为多智能体系统、计算机应用。

短的预约信息实现信道的按需分配;信道分配完成后各节点将按照预约好的时间片进行激活,以时分复用的方式传输数据。CR-MAC 协议采用邻居节点之间交互的方式计算最近的预约时间,并将此预约时间通过自身预约时间表保存在各个节点上。在预约信道的过程中采用动态变化的预约周期,每个节点都按照自己的预约信息确定何时结束预约、何时进入实际数据的传输,不必等待固定的预约周期结束。

## 1 CR-MAC 协议

### 1.1 CR-MAC 协议描述

通过对无线传感器网络的特点和应用的研究,散布在各个不同区域的节点在感知到信息以后都要通过其他节点进行转发,最终将信息传向目的节点。因此,多跳传输是无线传感器网络的一个重要特性,无线传感器网络一般的拓扑结构如图 1 所示。

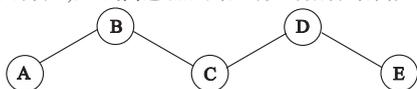


图1 无线传感器网络拓扑结构

CR-MAC 协议采用周期性的工作/休眠机制,当有数据要发送时,源节点在工作阶段首先发送 RTS 帧进行信道的预约,RTS 帧采用基于竞争的载波侦听多路访问(CSMA)方式进行发送。每个节点收到 RTS 帧后要回复 CTS 帧完成预约,并采用同样的竞争方式转发 RTS 帧到下一节点继续预约信道,直到最终到达目的地,或者工作阶段结束。通过信道预约可以使信道按照需求进行分配。在完成预约以后源节点和目的节点之间以基于时分复用的方式传输数据,每个节点都按照预约好的时间片进入工作状态发送和接收数据,其他时间则进入休眠状态。

CR-MAC 协议节点传输信息的流程如图 2 所示。节点 A 有数据要发送到节点 E,先通过 RTS 帧发送请求给节点 B,B 查看自己的预约时间表,找到最近的空闲时间,并结合 A 发送的 RTS 确定最近的接收时间写入预约时间表,发送 CTS 回复节点 A,A 收到 CTS 回复以后按照预约好的时间发送数据;与此同时,节点 B 继续通过 RTS 帧进行下一跳的预约,并按照同样的方法完成节点 C、D、E 的预约工作。

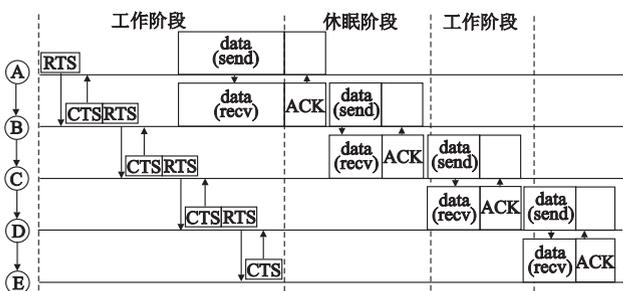


图2 CR-MAC协议工作原理

完成预约以后,各节点根据自己的预约时间表向下一跳节点发送数据,直到数据顺利传输到节点 E。

在整个数据传输过程中,多跳传输的上一节点的发送周期始终是与下一节点的接收周期相对应,形成交错醒来的机制,使得从源节点到目的节点的数据包可以连续流动,达到高能量和低延时的目的。

### 1.2 动态变化的预约周期

大多数基于预约的改进算法都采用固定的预约周期和传

输周期,这就要求各个节点首先要进行时间同步,确定预约周期和传输周期。在预约周期完成预约工作,预约周期结束以后进入传输周期,在传输周期中传输数据。这种方式中一些率先完成预约的节点在传输实际数据时要等待整个预约周期结束后进入传输周期才能进行,会产生一定的延时。同时由于传输周期也是固定的,当要传输的数据量发生改变时不能很好地适应。

