

# 基于模糊逻辑算法的无线医疗体域网 MAC 协议研究

卢先领 彭能明 徐保国

(江南大学物联网工程学院 无锡 214122)

**摘要** 针对无线医疗体域网的能量受限问题,提出了一种利用模糊逻辑控制理论来减少单个节点射频装置工作频次的 MAC 协议——FL-MAC。该协议通过模糊逻辑算法过滤掉网络中需要发送的正常生理信息,减少数据流量,保证时隙的引入,确保对突发事件的及时处理。仿真结果表明,该协议相比于 ASCEMAC 和 DQBAN-MAC 等模糊逻辑协议,延长了网络节点的生命周期,降低了整个网络的时延。

**关键词** 无线医疗体域网,模糊逻辑理论,能量受限

**中图分类号** TP393.04 **文献标识码** A

## Research of MAC Protocol for Wireless Medical Body Area Network Based on Fuzzy Logical Algorithm

LU Xian-ling PENG Neng-ming XU Bao-guo

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract** To solve the problem of energy-constrained in wireless medical body area network(WMBAN), a novel MAC protocol——Fuzzy Logical MAC (FL-MAC), which uses fuzzy logical control theory to reduce the frequency of the node's radio, was proposed. Fuzzy logical algorithm was used to filter the normal messages that need to be sent and reduce the data traffic in the network. Meanwhile, the addition of guard time slot (GTS) ensured the unexpected events could be handled in time. Simulation results show that this protocol provides better performance than other fuzzy logical protocol such as Asynchronous Energy-efficient MAC (ASCEMAC) and Distributed Queuing Body Area Network MAC (DQBAN-MAC) both in node's lifetime and the latency of whole network.

**Keywords** Wireless medical body area network, Fuzzy logical theory, Energy-constrained

## 1 引言

无线医疗体域网(Wireless Medical Body Area Network)作为无线体域网(Wireless Body Area Network)在医疗应用领域的一个重要分支,已被广泛用于对人体各项生理信息的长期实时监测。通过对数据的提取、处理和分析,实现对人体健康状况的实时评估、早期预警和长期跟踪,达到以预防为主、无病自诊以及日常监护的目的<sup>[1]</sup>。与传统的无线网络不同,体域网以人体中心的特点使整个网络的规模(通常由 10~20 个特定传感器节点组成)和通信距离(通常为 5m 以内)都极为有限,网络结构多采用星型拓扑和单跳通信模式。组成 WMBAN 的传感节点有置于人体体表的各类穿戴式设备(如 ECG、EMG 等),也有置于人体体内的各种植入式设备(如内窥镜、胰岛素泵等)等,很多节点更换电池极为不便,因而该网络对节点的能耗要求更为严格。所以,最大限度地提高单个节点的能量效率以延长其生命周期在 WMBAN 中显得尤为重要。而 MAC 协议直接控制射频模块,对节点功耗具有重要影响,所以研究适合 WMBAN 的低能耗 MAC 协议具有切实的意义。

利用模糊逻辑理论来解决无线网络能耗问题的 MAC 协议有很多,如 ASCEMAC<sup>[2]</sup>、DQBAN-MAC<sup>[3]</sup> 等。ASCEMAC 采用了模糊逻辑重调度机制,将时隙分为了 TRFR/Schedule/On/Off 四相,避免了已有高能效 MAC 协议需要额外的时间同步机制的困扰,在降低网络平均能耗的同时,减少了数据包的平均等待时间及丢包率。DQBAN-MAC 采用跨层模糊规则调度算法和能量感知策略来为节点分配无冲突的数据发送时隙,在保证无丢包的情况下能提供稳定的时延。然而,上述模糊逻辑 MAC 协议都是以增加网络负载来改善网络的整体能耗及其服务质量(Quality of Service),很难满足无线体域网负载异构性的要求;对节点所采集的生理信息进行无筛选的处理增加了单个节点的能量浪费和整个网络的通信负荷;对于人体可能出现的一些突发状况也没有给出切实的应对措施。本文所提 FL-MAC 协议主要通过模糊逻辑算法来对生理信息的正常与否以及非正常的程度进行判别,以此决定该信息是否需要发送以及发送的优先级,在降低单个节点能耗的同时也减轻了整个网络的通信负荷。此外,GTS 的引入,确保了对突发情况的及时处理。

