

# 利用发送和接收时隙分配策略 改善无线传感器网络 MAC 协议能效\*

解瑞云<sup>1</sup>, 马同伟<sup>1</sup>, 海本斋<sup>2</sup>

(1. 河南机电高等专科学校 计算机科学与技术系, 河南 新乡 453000; 2. 武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 针对无线传感器网络中存在数据冲突和串音而影响 MAC 协议能量效率的问题, 提出了基于接收和基于发送的 TDMA-MAC 协议时隙分配策略。通过考虑各种无线收发器模式(即发送、接收、休眠和空闲)花费的不同时间段来计算 WSN 能耗, 假设聚类中 WN 数据包时间间隔为指数分布, 采用两级 TDMA 方法实现对多步聚类的评估。利用 OPNET Modeler 软件执行仿真实验验证了该模型的有效性, 仿真结果表明, 基于接收的 SAS 能效是基于发送的 SAS 的 5 倍, 相比基于分簇的 TDMA/CDMA 混合 HCT-MAC 协议, 该协议可节省 4.3% 的能量, 减少了 0.35 ms 的端到端延迟, 相比倍增超周期多信道 MAC 协议, 可节省 10.8% 的能量, 减少了 1 ms 的端到端延迟。

**关键词:** 无线传感器网络; 时隙分配策略; MAC 协议; 能量效率; 串音

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2016)02-0562-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2016.02.056

## Research of improving energy efficiency of MAC protocol in wireless sensor network using SAS based on transmit and receive

Xie Ruiyun<sup>1</sup>, Ma Tongwei<sup>1</sup>, Hai Benzhai<sup>2</sup>

(1. Dept. of Computer Science & Technology, Henan Mechanical & Electrical Engineering College, Xinxiang Henan 453000, China;  
2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** For the issue that data conflict and overhearing existing in wireless sensor network will impact energy efficiency of the MAC protocol, this paper proposed a transmit-based and receive-based slot allocation strategy of TDMA-MAC. It calculated the energy consumption of WSN by considering different times of cost of wireless transceiver pattern (sending, receiving, dormancy and leisure). Suppose WN packet interval in clustering was exponential distribution, two-stage TDMA method was used to implement the evaluation of multi-step clustering. It verified the effectiveness of proposed model by simulation done by OPNET Modeler. Simulation results show that the energy efficiency of receive-based SAS is five times as well as transmit-based. Proposed protocol saves 4.3% energy and reduces 0.35 ms delay comparing with hybrid TDMA/CDMA protocol based on clustering. It saves 10.8% energy and reduces 1 ms delay comparing with hybrid TDMA/CDMA protocol based on clustering.

**Key words:** wireless sensor network (WSN); slot allocation strategy; MAC protocol; energy efficiency; overhearing

现今,无线传感器网络(WSN)已在日常生活的许多领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。由于 WSN 无线节点(wireless node, WN)能耗决定网络寿命,基于时隙的介质访问控制(media access control, MAC)协议中用于优化节点能耗的时隙分配策略非常重要<sup>[2]</sup>,所以,对于应用程序设计者来说,能有合适的最佳时隙分配策略(slot allocation strategies, SAS)显得非常重要<sup>[3]</sup>。本文利用 TDMA-MAC 的多跳无线网络中基于发送和基于接收的时隙分配策略,在基于发送的 SAS 中,将时隙分配到节点以发送它们的数据包,在基于接收的 SAS 中,将时隙分配到节点以接收它们的数据包。以分析模型的方式评估了两种策略对 WN 能耗的影响,此外,使用 OPNET Modeler 仿真软件开发、建模和仿真了两种 SAS 的网络实例,验证了本文方法的可靠性。实验结果表明,多跳网络拓扑中基于接收的 SAS 比基于发送的 SAS 能效更高,两种策

略可提供几乎相同的吞吐量和数据包延迟。

### 1 相关研究

由于应用程序通常有各种规格和需求,仅使用标准类型 WSN MAC 协议还不能满足大范围应用程序<sup>[4]</sup>,所以,学者们提出了许多 WSN MAC 的动态设计策略,从而满足高苛刻用户需求。