本文提出的 CR-MAC 协议采用较为灵活的预约机制,即没有固定的预约周期,节点在工作阶段通过 RTS 帧进行预约以后可以马上根据预约的时间进行数据的传输,不必等待预约周期的结束。另外,传输周期也不固定,可以根据传输数据的长短自行改变。

如图 3 所示,节点 A 有数据要传输给节点 D,常见的预约机制中,节点 A 首先完成预约工作,但在完成预约工作后不能马上进入数据传输,而是要等待固定的预约周期结束才能够传输数据,会造成一定的延时。在 CR-MAC 协议中,节点 A 在完成预约后可以根据预约的信息直接进行数据传输,不必等待预约周期的结束,降低了传输延时。

同时从图 3(b)中还可以看出,在节点 AB 之间传输数据信息时,节点 C 的后续节点同时发送 RTS 帧进行下一节点的信道预约,这样数据传输和预约信息的传输是同时发生的,是一种并行机制,不需另外占用时间,进一步减少了延时。

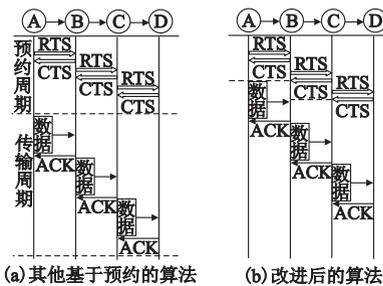


图3 不同预约算法的比较

### 1.3 最近预约时间的确定

CR-MAC 协议通过对 RTS 和 CTS 帧的改进来传输预约信息,并通过节点之间的交互确定最近的预约时间。改进的 RTS 和 CTS 帧结构如图 4 所示。

字节数:	2	2	6	6	6	4
	帧控制	持续时间	RA	TA	TS	FCS
RTS帧结构						
字节数:	2	2	6	6	4	
	帧控制	持续时间	RA	TR	FCS	
CTS帧结构						

图4 预约机制RTS和CTS帧结构

其中:RA 为源地址;TA 为目的地址;TS 和 TR 是协议改进后新增加的字段,表示数据发送节点的最近可发送时间和接收节点最近可接收时间。

最近预约时间的确定主要通过以下步骤完成:

a)发送节点有数据要发送时,首先查询本节点时间表,找到最近可发送时间  $T_s$ ,得到预计发送时间片  $slot[T_s, T_{END}]$ 。

$$T_{END} = T_s + T_{lasttime}$$

其中: $T_{END}$  表示发送结束时间, $T_{lasttime}$  为数据包发送时间。将  $T_s$  装入 RTS 帧的  $T_s$  字段,将  $T_{lasttime}$  装入 RTS 帧的持续时间字段发送给接收节点。

b)接收节点在收到此 RTS 帧后,读取  $T_s$  和持续时间字段,并查询自己的时间表,找到自己的最小可接收时间  $T_R$ ,比

较  $T_R$  和  $T_S$  的大小。如果  $T_R < T_S$ , 且在时间片  $\text{slot}[T_S, T_{EDN}]$  中空闲, 说明此时间片是合理的, 发送和接收双方在此时间片内都是空闲的, 于是就将此时间片写入本地时间表中, 并把这段时间的状态设置为“接收”; 如果  $T_R > T_S$ , 说明此时间片不合理的, 接收方在此时间片内忙, 于是选用接收方的时间片, 即  $\text{slot}[T_R, T_{EDN}]$  来代替  $\text{slot}[T_S, T_{EDN}]$  并将此时间片写入本地时间表中, 同时将新的时间片通过 CTS 发送给发送节点。

c) 发送节点在收到回复的 CTS 后将新的时间片写入本地时间表。完成预约。

CR-MAC 协议就是利用 RTS 和 CTS 帧发送预约信息, 并通过以上三个步骤在发送与接收节点之间交互预约信息确定最近的预约时间。

### 1.4 预约时间表

CR-MAC 协议中各节点都维护一张预约时间表, 用来判断节点何时应该进入工作状态, 何时应该休眠。节点在设置时间表后, 根据该表分配的时间, 进入三种不同的状态, 即接收、发送和空闲状态。在接收和发送状态, 节点处于激活状态, 准备接收和发送数据。