到稿日期:2012-03-02 返修日期:2012-06-14 本文受中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP21129),国家自然科学基金项目(30971689)资助。

卢先领(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、体域网,E-mail:jnluxl@gmail.com;彭能明(1987—),男,硕士生,主要研究方向为无线体域网的节能策略;徐保国(1951—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为过程控制、智能仪表及现场总线网络等。

## 2 相关工作

研究表明,造成能量浪费的主要因素有:空闲侦听、消息碰撞、窃听、控制报文开销、负载波动和发送失效等<sup>[4,5]</sup>。目前在 WMBAN 的 MAC 协议设计中,主要采用减少数据流量、避免冲突以及增加射频模块休眠时间等方法来减少上述因素带来的能耗。在减少数据流量方面,相继提出了 BSN-MAC<sup>[6]</sup>、CA-MAC<sup>[7]</sup>、BATMAC<sup>[8]</sup>等协议;BSN-MAC 是一种自适应、基于反馈的、与 IEEE802.15.4 相兼容的 MAC 协议,它通过调整 IEEE802.15.4 超帧的参数来减少数据流量;CA-MAC 把帧分为帧头、竞争访问部分以及数据发送部分,通过动态分配竞争访问子帧和数据发送子帧的大小来降低数据流量;BATMAC 是针对人体阴影效应而提出的,通过自动调整帧参数来减少阴影效应带来的流量浪费。BodyMAC<sup>[9]</sup>、MedMAC<sup>[10]</sup>、DQBAN-MAC<sup>[3]</sup>等协议主要用于应对数据冲突;BodyMAC 采用下行和上行机制,利用灵活的带宽分配策略,通过降低可能的包冲突来提高节点的性能;MedMAC 是专门针对 WMBAN 中吞吐量的差异性而提出的一种能量高效且自适应信道访问的 MAC 协议,它通过改变 TDMA 的信道号来避免信道访问中的竞争冲突;DQBAN-MAC 采用无冲突队列 CRQ 来控制传感节点对媒介的访问,通过数据发送队列 DTQ 来对传感节点的数据包进行无冲突调度。VLPM<sup>[11]</sup>是在已有唤醒无线电方法的基础上提出的,主要用于增加射频模块的休眠时间,通过把负载分为上行和下行两种来解决已有唤醒无线电方法在降低能耗时无法兼顾低时延的问题。

上述 MAC 协议虽然在一定程度上降低了节点的能耗,但它们并没有考虑到人体的大部分生理信息(如体温)在一天中的波动幅度不是很大,且大都处于正常范围内,对于这些正常的生理信息没必要进行实时处理。有鉴于此,本文在 TDMA 基础上引入了模糊逻辑控制理论,通过隶属度函数模型对所采集到的生理信息进行模糊化处理,并以此得出各生理参数的模糊概率,再由模糊逻辑算法对模糊概率进行逻辑判断,决定是否打开发送器发送数据并确定数据发送的优先级。TDMA 机制的引入有效避免了数据冲突,模糊逻辑算法的提出不仅大大减少了数据流量,而且极大地增加了节点射频模块的休眠时间。

## 3 FL-MAC 协议设计

对于 MAC 协议的设计,应根据能量有效性和网络的其他性能进行综合考虑,在实现能量高效的同时,能否满足应用要求是衡量一个好的 MAC 协议的关键因素。WMBAN 中的 MAC 协议必须具有下列特征:1)传输无冲突;2)稳定的通信误差;3)能量高效;4)低时延;5)能及时对突发情况作出反应。