文献[5]提出了一种分布式、高效节能的通信协议,利用数据聚合技术,以聚类的方式组织节点,由根节点与基站直接通信,一定程度上提高了无线传感器网络的节能性能。文献[6]提出了多跳路由能量控制协议,提高了无线传感器网络数据传输的可靠性,研究表明,可以随机生成不同长度的数据包

**收稿日期:** 2014-11-11; **修回日期:** 2014-12-29      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61103143);河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A520085);河南省教师教育课程改革项目(2014-JSJYYB-026)

**作者简介:** 解瑞云(1980-),女,河南商丘人,讲师,硕士,主要研究方向为传感器网络、网络安全等(xieryhnx@126.com);马同伟(1979-),男,河南浚县人,讲师,硕士,主要研究方向为传感器网络、云计算等;海本斋(1980-),男(回族),河南新乡人,讲师,博士研究生,主要研究方向为传感器网络、复杂系统建模等。

以降低 WSN 的能量消耗,从而延长网络寿命。文献[7]提出了一种高效的算法,根据各节点剩余能量大小和簇成员数控制簇的形成,使簇头之间通过多跳合作的方式与基站进行通信,从而使网络能量均匀消耗,一定程度上延长了网络寿命,但是,该算法的工作效率不高。拥塞窗口随源节点的传输层而调节,慢启动阈值是基于接收到的信息(路径带宽、延迟以及明确的拥塞通知)而设置的<sup>[8,9]</sup>。文献[10]提出了一种基于邻居节点拥塞度的区域拥塞检测方法和基于网络编码的拥塞感知可靠路由协议,合理地避免了拥塞,提高了数据成功转发率,然而,能耗增加降低了无线传感器网络的寿命。

最近,学者们热衷于增加 WSN 能效,设计专用 MAC 协议,例如,文献[11]设计了一种倍增超周期多信道 MAC 协议,以 TDMA(time division multiple access)机制为基本原理,结合可灵活配置的混合型信道访问机制,能够有效提高网络吞吐量和信道利用效率。文献[12]提出了一种新的自适应混合 MAC 协议 TC<sup>2</sup>-MAC,采用了基于二叉树结构的时隙块分配策略和基于时隙约束的 CSMA/CA 竞争接入方式,能够为不同传感器节点或不同类型业务的差异性 QoS 需求提供良好支持,并能够通过灵活的信息调度机制改善信道接入公平性,提高网络效率。为了进一步提升异步无线传感器网络 MAC 协议在动态网络负载下的性能,文献[13]提出了一种流量自适应的异步协议,该协议基于短前导序列采样技术,当节点收到数据后并不理解转入睡眠而自适应增加若干个最短侦听时间用于接收发送节点的可能其他数据,使得收发双方在网络负载较重时能实现一次配对多次收发数据,然而,该协议中存在空闲侦听和数据碰撞等能耗问题。针对该问题,文献[14]提出了一种基于分簇的 TDMA/CDMA 混合的 HCT-MAC 协议,较好地解决了低时延和冲突干扰问题,其簇内节点采用 TDMA 机制进行信道分配,避免碰撞串扰问题,从而实现低延迟快速上传数据。

上述基于 TDMA 的 MAC 协议中,通常将时间划分为固定长度时隙,在中心节点分配的时隙可用时,节点调度其感知的数据,取得了较好的节能性能。受文献[11,14]启发,为了更好地改善 WSN 的 MAC 协议能效,本文提出了基于发送和基于接收的时隙分配策略的分析和仿真模型。

## 2 相关技术

### 2.1 基于接收的时隙分配策略

对于基于接收的 SAS<sup>[15]</sup>,同一路由的时隙分配表(slot allocation table, SAT)如图 1 所示,给定聚类中,当 WN<sub>2</sub> 想要发送其数据包给 WN<sub>7</sub> 时,它在 WN<sub>7</sub> 的接收时隙清醒,即第 7 时隙,在该时隙转达数据包,从 WN<sub>2</sub> 得到数据包后,WN<sub>7</sub> 在专用接收时隙将其转达给 WN<sub>5</sub>,即第 5 时隙。同一过程通过预定路由应用于其他 WN,直到数据包到达目的地。表 1 所示为 TDMA-MAC 中基于发送和基于接收的 SAS 的比较。