图 5 表示以图 1 所示情况为例, 其预约时间表的内容。节点 A ~ E 都根据各自的预约时间表在相应的时间片进行数据的传输和接收。节点在不需要接收和发送数据时尽可能保持睡眠状态, 避免不必要的空闲侦听。

节点A	时间片	$T_{RTS}-T_{END1}$	其他时间片		
节点A	状态	发送	空闲		
节点B	时间片	$T_{RTS}-T_{END2}$	$T_{RTS}-T_{END2}$	其他时间片	
节点B	状态	接收	发送	空闲	
节点C	时间片	其他时间片	$T_{RTS}-T_{END3}$	$T_{RTS}-T_{END3}$	其他时间片
节点C	状态	空闲	接收	发送	空闲
节点D	时间片	其他时间片	$T_{RTS}-T_{END4}$	$T_{RTS}-T_{END4}$	
节点D	状态	空闲	接收	发送	
节点E	时间片	其他时间片	$T_{RTS}-T_{END5}$	$T_{RTS}-T_{END5}$	
节点E	状态	空闲	接收	接收	

图5 预约时间表实例

## 2 CR-MAC 协议性能分析

### 2.1 目的节点选择和串音干扰的避免

CR-MAC 协议的预约机制不仅实现了时隙的预约, 减少了传输延时, 同时在预约阶段提前实现了目标节点的选择, 从而有效地避免了串音干扰。如图 6 的拓扑结构, 数据由节点 A 发送到节点 C, 再转发到节点 E, 由于 B 和 D 的存在, C 进行转发时要进行目的节点的选择, 产生延时, 另外也会出现串音现象。

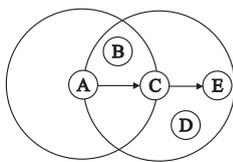


图6 串音干扰

利用 CR-MAC 协议可以有效解决以上问题。节点 A 首先广播 RTS 请求发送, B、C 节点都能够收到此信息, 分别判断自己是不是其目的节点, 节点 B 因为不是其目的节点, 所以不回复信息; 而节点 C 则回复 CTS, CTS 中包含了数据的预约发送时间段, 因此此信息是广播发送的, 节点 B 也能够收到, 所以节点 B 就可以在 A、C 之间传输数据时进入休眠状态, 同样 C、

E 之间传送数据时, B 和 D 节点也因为没有得到预约而进入休眠状态, 所以不会出现串音干扰。

这样通过预约机制不但在实际数据传输之前确定了传输的下一跳地址, 更主要的是在一对节点发送数据时让其他邻居节点进入休眠状态, 能够有效地减少串音干扰。

### 2.2 数据传输延时分析

在一个多跳的传感器网络中, 其延时包括很多种, 最重要的是传输延迟和休眠延迟, 这里主要讨论这两种延时。

在使用传统的 S-MAC 协议的无线传感器多跳网络中, 假设数据从源节点传送到目的节点要经过  $N$  跳, 总延时为

$$D_{SMAC}(N) = N \times (T_{TR} + T_{SLEEP}) \quad (1)$$

其中:  $D_{SMAC}(N)$  为 S-MAC 协议节点经过  $N$  跳总延时;  $N$  为跳数;  $T_{TR}$  为采用 S-MAC 协议的传输延时。

$$T_{TR} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK}$$

其中:  $T_{RTS}$ 、 $T_{CTS}$ 、 $T_{DATA}$  和  $T_{ACK}$  分别为 RTS 帧、CTS 帧、数据帧以及 ACK 帧的传输延时。