### 3.1 模糊逻辑模型

因为人体的各项生理参数都有着各自的界定范围,没有统一的评定标准,而传统的基于 TDMA 的 MAC 协议也都是特定于时隙处理特定节点的信息,没有“轻重缓急”的概念,所以本文引入模糊语言变量  $S$  来对不同生理参数进行模糊化说明。语言变量  $S$  是一个五元体,表示为:

$$S = (X, T(X), U, G, M) \quad (1)$$

式中, $X$  为语言变量的名称, $T(X)$  为语言变量值  $X$  的集合, $U$  为  $X$  的论域, $G$  为语法规则, $M$  为语义规则。以人体心率为

例,如图 1 所示。

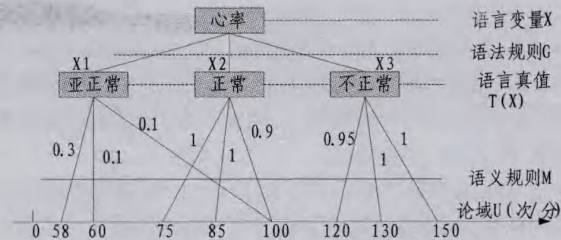


图 1 心率语言变量的五元体

语义规则  $M$  是与语言变量相联系的算法规则,用以产生模糊子集的隶属度函数。各生理参数根据自己的语义规则和隶属度函数确定自身的语言真值及隶属度,通过统一的模糊逻辑算法来决定当前数据的发送与否,以及在发送队列中的优先级。由于人体的各项生理参数都有一定的正常范围,因此在该设计中采用梯形分布来对各生理参数的隶属度进行建模,如图 2 所示。

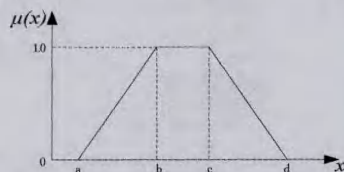


图 2 梯形分布模型

由图 2 可得各生理参数的隶属度函数:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (2)$$

式中, $a, b, c, d$  均为非负, $a$  和  $d$  分别表示生理参数的下限和上限,区间  $[b, c]$  为生理参数的正常范围。为了便于判定不同生理参数在发送队列中的优先级,在此引入模糊概率  $P(x)$  来对隶属度函数进行修正。

$$P(x) = 1 - \mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x \leq b \\ 0, & b < x \leq c \\ \frac{x-c}{d-c}, & c < x \leq d \\ 1, & x > d \end{cases} \quad (3)$$

即隶属度越高(相对于正常情况),其发送概率越小,在发送队列中的优先级亦越低,从而保证了对危险病况的优先处理。

### 3.2 模糊逻辑算法

该算法中,时间轴被分为周期性的帧,每个帧由两个保证时隙 GTS 和若干等长时隙组成。GTS 位于帧头位置,主要用于处理突发事件,其它时隙的个数和队列顺序视节点的发送概率  $P(x)$  决定。

(1) 在初始化阶段,主节点为从节点随机分配网络地址和时隙;

(2) 从节点收到主节点的广播信息后,先根据模糊概率模型得出其模糊概率  $P(x)$ ,然后向主节点发送包含生理信息和

$P(x)$ 的应答消息,若 $P(x)=0$ ,则从节点发送完应答消息后立即关闭射频模块,进入休眠模式;

(3)主节点根据从节点发送来的 $P(x)$ 值确定是否需要为从节点分配时隙以及时隙的优先级,若 $P(x)=0$ ,则将该从节点从帧中剔除,反之,则按 $P(x)$ 的大小为从节点指定时隙优先级,重新分配时隙;

(4)在每个帧开始时,即GTS阶段,主节点都会先检测信道中是否有数据发送请求信息,若有,则表明某个从节点检测到了突发信息,需要加入发送队列;

(5)若已加入发送队列的从节点检测到当前状态恢复正常时,它也会在GTS阶段向主节点发送退出请求,成功发送后立即进入休眠状态,主节点将此节点从发送队列中剔除;

