

# Research of the Mobile MAC Protocol about Wireless Personal Area Network\*

Xuhui Chen<sup>1,2</sup>, Peiqiang Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Key Laboratory of the Internet of Things Application Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen

<sup>2</sup>College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou

Email: Xhchen84@gmail.com

Received: Aug. 11<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 26<sup>th</sup>, 2012; accepted: Sep. 11<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** In hierarchical architecture for wireless sensor network with the mobile nodes, network information collected often has the sudden and concentration. IEEE802.15.4 MAC protocol is introduced In this paper. When the users send queries in their command, the sensor nodes near routing node almost simultaneously collect and report the sensing data, which will result in a large number of data crash and energy loss. To address this issue, we propose an energy-efficient mobile MAC protocol which is based on IEEE802.15.4. This protocol use CSMA-CA mechanism with the time slot to divide the super frame into the competition period and free period. In competition period, the sensor node arrangement to apply the right to send and receive data, while transmitting data using the form of competition-free in free period, which will reduce the probability of data collision. The simulation results show that our MAC protocol has a high performance.

**Keywords:** Wireless Personal Area Network (IEEE802.15.4); CSMA-CA; Wireless Sensor Network; Beacon Frame; Super Frame

## 移动无线个人区域网络中 MAC 协议 分析研究\*

陈旭辉<sup>1,2</sup>, 余培强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>厦门理工学院福建省高校物联网应用技术重点实验室, 厦门

<sup>2</sup>兰州理工大学计算机与通信学院, 兰州

Email: Xhchen84@gmail.com

收稿日期: 2012 年 8 月 11 日; 修回日期: 2012 年 8 月 26 日; 录用日期: 2012 年 9 月 11 日

**摘要:** 在分层移动节点的无线传感器网络中, 网络的信息采集常常具有突发性和集中性。对低速无线个人区域网络 IEEE802.15.4 MAC 进行研究, 针对采用直接数据传输的 CSMA-CA 机制在用户发送查询指令时, 路由节点附近的传感器节点几乎同时进行数据采集和汇报, 造成在传感器节点汇报数据时期出现大量的数据碰撞, 导致传感器节点能量的大量损耗的问题, 提出了一种基于 IEEE802.15.4 的能量高效的移动 MAC 协议。该协议采用带时隙的 CSMA-CA 机制, 将超帧激活期划分成竞争期与非竞争期。竞争期内, 传感器节点申请数据收发安排权, 非竞争内进行无竞争的数据传输, 减少了数据碰撞的概率, 仿真实验表明基于 IEEE802.15.4 的能量高效的移动 MAC 协议具有能量高效性。

**关键词:** 无线个人区域网络(IEEE802.15.4); CSMA-CA; 无线传感器网络; 信标帧; 超帧

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61065007); 人社部留学人员科技项目(0814GS005); 甘肃省高校科研业务费项目; 厦门理工学院科研资助项目。

## 1. 引言

无线传感器网络的概念自从 20 世纪 90 年代末提出以来吸引了学术界和工业界的广泛注意, 并且获得了迅速的发展。同时, 为促进传感器网络的标准化进程和加速产业化进程, 工业界制定了 IEEE 802.15.4、ZIGBEE 等专门针对无线个人区域网络(wireless personal area network, WPAN)应用的协议<sup>[1]</sup>。

作为无线传感器网络承载体的无线传感器节点的能量消耗问题是影响节点寿命和网络性能的关键因素。在无线传感器网络中, 媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议决定了如何在传感器节点之间分配有限的无线通信资源, 是影响无线传感器网络能量效率的重要方面<sup>[2]</sup>。

MAC 协议主要完成如何分配媒体资源给网络中的节点, 获得资源的节点则可以向网络中的目标节点发送数据, 实现对数据的分组控制和管理, 无线传感器网络 MAC 层协议对传感器网络整体工作寿命和性能有着重要的影响<sup>[3]</sup>。传统的无线传感器网络中, 节点一般假设为静止的, 当在移动传感器网络中, 节点随时改变其物理位置, 其必须能够及时地执行与其邻居节点建立连接和移除过程。因此在设计移动无线传感器网络协议时, 支持节点的移动性是很重要的<sup>[4,5]</sup>。