$T_{SLEEP}$  是数据传输的休眠延时。休眠延时指的是当一跳数据传输结束以后进入休眠状态, 等待下一工作阶段的时间延时。

采用本文提出的 CR-MAC 协议的数据传输总延时为

$$D_{CR-MAC}(N) = N \times T'_{TR} + 2N/M(T_{RTS} + T_{CTS}), M \geq 2 \quad (2)$$

其中:  $T'_{TR}$  为采用 CR-MAC 协议的数据传输延时,  $T'_{TR} = T_{DATA} + T_{ACK}$ ;  $M$  表示每个激活周期可预约的跳数,  $N/M$  表示完成多跳传输需要多少个工作阶段。如图 2 所示, 只有当一个工作阶段的第一个节点发送预约信息时需要首先发送 RTS 帧并等待 CTS 回复, 同时为了避免和下一节点冲突还要等待下一节点发送/接收 RTS 和 CTS 帧才能开始数据的传输。之后的预约信息将与数据信息同时传输, 不另外占用实际数据传输的时间。因此每个新的工作阶段会产生两倍 RTS 和 CTS 帧的传输延时。

将式(1)(2)进行比较得

$$D_{CR-MAC} - D_{SMAC} = N \times T_{SLEEP} + (N - 2N/M)(T_{RTS} + T_{CTS}) > 0$$

通过上式可以看出, 采用改进后的 MAC 协议会比传统 MAC 协议得到更小的传输延时。

### 2.3 引入预约机制存在的问题和解决方法

本文提出的 CR-MAC 协议是在 S-MAC 协议的基础上增加了预约机制。由于引入了预约机制, 同时会带来一些问题需要解决:

a) 常见的预约机制由于每个节点都要传送预约信息, 会产生额外的信息传输, 对网络性能会有一些影响。

针对传送预约信息, 产生额外信息传输的问题, CR-MAC 协议对 RTS/CTS 帧结构进行了改进, 通过 RTS/CTS 帧来传递预约信息。由于在 S-MAC 协议中每个数据帧发送之前都会先发送 RTS/CTS 帧, 并不会增加额外的网络负担。

b) 采用预约机制, 每次发送数据之前节点都需要去预约信道, 这样由于预约信息的传输会占用一定的时间, 产生一定的延时。

对于预约信道会产生延时的问题, 本文提出的方法是针对多跳传输的, 提出动态变化的预约周期, 在同一个激活周期中前面节点在传输数据的同时后续节点进行信道的预约, 即信道预约和数据传输同时发生, 是一种并发机制, 因此不会产生过多的额外延时。

c)在预约机制中,由于信道和时间的预约是通过理论计算得到的,如果在实际传输过程中信道带宽降低、传输速率降低会造成实际传输和预约不匹配的情况。

针对实际传输和预约不匹配的情况,本文提出的方法是通过理论计算得到数据在信道最佳状态下传输的预约时间,这样保证了在实际数据到达之前节点处于激活状态,数据不会因为预约时间不匹配产生延时,但会产生一定的能量消耗作为代价,对于运用于军事和火灾预防等领域的无线传感器网络来说牺牲少量的能量来保证较低的传输延时是值得的。另外 CR-MAC 协议采用周期性的工作/休眠机制,预约信息只有在 S-MAC 协议的工作阶段发送,在休眠阶段不发送,到下一个工作阶段继续预约,因此由于偶尔出现的预约时间表不匹配造成的能量消耗不会积累,在一个新的工作阶段会计算新的预约时间,在一定程度上控制了能量的消耗。

d)在引入预约机制的同时,各个节点都要担负预约时间的计算工作,产生一定的能量消耗。

对于增加了节点工作负担的问题,通过分析发现,传感器节点处理单元的能量消耗仅为 0.8 mW,远远小于无线收发模块 12.36 mW 的能量消耗<sup>[10]</sup>,因此通过增加节点处理单元的工作来减少无线收发模块的空闲侦听时间,是能够有效节约能量的。