(6)主节点在接收到从节点的加入或退出消息后会在每个时隙对从节点的应答消息中捎带暂停消息,并重新为新的队列分配时隙,如图3所示。

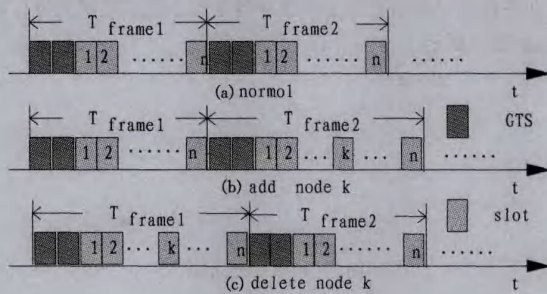


图3 时隙动态分配图

#### 4 性能分析与仿真

为了避免WMBAN中空闲侦听和消息碰撞带来的能量浪费,现有的大部分MAC协议(如ASCEMAC和DQBAN-MAC等)的设计都采用了TDMA机制。下面将分别从网络节点的能耗和时延等方面对现有模糊逻辑MAC协议和所提FL-MAC进行对比分析。仿真中的相关参数如表1所列。

表1 仿真参数及相关约定

仿真参数	参数值/约定
网络拓扑结构	星型拓扑
网络节点数(个)	20
节点最大通信距离(m)	1.2
节点总能量(J)	25
节点发送能耗(J)	0.02
节点接收能耗(J)	0.01

##### 4.1 能耗分析

由图4可知,单个节点的总能耗为:

$$E_{total} = E_{sensor} + E_{processor} + n(E_{tx} + E_{rx}) + E_{idle} + E_{sleep} \quad (4)$$

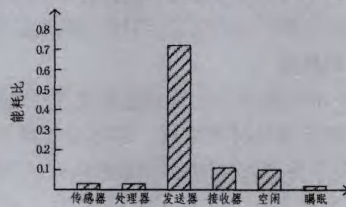


图4 节点各单元的能耗比较

式中, $E_{sensor}$ 、 $E_{processor}$ 、 $E_{idle}$ 、 $E_{sleep}$ 分别表示传感器、处理器、空闲侦听和休眠状态的能耗, $E_{tx}$ 和 $E_{rx}$ 分别表示单次发送和单次接收数据的能耗, $n$ 表示收发器工作的频次。对传统的基于

TDMA的MAC协议而言, $E_{idle}$ 和 $E_{sleep}$ 都可忽略,即有:

$$E_{TDMA} = E_{sensor} + E_{processor} + n(E_{tx} + E_{rx}) \quad (5)$$

FL-MAC协议主要通过减少收发器的工作频次来实现能量高效性,传感器和处理器的能耗与传统的基于TDMA的MAC协议相当,且对于相同的数据包,收发器的能耗也相同,即:

$$E_{FL-MAC} = E_{sensor} + E_{processor} + k(E_{tx} + E_{rx}) \quad (6)$$

式中, $k$ 表示收发器工作的频次,且 $1 \leq k \leq n$ 。用式(5)减式(6)即得FL-MAC相比于传统的基于TDMA的MAC协议节省的能量:

$$\Delta E = E_{TDMA} - E_{FL-MAC} = (n-k)(E_{tx} + E_{rx}) = mE \quad (7)$$

式中, $m=n-k$ ,表示两者工作频次的差值, $E=E_{tx}+E_{rx}$ ,表示节点完成一次数据收发所消耗的能量,为常值。由式(7)知,FL-MAC的节能效果与收发器工作频次的差值 $m$ 成正比,也就是说节点收发器的工作频次越少,即休眠时间越长,节点节省的能量也就越多,这对于生理状况相对稳定的WMBAN来说是十分有益的。