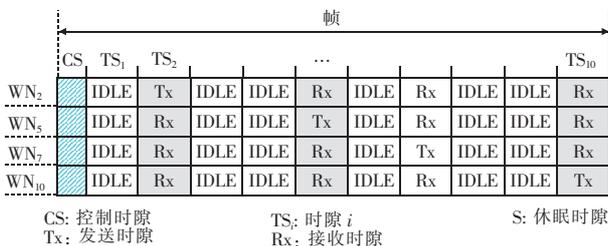


图 1 基于接收的 SAS 的 SAT

表 1 TDMA-MAC 协议的 SAS 比较

	基于接收的 TDMA-MAC	基于发送的 TDMA-MAC
接收/发送时隙分配	根据路由协议	恒定时隙
接收时隙	预确定	依赖其他用户
发送时隙	依赖其他用户	预确定
时隙分配策略	基于接收	基于发送
帧中清醒时间	接收、发送和控制时隙	所有时隙
Qos 支持	可用	可用
吞吐量性能	高	高
能效	高	低

### 2.2 基于发送的时隙分配策略

对于基于发送的 SAS<sup>[16]</sup>,给定聚类的 SAT,如图 2 所示。该策略中,由于 WN 不知道关于其他 WN 的数据包发送时隙的信息,它们一直在空闲模式处于等待状态。如果信道中感知到数据包,则切换到接收模式,所以,所有 WN 必须监听信道是否任一数据包到达它们,而空闲监听造成了巨大的能量浪费。例如,当 WN<sub>2</sub> 想要发送其数据包给 WN<sub>7</sub> 时,它等待,直到发送时隙,从而转达数据包,即第 2 时隙,那么,从 WN<sub>2</sub> 发送的数据包不仅由 WN<sub>7</sub> 接收,而且由其他 WN 在同一时间不必要的接收。数据包发送过程通过预定路由应用于其他 WN,直到数据包到达目的地。

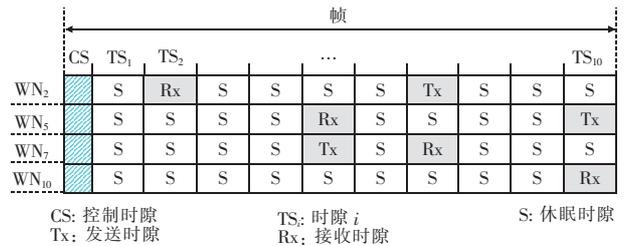


图 2 基于发送的 SAS 的 SAT

## 3 提出的时隙分配策略能耗分析和仿真模型

通过考虑各种无线收发器模式(即发送、接收、休眠和空闲)花费的不同时间段来计算 WSN 能耗,这些时间段依据适用的潜在网络拓扑、时间 SAS(要么基于接收要么基于发送)和网络负载而变化。发送和接收模式中,WN 收发器将数据包广播到信道,从信道获取它们。空闲模式中,WN 既不发送也不从信道发送任何数据包,但可以监听任何有关激活的信道。而在休眠模式中,WN 关掉其收发器,不关注信道活动。

为了评估多跳 WSN 拓扑的基于发送和基于接收的 SAS 的 WN 能耗,下文给出了详细的分析和仿真模型,这些模型计算了包括 N 个无线传感器节点的聚类性能指标。

### 3.1 多跳网络拓扑中基于接收的时隙分配策略

多跳 WSN 拓扑中,数据包通过一个或多个 WN 发送到 CN,如果 WN 仅在数据发送时隙清醒,则可增加 WN 能效,很明显,只有那些事先已知其他 WN 接收时隙的 WN 才有可能。

WSN 中,MAC 设计为基于接收的策略,因为没有 CN 分配时隙给 WN,其中一个 WN 扮演 CN,自己执行时隙分配。然后,所有 WN 获悉它们可接收数据包的时隙,期望 WNs 在这些时隙中执行它们的通信。因此,WNs 仅在接收、发送和控制时隙清醒,否则,通过切换到休眠模式节省能量。本文模型中,假设聚类中 WN 数据包时间间隔为指数分布,所有的分析仅基于一个聚类(即聚类之间的网络不包括在仿真和分析模型中),采用两级 TDMA 方法<sup>[17]</sup>可以很容易实现对多步聚类的评估。