综上所述,CR-MAC 协议在一定程度上和范围内减少了预约机制存在的不良影响,进一步提高了网络的性能。

### 3 仿真比较

本章通过网络仿真软件 OPNET,对不同的无线传感器网络 MAC 协议进行仿真,主要比较数据的传输延时和能量消耗两方面性能。本文提出的 CR-MAC 协议是在 S-MAC 协议的基础上采用预约机制提出的,结合了时分复用 MAC 协议的优点,所以将与 S-MAC 协议和典型的时分复用协议 D-MAC 协议进行比较。

OPNET 仿真工具中模拟 CR-MAC 协议,每个节点包括七个状态,分别是激活、发送 RTS、等待 CTS、设置时间表、接收和转发数据、等待 ACK 状态和休眠。

整个仿真过程是通过中断在不同的状态之间转移来仿真 CR-MAC 协议的工作过程:

- a) 每个节点首先通过初始化,设置节点的各项参数,进入激活状态,开始仿真,侦听无线网络信道。
  - b) 当有节点要发送数据时,该节点会产生一个自中断,通过中断从激活状态转移到发送 RTS 状态发送 RTS 帧。
  - c) 发送完 RTS 帧后转移到等待 CTS,此时节点一直监听无线网络信道,等待 CTS 回复。
  - d) 当收到回复的 CTS 帧后转移到设置时间表状态设置预约时间表,并按照设置的预约时间表进行休眠和激活。
  - e) 激活后进入接收和转发数据状态完成数据的接收和发送。
  - f) 随后在等待 ACK 状态完成数据包的确认。
  - g) 最后在不需要传输数据时进入休眠状态。
- 当节点在激活状态下没有数据要发送也没有接收到任何数据时,节点会在激活周期结束后进入休眠状态,在休眠时间结束后又会回到激活状态。减少不必要的空闲侦听。

仿真的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 模拟环境技术参数

参数	值	参数	值
周期	1 200 ms	RTS	24 Byte
节点数	11 个	CTS	24 Byte
占空比	10%	休眠模式消耗能量	0.016 mW
传输速率	32 kbps	激活模式消耗能量	12.36 mW
DATA	16 KB		

图 7 表示的是 10 个节点组成的无线传感器网络,数据通过多跳传输,从第一个节点到最后一个节点的每跳传输延时。分别应用 CR-MAC、S-MAC、D-MAC 三种不同的 MAC 层协议进行试验,得出不同的结果。分析发现,D-MAC 因为是按照规定的时隙传输数据,所以每一跳的延时都一样,均为 0.6 s;S-MAC 数据传输延时与其激活周期有关,因为数据传送完以后将会等待下一个激活周期,所以每一跳的传输延时均为 1.2 s;CR-MAC 协议的传输延时仅仅是数据和确认帧传输的延时。

通过比较可以看出,CR-MAC 协议的每一跳传输延时都明显低于 S-MAC 和 D-MAC,对于 S-MAC 协议传输 10 跳的距离需要 11.328 s,而对于 CR-MAC 协议仅仅只需要 5.038 s,大大减少了传输延时。同时还可以看出,CR-MAC 协议传输延时的斜率最小,这意味着随着跳数的增加,该协议减少延时的效果会更加明显。