图5为ASCEMAC和DQBAN-MAC与FL-MAC的能耗仿真对比。从中可以看出,收发器的工作频次在很大程度上决定了节点的能耗,当工作频次很少(图5中的20频次),即该节点检测的生理信息基本处于正常范围时,射频模块一直处于休眠状态,节点的能耗主要来源于数据的采集和处理,节点的能耗最少。

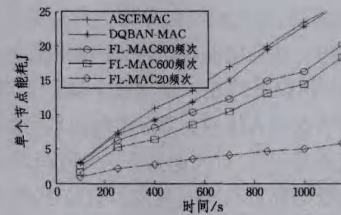


图5 单个节点的能耗比较

##### 4.2 时延分析

为了便于说明传统的基于TDMA的MAC协议与FL-MAC协议在时延方面的差别,这里忽略了数据采集和处理带来的时延,仅考虑数据传输中的时延。假定网络中共有 $n$ 个节点(仿真中取 $n=20$ ),检测到非正常生理信息的节点有 $m$ 个,且 $0 \leq m \leq n$ 。因为FL-MAC协议不考虑正常信息的发送情况,所以仅对非正常数据发送的时延进行分析。对于传统的基于TDMA的MAC协议来说,无论当前生理信息是否正常,也不论其不正常的程度有多大,相邻两次发送数据的时延均为:

$$T_{TDMA} = n \cdot Slot \quad (8)$$

式中, $Slot$ 表示一个时隙,文中的时隙均取为等长。

由第3.2节的算法分析可知,FL-MAC的时延为:

$$T_{FL-MAC} = 2GTS + m \cdot Slot + t_w \quad (9)$$

式中, $t_w$ 为有其它节点加入或退出发送队列后的等待时间,在网络负载较轻的情况下一般很小,可以忽略不计。若取 $GTS=Slot$ ,用式(8)减式(9)即得FL-MAC节省的时间:

$$\Delta T = T_{TDMA} - T_{FL-MAC} = (n-m-2) \cdot Slot \quad (10)$$

由式(10)可知,FL-MAC时延与网络负载紧密相关,也就是说数据发送队列中的节点数越少,数据发送的实时性越

(下转第117页)

种新式的增量更新算法,在 Monitor Node 节点和 ResManage Node 节点之间动态同步资源管理所需的数据,将原 JobTracker 节点的资源管理功能分配到 ResManage Node 节点上执行,使得 JobTracker 节点的负载有效降低。实验分析表明,在典型的 Hadoop 系统中,当 JobTracker 执行调度操作时,本文提出的方案可降低 18%~26% 的负载,提高了 Hadoop 云平台的工作效率。

### 参 考 文 献

[1] Apache Hadoop [EB/ OL]. <http://hadoop.apache.org/> 2012 March

[2] 李建江,崔健. MapReduce 并行编程模型研究综述[J]. 电子学报,2011(11):2636-2641

[3] Apache Hadoop [EB/ OL]. <http://zh.wikipedia.org/zh-cn/Hadoop>

[4] 孙凝晖. 发展开放平台技术 [EB/ OL]. <http://it.chinabyte.com/357/11520857.shtml>. 2010

[5] The Next Generation of Apache Hadoop MapReduce[EB/OL]. <http://developer.yahoo.com/blogs/hadoop/posts/2011/02/mapreduce-nextgen/>

[6] Kc K, Anyanwu K. Scheduling hadoop jobs to meet deadlines

[C]//2nd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). 2010;388-392

[7] Sandholm T, Lai K. MapReduce optimization using regulated dynamic prioritization [J]. Performance Evaluation Review, 2009, 37(1):299-310

[8] Job Scheduling for Multi-User MapReduce Clusters[EB/ OL]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-55.html>. 2009

[9] Polo J, Carrera D, et al. Performance-Driven Task Co-Scheduling for MapReduce Environments[C]//IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS) Conference. 2010; 373-380

[10] Polo J, Castillo C, et al. Resource-aware Adaptive Scheduling for MapReduce Clusters[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 7049:187-207