目前, 在研究无线传感器网络 MAC 协议过程中, 通常假设节点位置不会发生变化, 网络拓扑变化缓慢。当节点具有强移动性造成网络拓扑剧烈变化时, 可能对 MAC 协议的信道接入机制产生严重影响, 甚至造成网络瘫痪。在基于 IEEE802.15.4 MAC 协议标准的无线传感器网络中, 能量有效性同样是网络设计的首要目标之一<sup>[6,7]</sup>。在 IEEE802.15.4 协议中, 采用了休眠机制避免节点不必要的能量消耗, 然而, 传感器节点的移动性将对该协议休眠机制产生严重影响<sup>[8,9]</sup>。

从接收节点的角度出发考虑, 节点与发送节点的休眠同步, 在业务到达时接收节点及时激活并完成数据分组接收过程是休眠机制的关键。在移动环境下, 特别是节点具有强移动性时, 其周围的邻居节点不断变化。一方面, 节点必须不断重复休眠建立过程, 造成的能耗和控制开销增加; 另一方面, 移动节点需要等待较长的时间才能与新的邻居节点建立休眠同步, 或者根本来不及重新建立休眠同步, 从而使 MAC 协议性能出现较大衰减<sup>[10]</sup>。此外, 对于采用 CSMA-CA

机制的 IEEE802.15.4 MAC 协议来说, 路由节点周围存在许多传感器节点, 而传感器节点的信息常常具有突发性和集中性, 当用户发送查询指令时, 路由节点附近的传感器节点几乎同时进行数据采集和汇报, 这必然造成在传感器节点汇报数据时期出现大量的数据碰撞, 造成传感器节点能量的大量损耗。

本文对分层移动节点的无线传感器网络 MAC 协议进行研究, 针对基于带时隙 CSMA-CA 机制的 IEEE802.15.4 在分层移动节点的无线传感器网络应用中, 当任务到达时存在大量的能量消耗问题, 提出一种基于 IEEE802.15.4 的能量高效的移动 MAC 协议。

## 2. IEEE802.15.4 移动 MAC 协议优化

### 2.1. 协议优化

针对 IEEE802.15.4 MAC 协议对传感器设备节点移动性支持不足, 造成移动设备能量损失严重及网络节点管理困难等问题。本文提出一种基于 IEEE 802.15.4 协议标准能量高效的层次型移动无线传感器网络 MAC 协议方案。方案的设计思想如下:

- 1) 网络采用带时隙的 CSMA-CA 算法对无线信道进行管理和控制。
- 2) 通过修改 BO 和 SO 的值来调整协调器发送信标的间隔 BI 长度和超帧激活期的 SD 长度, 根据网络中传感器设备节点发送数据量动态决定 BO 和 SO 的值, 协调器节点将超帧的激活期划分成竞争期和非竞争期两个部分, 如图 1 所示为协调器节点工作时序划分。
- 3) 传感器设备节点定期扫描所属网络的信号强

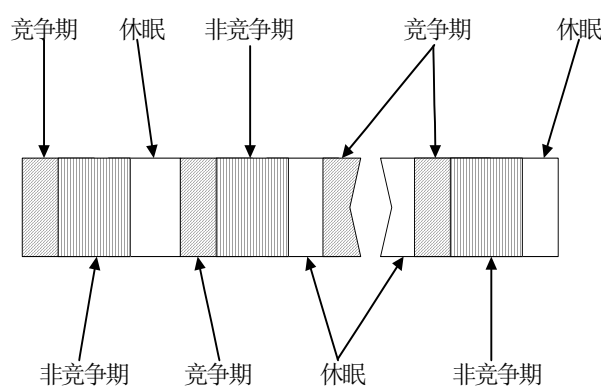


Figure 1. Time series of coordinator node  
图 1. 协调器节点时序划分

度,如果网络信号强度低于临界值时,申请加入信号强并且允许加入的邻居网络。

4) 当传感器设备节点需要发送和接收数据时,采用竞争协调器节点的发送接收安排权,而不是竞争发送接收权。即传感器设备节点申请所属子网络的协调器节点为其分配非竞争期的 GTS 保护时隙,数据在 GTS 保护时隙期内进行间接传输,不在竞争期进行数据直接传输。竞争期主要的工作进行网络节点的动态管理,非竞争期进行传感器设备节点数据的传输。

5) 在竞争期获得发送接收安排权的节点,转入休眠状态,以降低节点的空闲等待的时间长度和网络碰撞的概率。休眠时间由协调器节点安排决定。

## 2.2. 方案实施

在 IEEE802.15.4 MAC 层主要包括 MCPS 和 MLME 两类服务,用两个 SAP 接口访问点实现。其中,IEEE802.15.4 MAC 数据服务使用 MCPS-SAP 服务访问点实现,管理服务使用 MLME-SAP 服务访问点实现。SAP 的具体服务是通过原语的形式提供的,只需要遵循原语规范就能调用下层的的服务,这样便实现了层与层之间的透明传输。