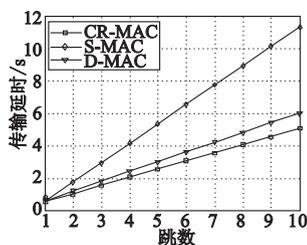


图 7 节点每跳数传输延时

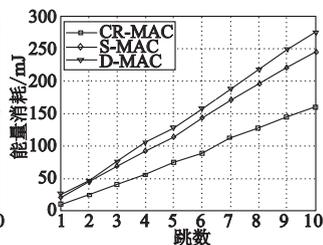


图 8 节点每跳能量消耗量

图 8 同样表示的是 10 个节点组成的无线传感器网络,数据从第一个节点传送到最后一个节点,每一跳传输所有节点消耗的总能量。同样分别应用 CR-MAC、S-MAC、D-MAC 三种不同的 MAC 层协议进行试验,得出不同的结果。通过比较可以看出,随着跳数的增加,网络消耗的能量也在不断增加,采用了预约机制的 CR-MAC 协议的能量消耗增加的幅度明显低于其他两种 MAC 协议;同时从曲线的斜率可以看出,CR-MAC 协议能量消耗的增加速度明显低于其他方法,因为随着跳数的增多,其节能效果会更加显著。

通过以上两个方面的比较可以看出,CR-MAC 协议在节能和减少延时方面优于 S-MAC 和 D-MAC 协议,能够很好地提高无线传感器网络的性能。

### 4 结束语

本文提出了一种基于信道预约的 MAC 协议 CR-MAC,该协议是在 S-MAC 协议的基础上,通过信道预约机制,合理地安排数据的传输,减少不必要的空闲侦听和串音干扰,在一定程度上降低了无线传感器网络中节点的能量消耗,减少了多跳传输中的延时,提高了网络的生命周期,对无线传感器网络的发展具有一定的现实意义。

#### 参考文献:

[1] AKYILDIZ F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422. (下转 2723 页)

## 4.2 实验结果分析

通过分别进行以下两组实验,分析比较自适应蚁群算法在求解无线传感器网络 QoS 路由优化问题上的优势。

**实验 1** 该实验中无线传感器网络采用如图 1 所示的长链式拓扑结构,网络中含有相同的节点数,通过分别多次运行基本蚁群算法和自适应蚁群算法求解最优 QoS 路径的程序,得出两算法求得最优解时迭代次数的比较图,如图 4 所示。其中基本蚁群算法需要大概迭代 70 次才能得出最优解,而自适应蚁群算法仅需迭代 30 次左右即能求得最优路径,且每次所需迭代次数波动较为平缓。在同等大小的网络规模中改进后的蚁群算法大大地节省了最优路径的搜索时间,得出的最优路径需要消耗的网络资源较少,从而保证在传输数据的过程中,网络时延小且数据包接收的成功率较高。实验验证了该算法在长链型无线传感器网络 QoS 路由优化的过程中是高效的,得出的最优 QoS 路径满足了输电线路监测系统实时性和可靠性的要求。

**实验 2** 在实验 1 的基础上,通过逐渐增加传感器节点的个数来改变无线传感器网络规模的大小,在扩展后的网络拓扑结构中采用基本的蚁群算法和自适应蚁群算法分别求解满足 QoS 约束的最优路径。在规模大小不同的传感器网络中分别运行两算法求解最优路径,得出如图 5 所示的算法运行时间与传感器节点个数的关系图,即当传感器节点个数较少时,自适应蚁群算法求解效率略优于基本蚁群算法;随着传感器节点个数的增加,改进的蚁群算法运行效率明显优于基本蚁群算法。实验证明,自适应蚁群算法在无线传感器网络规模较大的情况下仍然能快速准确地找到满足约束的最优 QoS 路径,缩短了数据传输路径的寻优时间,搜索最优解的能力较强。该算法对长链型无线传感器网络 QoS 路由优化时具有明显的优势,能够满足输电线路监测对无线传感器网络服务质量的要求。