### 3.1.1 基于接收的时隙分配策略的 WN 能耗分析模型

为了计算预定义聚类中 WN 的总平均能耗,从而更好地评估关于传输( $\bar{E}_{Tx}$ )、接收( $\bar{E}_{Rx}$ )、空闲( $\bar{E}_{idle}$ )和休眠( $\bar{E}_{sleep}$ )状态的平均能耗,任意 TDMA 帧期间,接收模式中 WN 的瞬时能耗如下所示:

$$E_{Rx} = T_d Q_M(m) P_{Rx} \quad (1)$$

式中: $Q_M(m)$ 和  $m$  分别表示由源产生的数据包数的概率密度函数和一中到达 WN 的瞬时数据包数; $T_d$ 和  $P_{Rx}$  分别表示数据传输时间和接收模式消耗的平均能量。因为 WN 的数据包接收概率等于网络中另一个 WN 的数据包发送概率,源 WN 的数据包接收概率可由平均负载为  $G$  的泊松分布表示:

$$Q_M(m) = \frac{e^{-G} G^m}{m!} \quad (2)$$

负载可描述为一个时隙期间由源 WN 产生的数据包数,因此,数据包接收状态中 WN 的平均能耗可由下式计算:

$$\bar{E}_{Rx} = T_d G P_{Rx} \quad (3)$$

式中, $T_d$  为

$$T_d = \frac{\text{数据包长度}}{\text{数据传输率}} \quad (4)$$

类似地,数据包发送状态中 WN 的平均能耗如下所示:

$$\bar{E}_{Tx} = T_d G P_{Tx} \quad (5)$$

在基于接收的 SASs 中,空闲状态仅可能在数据包发送后,平均能耗可表示为

$$\bar{E}_{idle} = (T_s - T_d) G P_{idle} \quad (6)$$

式中: $T_s$  表示时隙持续时间。因为休眠时间等于除了接收和发送时隙的时隙总和,故这个模式中能耗为

$$\bar{E}_{sleep} = (n - 2) T_s P_{sleep} \quad (7)$$

式中: $n$  表示一帧中时隙数。

因此,一帧时间内由 WN 消耗的总平均能量为

$$\bar{E}_F = (\bar{E}_{Rx} + \bar{E}_{Tx} + \bar{E}_{idle} + \bar{E}_{sleep}) \quad (8)$$

如果负载是归一化的,则一帧中由 WN 消耗的总平均能量为

$$\bar{E}_F = \begin{cases} E_F^- & G \geq 1 \\ E_F^- G & G < 1 \end{cases} \quad (9)$$

因此,仿真时间内总能耗为

$$\bar{E}_T = \sum_{i=1}^{T_F} \bar{E}_F(i) \quad (10)$$

式中: $T_F$  表示一段时间内总帧数。

### 3.1.2 基于接收的时隙分配策略的 WN 能耗仿真模型

多跳网络拓扑中,由于网络中所有的 WN 都不能建立与 CN 的直接连接,通常将总通信区域划分为聚类,且每个聚类中必须有一个专门的 WN 分配时隙给聚类中的其他成员。因此,假设聚类中其中一个 WN 为临时 CN,执行基于接收的时隙分配,关于该假设,本文在基于接收的时隙分配策略基础上建模了潜在无线网络场景。本研究通过使用 OPNET Modeler 软件开发仿真模型,所用 MAC 处理模型的状态和变换如图 1 所示。由于 OPNET 仿真软件是事件驱动的,初始化定义变量,初始状态分配初值后,进程进入空闲状态,等待表示新事件发生的中断。排队状态中,首先将 WN 的源和目的信息加入到上层数据包,将它们放置到队尾。如果一个数据包在接收状态中由 WN 接收,首先,确定它是否属于这个 WN,如果属于,更新统计值,销毁数据包,否则,立即丢弃数据包。在目的 WN 数据包接收的分配时隙开始,进程进入发送状态,如果队列中有数据包就

绪,则 WN 广播它,否则,进程返回空闲状态。除了传输和接收状态,进程均处于休眠状态,如图 3 所示。

### 3.2 多跳网络拓扑中基于发送的时隙分配策略

多跳 WNS 拓扑中,通过彼此之间数据包传输执行 WN 之间的通信,因此,使用基于发送的 TDMA-MAC 协议时,除了发送时隙,不知道其待接收数据包时隙的 WN 必须监听一帧中所有时隙的无线信道。