[11] Wolf J, Rajan D, et al. FLEX: A Slot Allocation Scheduling Optimizer for MapReduce Workload[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6452:1-20

[12] Apache Hadoop NextGen MapReduce (YARN) [EB/OL]. <http://hadoop.apache.org/common/docs/r0.23.0/hadoop-yarn/hadoop-yarn-site/YARN.html> 2011 November

(上接第 90 页)

好,这对于网络负载较轻的 WMBAN 来说是极为有利的。图 6 为 ASCEMAC 和 DQBAN-MAC 与 FL-MAC 在时延方面的仿真对比。

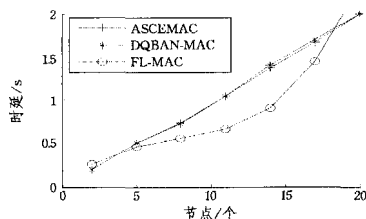


图 6 时延比较

由图 6 可知,FL-MAC 仅在网络负载较轻的情况下( $5 < n < 16$ )才具有明显的优势,当发送队列中的节点数  $m$  与网络总节点数  $n$  相差较小( $n < 4$ )或较大( $n > 16$ )时,实时性反而降低,这是因为 FL-MAC 算法引入了额外的保证时隙 GTS,增加了节点的时延。

**结束语** 本文分析了已有的 MAC 协议在节能方面的贡献,并指出了它们在无线医疗体域网应用中的局限性,以此提出了一种基于模糊控制理论的全新 MAC 协议。该协议通过模糊逻辑算法对节点所采集的生理信息进行了选择性的处理,在一定程度上减少了节点射频装置的工作次数,有效降低了节点的能量耗费和网络的时延,提高了整个网络的服务质量。理论分析和仿真实验表明,相比于传统的基于 TDMA 的模糊逻辑 MAC 协议,FL-MAC 在能耗和实时性方面都具有很大的优势,特别适用于网络负载较轻的无线医疗体域网。

### 参 考 文 献

[1] 王博,陈伟,王磊. 躯体传感器网络的高能效 MAC 协议设计[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(20):130-132

[2] Ren Qing-chun, Liang Qi-lian. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//IEEE Global Telecom-

munications Conference. 2005;157-161

[3] Otal B, Alonso L, Verikoukis C. Highly Reliable Energy-Saving MAC for Wireless Body Sensor Networks in Healthcare Systems[J]. Selected Areas in Communications, 2009, 27(4):553-565

[4] 柯欣,孙利民. 无线传感器网络的 MAC 协议研究[J]. 计算机科学,2004,31(9):29-31

[5] Gopalan S A, Kim D H, Nah J W, et al. A survey on power-efficient MAC protocols for wireless body area networks[C]//IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology. 2010;1230-1234

[6] Li Hua-ming, Tan Jin-dong. An Ultra-low-power Medium Access Control Protocol for Body Sensor Network[C]//27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society. 2005;2451-2454

[7] Liu Bin, Yan Zhi-sheng. CA-MAC: A Hybrid Context-aware MAC Protocol for Wireless Body Area Networks[C]//13th International Conference on e-Health Networking Applications and Services. 2011;213-216

[8] Maman M, Ouvry L. BATMAC: An Adaptive TDMA MAC for Body Area Networks Performed With a Space-Time Dependent Channel Model[C]//5th International Symposium on Medical Information & Communication. 2011;1-5

[9] Fang Geng-fa, Dutkiewicz E. BodyMAC: Energy Efficient TDMA-based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks[C]//9th International Symposium on Communications and Information Technology. 2009;1455-1459

[10] Timmons N F, Scanlon W G. An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for the Medical Body Area Network[C]//1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology. 2009;587-593

[11] Ullah N, Khan P, Kwak K S. A Very Low Power MAC (VLPM) Protocol for Wireless Body Area Networks[J]. Sensors, 2011, 11(4):3717-3737