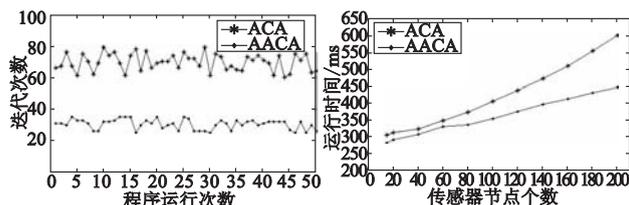


图4 两算法得到最优解迭代次数比较

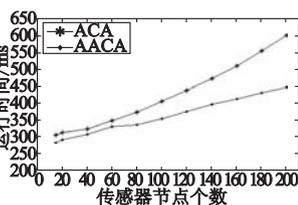


图5 节点个数与算法运行时间的关系

根据以上实验结果可知,在长链型无线传感器网络多约

束 QoS 路由优化的过程中,本文采用自适应蚁群算法与基本蚁群算法相比,具有较高的路径寻优效率,减少了路径搜索过程中陷入局部最优的可能性。当无线传感器网络规模很大时,该算法也能高效地得出最优解,且求得的最优数据传输路径能够满足跳数少、时延小及收包率高等网络服务质量的要求。

## 5 结束语

本文以输电线路监测为应用背景,针对系统对无线传感器网络实时性和可靠性要求较高的特点,抽象出长链型无线传感器网络 QoS 路由模型,采用自适应蚁群算法来求解满足网络带宽、时延和包成功到达率等约束的最优路径。通过仿真实验表明,改进后的算法通过自适应地调整信息挥发因子能够快速准确地找到满足 QoS 约束的最优路径,有效地解决了长链型无线传感器网络 QoS 路由优化问题,因此该算法在大规模无线传感器网络的实际应用中较基本蚁群算法具有显著的优势。

## 参考文献:

- [1] 黄新波. 输电线路在线监测与故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- [2] MOSTOFI Y, MURRAY R. New design principles for estimation over fading channels in mobile sensor networks[C]//Proc of the 44th Conference on Automatic Control. 2005.
- [3] DORIGO M, MANIEZZO V, COLONI A. Ant system: optimization by a colony cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics, 1996, 26(1):2941.
- [4] WANG Zheng, CROWCROFT J. Quality of service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7):1228-1234.
- [5] 肖伟,全惠云,刘枫. 基于蚁群算法的多路径多约束 QoS 路由研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(30):111-113.
- [6] CHEN Shi-gang. Routing support for providing guaranteed end-to-end quality-of-service[D]. Illinois: University of Illinois, 1999.
- [7] 刘海涛,张宝贤,高雪,等. 基于监测可靠度的直线型带状无线传感器网络部署方法: 中国, 200810061195. 5[P]. 2008-11-12. www.cnpatentinfo.com/ipc/dttx\_H04Q\_detail\_200810061195.html.
- [8] 李士勇,陈永强,李研. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [9] STUTZLE T, HOOS H H. Max-min ant system[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(19):889-914.

(上接第 2719 页)

- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:58-61.
- [3] WANG Ying, LI Tong, XIONG Mu-di. Performance analysis of CSMA with preamble sampling for multi-hop wireless sensor networks[C]//Proc of the, 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications. 2006:921-924.
- [4] SHAFIULLAH G M, THOMPSON A, WOLFS P J. Energy-efficient TDMA MAC protocol for wireless sensor networks applications[C]//Proc of International Workshop on Internet and Distributed Computing Systems. 2008: 85-90.
- [5] 张晔,何晨,蒋铃鸽. 无线传感器网络中的 S-MAC 协议性能[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(7):1023-1026.
- [6] 王丽侠,赵磊,徐家品. WSN 中 S-MAC 协议的能耗分析及改进[J]. 微计算机信息, 2008, 24(5):281-283.

- [7] VAN DAM T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM press, 2003:171-180.
- [8] LU G, KRISHNAMACHARI B, RAGHAVENDRA C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks[C]// Proc of the 4th International Workshop on Algorithms for Wireless Mobile, Ad hoc and Sensor Networks. 2004:224-231.
- [9] HOU Bi-chong, ZHU Gang. An improved MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc of 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:76-79.
- [10] RAJENDRAN V, OBRACZKA K. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2006, 12(1):63-78.