#### 3.2.1 基于发送的时隙分配策略的 WN 能耗分析模型

类似于基于接收的 TDMA-MAC,为了计算 WN 的总平均能耗,分别评估发送( $\bar{E}_{Tx}$ )、接收( $\bar{E}_{Rx}$ )、空闲( $\bar{E}_{idle}$ )和休眠( $\bar{E}_{sleep}$ )状态上的平均能耗。任意 TDMA 帧内,每个模式中 WN 的平均能耗表示为

$$\bar{E}_{Rx} = (n - 1) T_d G P_{Rx} \quad (11)$$

$$\bar{E}_{Tx} = T_d G P_{Tx} \quad (12)$$

$$\bar{E}_{idle} = (n - 1) (T_s - T_d) G P_{idle} \quad (13)$$

$$\bar{E}_{sleep} = (T_s - T_d) G P_{sleep} \quad (14)$$

所以,分别使用式(8)~(10)能计算这段时间 WN 消耗的总平均能量、一帧中由 WN 消耗的归一化总平均能耗和仿真时间进程中的总能耗。

#### 3.2.2 基于发送的时隙分配策略的 WN 能耗仿真模型

使用 OPNET Modeler 开发采用基于发送的 TDMA-MAC 协议的仿真模型,所有的 WN MAC 的处理模型如图 4 所示。初始状态中,定义状态变量并分配初值。空闲状态中,等待中断发生。排队状态中,首先将 WN 的源信息和目的信息添加到上层数据包,将它们列在队尾。如果接收状态中由 WN 接收的数据包注定为这个 WN,则在统计更新后销毁它,否则,立即丢弃数据包。每个时隙开始时,进程进入发送状态,如果队列中有数据包就绪,则由 WN 广播,如果队列中没有数据包或所有数据包已在发送状态发送,则 WN 切换到休眠状态。

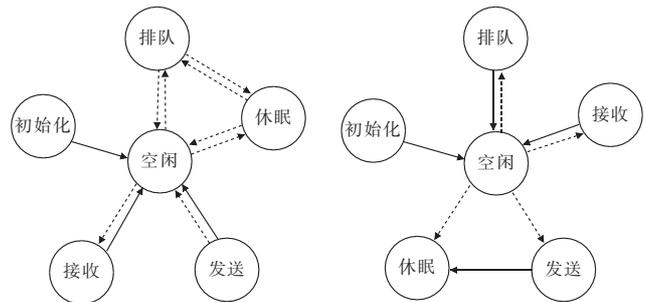


图 3 基于接收的 TDMA-MAC 的 OPNET 协议仿真模型

图 4 基于发送的 TDMA-MAC 的 OPNET 仿真模型

## 4 实验

### 4.1 仿真环境

使用开发的仿真模型为基于接收和基于发送的 SAS 执行 WN 的能耗评估。这些模型中,假设通过预定义 WN 之间的同一通信路由执行数据包传输,对于图 5 所示的聚类中两种 SAS,假设聚类中所有 WN 固定且同步,第一个清醒的 WN 分配为聚首,然后为其他 WN 分配时隙,同时避免冲突,默认情况下,定义的任何 WN 仅与另一个通信。假设聚类 1 中  $WN_2$  和其他聚类中一个 WN 分别为源节点和目的节点,因此, $WN_2$  中生成的数据包通过  $WN_7$ 、 $WN_5$ 、 $WN_{10}$  传送,最后,以多跳方式到达其他聚类中一个 WN。

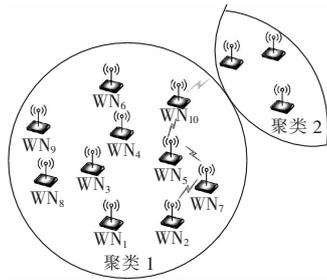


图 5 实例潜在网络场景

对于使用 OPNET Modeler 和分析模型实现的仿真模型的性能评估,考虑 MICAz WM 的规格,从而拥有几乎真实的网络条件。仿真结果取自基于接收和基于发送的策略的同一节点(即  $WN_5$ ),仿真模型的其他参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	值	参数	值
WNs 数	10	数据包到达时间间隔	指数分布
一帧中时隙数	10	拓扑	多跳/集中式
仿真时间	1 h	$P_{idle}$	60 $\mu$ W
平均提供的负载	0.1/1.5 数据包/时间	$P_{Tx}$	52.2 mW
时隙	50 ms	$P_{Rx}$	59.1 mW
数据率	250 kbps	$P_{sleep}$	3 $\mu$ W
数据包大小	50 Byte		

### 4.2 仿真结果

图 6 表示利用基于接收的 SAS 或基于发送的 SAS 的实例网络模型中 WN 的能耗图,两种模型中,当 WN 所能提供的负载低于 1 数据包/时隙时,WN 能耗随着提供的负载而增加,否则,它不会改变,不管提供的负载如何变化,基于发送的策略保持 6.29 J,基于接收的策略保持 1.31 J。从图 6 可以看出,当提供的负载为 0.1 数据包/时隙时,基于发送和基于接收策略的对应 WN 的能耗分别为 0.71 J 和 0.13 J,提供的负载以 0.1 增量从 0.1 增加到 1 数据包/时隙时,两种策略的 WN 能耗几乎呈线性增加。当提供的负载达到 1 数据包/时隙时,基于发送和基于接收的策略的 WN 能耗值分别设为 6.92 J 和 1.31 J。因此,基于接收的 SAS 是基于发送的 SAS 的 5.28 倍还多。

图 7 所示为基于发送和基于接收的 SAS 的用于每个网络场景中的预定义 WN 的吞吐量情况,对于提供负载不足 1 数据包/时隙的 WN,吞吐量依据提供的负载增加,当提供的负载以 0.1 的增量从 0.1 增加到 1 数据包/时隙时,两种策略的 WN 的吞吐量几乎线性增加,提供的负载达到 1 数据包/时隙时,两种策略的 WN 的吞吐量均能在 1 稳定。

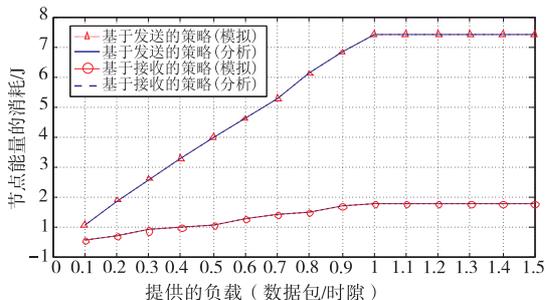


图 6 WN 能耗与负载的关系

从图 7 可以看出,改变提供的负载条件下网络场景中所选 WN 的吞吐量几乎相同,该图对正确理解和解释图 6 中呈现的结果非常必要,从而在同等情况下评估两个模型,验证了文本模型的有效性。

图 8 表示同一网络场景下基于发送和基于接收的策略中

WN 的能耗与吞吐量之间的关系。

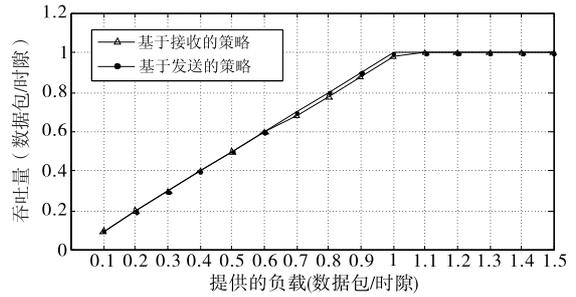


图 7 吞吐量与负载的关系

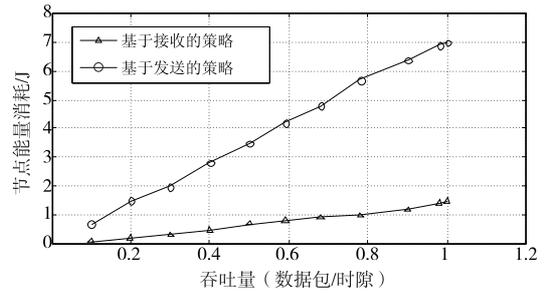


图 8 节点能耗与吞吐量的关系

从图 8 可以看出,对于同一吞吐量值,基于接收的 SAS 的能效比基于发送的 SAS 的高,可以推出,多跳网络拓扑中基于接收的 SAS 的能效至少是基于发送的 SAS 的五倍。考虑这项重要的结果,任意 MAC 设计者将会在无线多跳网络应用程序中使用并运用基于接收的策略,尤其是想要增加网络寿命时。

图 9 所示为从基于发送和基于接收的 SAS 获得的平均端到端延迟 (EED)。从图 9 可以看出,对于两种策略,WN 的 EEDs 几乎在各种负载条件下均相同。

图 7 和 9 清晰地表明,虽然采用基于发送策略和基于接收策略产生了相同的吞吐量和延迟性能,但后者的能效至少是前者的五倍。

### 4.3 性能比较

为了更好地体现本文模型的优越性,将基于接收的 SAS 与其他文献中的模型进行比较,包括节能比较、吞吐量比较和端到端延迟比较。

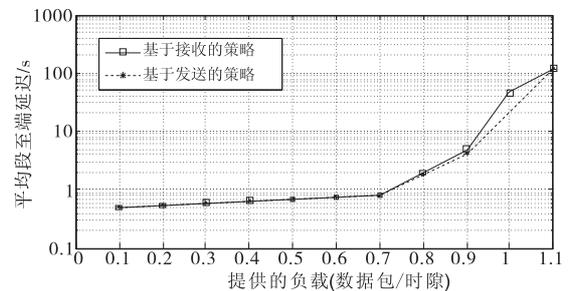


图 9 平均端到端延迟与负载的关系

#### 4.3.1 节能比较

首先,将本文模型的节能性能与文献[7,11,12,14]提出的模型进行比较,初始能量设为 100 J,记录了各个模型 100 s 内的剩余能量,比较结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,初始阶段,所有机制都具有 100 J 能量,计算结束时,相比文献[7,11,12,14]提出的机制,本文模型分别节省了 10.8%、8.6%、5.4%、4.3% 的能量,由于本文模型中没有 CN 分配时隙给 WN,其中一个 WN 扮演 CN,自己执行时隙分配,且 WN 仅在接收、发送和控制时隙清醒,否则,通过

切换到休眠模式,大大地节省了能量。

表 3 节能比较

时刻/s	剩余能量/J				
	文献[11]	文献[7]	文献[12]	文献[14]	本文模型
0	100	100	100	100	100
10	95	96	98	98	99
25	93	93	95	96	97
50	92	90	93	94	96
75	88	87	91	92	95
100	83	85	88	89	93

### 4.3.2 吞吐量比较

表 4 所示为各个模型的吞吐量比较。

表 4 吞吐量对比

时刻/s	数据包/Byte				
	文献[11]	文献[7]	文献[12]	文献[14]	本文模型
0	0	0	0	0	0
10	1233	2233	1432	1957	3987
25	7897	8797	3245	5960	8907
50	11322	12322	7898	10491	14343
75	13773	16773	14879	15832	17889
100	20243	23243	21233	22795	24569

从表 4 可以看出,本文模型的吞吐量为 24 569 个数据包,高于其他几种模型,再次表明了本文模型的优越性。

### 4.3.3 延迟比较

此外,记录了各个模型 100 s 内的延迟情况,比较结果如表 5 所示。

表 5 延迟比较

时刻/s	延迟/ms				
	文献[11]	文献[7]	文献[12]	文献[14]	本文模型
0	0	0	0	0	0
10	0.33	0.15	0.35	0.35	0.19
25	0.89	0.22	0.71	0.48	0.22
50	1.21	0.32	0.82	0.52	0.26
75	1.31	0.53	0.95	0.65	0.44
100	1.46	0.67	1.22	0.82	0.47

从表 5 可以看出,本文模型获得了最小的延迟,比基于分簇的 TDMA/CDMA 混合的 HCT-MAC 协议减少了 0.35 ms 的延迟,甚至比文献[11]提出的模型减少了 1 ms 的延迟,本文模型执行仿真时,假设聚类中 WN 数据包时间间隔为指数分布,所有的分析仅基于一个聚类,即聚类之间的网络不包括在仿真和分析模型中,降低了网络延迟,比较结果足以表明本文模型在降低延迟方面的优越性。

## 5 结束语

为了改善 WSN 的 MAC 能量效率,提出了一种基于发送的 SAS 和基于接收的 SAS,在基于发送的 TDMA 系统中,由于 WN 不知道数据包的接收时隙,故必须持续监听信道,所以,不必要的信道监听导致 WNs 有效能量的过度使用,从而减少了网络生存时间。而基于接收的 TDMA 系统中,由于 WN 仅在数据包接收时打开它们的发送器,并发送和控制时隙,其独特的策略使无线节点能耗效率相当高。在 WSN 网络场景中对基于发送和基于接收的 SAS 分析模型进行了仿真,清晰地表明,在保证较低吞吐量的情况下,基于多跳网络的 TDMA 中采用基于

接收的 SAS 的能效是基于发送的 SAS 的五倍。此外,为了验证仿真模型,还将本文模型与其他几种较为先进的模型进行比较,表明了本文模型的优越性。未来会将本文模型应用于其他的网络场景中,结合新颖的技术进行更多的实验,通过改变初始参数设置,进一步提高本文模型的能量效率。

### 参考文献:

- [1] 张希伟,戴海鹏,徐力杰,等. 无线传感器网络中移动协助的数据收集策略[J]. 软件学报,2013,24(2):198-214.
- [2] Abichar Z, Chang J M. Group-based medium access control for IEEE 802.11n wireless LANs [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2013,12(2):304-317.
- [3] Kim J, Jung J, Kim E, et al. Additional bump slot allocation scheme for QoS guarantee of urgent messages in TDMA-based tactical wireless networks [C]//Proc of the 15th International Conference on Advanced Communication Technology. [S. l.]:IEEE Press,2013:439-444.
- [4] 王换招,孟凡治,李增智. 高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议[J]. 软件学报,2010,21(12):3124-3137.
- [5] Sharma K K, Singh D H, Patel D R B. A hop by hop congestion control protocol to mitigate traffic contention in wireless sensor networks[J]. Proceedings of International Journal of Computer Theory and Engineering,2010,2(6):1793-8201.
- [6] 杨靖,熊伟丽,秦宁宁,等. 用于无线传感器网络的高能效数据收集算法[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,41(6):1720-1725.
- [7] Ehsan S, Hamdaoui B. A survey on energy-efficient routing techniques with QoS assurances for wireless multimedia sensor networks [J]. Communications Surveys & Tutorials,2012,14(2):265-278.
- [8] Feng Renjian, Guo Xiaolei, Yu Ning, et al. Robust multihop localization for wireless sensor networks with unreliable beacons [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2012,13(2):223-231.
- [9] Shafiullah G M, Azad S A, Ali A B M S. Energy-efficient wireless MAC protocols for railway monitoring applications [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems,2013,14(2):649-659.
- [10] 付彬,李仁发,刘彩苹,等. 无线传感器网络中一种基于网络编码的拥塞感知路由协议[J]. 计算机研究与发展,2011,48(6):991-999.
- [11] Tang Lei, Sun Yanjun, Gurewitz O, et al. PW-MAC: an energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Proc of IEEE INFOCOM. [S. l.]:IEEE Press,2011:1305-1313.
- [12] 陈存香,何遵文,贾建光,等. TC<sup>2</sup>-MAC:一种无线传感器网络自适应混合 MAC 协议[J]. 通信学报,2014,35(4):91-102.
- [13] 陈德富,陶正苏,朱建平. 一种自适应侦听的异步无线传感器网络 MAC 协议[J]. 电子与信息学报,2011,33(6):1290-1293.
- [14] Khan B M, Bilal R. High quality of service and energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks [M]//Inter-cooperative Collective Intelligence: Techniques and Applications. Berlin:Springer,2014:315-348.
- [15] Wang Y T. Hierarchical genetic algorithm for dynamic time slot allocation in TD-CDMA TDD systems [J]. Expert Systems with Applications,2011,38(8):9084-9095.
- [16] Zheng Di, Yao Yudong. Throughput performance evaluation of two-tier TDMA for sensor networks [C]//Proc of IEEE Sarnoff Symposium. [S. l.]:IEEE Press,2009:1-5.
- [17] 丁锐,郑龙,王玉文,等. 动态 TDMA 时隙分配算法在数据链中的仿真[J]. 通信技术,2011,44(2):105-107.