### 2.2.1. 网络建立

1) 在本文研究的无线传感器网络中,节点启动后,首先使用扫描请求原语对节点通信范围内的网络信息进行搜索,这些网络信息来自自己关联网络的协调器节点,以信标帧的形式在网络中广播,节点通过信道扫描可以收集这些网络信息,并根据网络信息,可以选择一个现有的网络提出关联申请。该原语除了可以收集网络信息外,可以用于测量信道的能量,以及搜索节点已经关联的协调器。在扫描原语 MLME-SCAN 包括请求原语和确认原语两种,具体原型如下所示:

```
MLME-SCAN.request(ScanType,ScanChannels,ScanDuration,ChannelPage,SecurityLevel,KeyIdMode,KeySource,KeyIndex)
```

```
MLME-SCAN.confirm(status,ScanType,ChannelPage,UnscannedChannels,ResultListSize,EnergyDetectList,PANDescriptorList)
```

2) 通过设置原语来设定节点自身的短地址,如果节点是协调器节点,可以通过设置原语设置该节点子

网络是否允许节点接入。设置原语 MLME-SET 定义了如何来设置 MAC PIB 数据库中属性的值。IEEE 802.15.4 标准的 MAC 层维护一个网络属性相关的数据库 PIB,所有的属性都可以通过设置原语来设定或更改具体的值,也可以通过 MLME-GET 来读取某一属性的值,设置原语中包括请求原语和确认原语两种,具体原型如下所示:

```
MLME-SET.request(PIBAttribute,PIBAttributeIndex,PIBAttributeValue)
```

```
MLME-SET.confirm(status,PIBAttribute,PIBAttributeIndex)
```

3) 在协调器节点运行的过程中,可以通过启动原语 MLME-START 来对新的超帧进行配置。新的信标帧参数可以通过该原语配置到节点周期发送的信标帧中。启动原语中所有配置的参数,最终同样会配置到 MAC PIB 数据库对象对应的参数中,与配置原语唯一不同的是:启动原语能使信标帧使用新的超帧配置参数。

启动原语中包括请求原语和确认原语两种,具体原型如下所示:

```
MLME-START.request(PANId,LogicalChannel,ChannelPage,StartTime,BeaconOrder,SuperframeOrder,PANCoordinator,BatteryLifeExtension,CoordRealignment,CoordRealignSecurityLevel,CoordRealignKeyIdMode,CoordRealignKeySource,CoordRealignKeyIndex,BeaconSecurityLevel,BeaconKeyIdMode,BeaconKeySource,BeaconKeyIndex)
```

BeaconOrder 和 SuperframeOrder 是超帧规范中两个关键的参数,它们分别规定了超帧持续的时间和其中激活期的时间长度。BatteryLifeExtension 参数表示节点的接收器是否在信标帧的 IFS 之后关闭 macBattLifeExtPeriods 规定的时间长度,以节省电能消耗。

```
MLME-START.confirm (Status)
```

4) 在 PAN 协调器建立网络之后,已关联网络的协调器与未关联网络的的节点(包括协调器和传感器设备节点)之间可以通过调用 MLME-ASSOCIATE 原语来进行关联会话。网络关联的关联的过程分为两部分:待关联网络的节点(以下称子节点)提出关联请求和已关联网络的节点(以下称为父节点)处理关联请求。

- 子节点提出关联请求

未入网的子节点从休眠状态醒来通过扫描原语主动对信道进行扫描来获取网络信息, 设置扫描原语的 ScanType 参数为 0x01, 并对所有物理层支持的信道进行扫描, 扫描的持续时间需要比信标周期大, 则需为 ScanDuration 参数设置一个自适应调整值。本文首先设定 ScanDuration 为一个初始值, 如果没有收到任何信标帧, 将 ScanDuration 增大至最大值和当前值之差的一半。子节点 MAC 层收到网络层的扫描请求原语后, 广播一个信标请求命令帧, 等待周围协调器的发送的信标帧, 并向网络层报告周围协调节点的信息, 报告的形式以信道扫描确认原语的形式出现, 信息包括子节点周围协调器的个数及协调器节点的详细信息。子节点根据这些信息选择一个协调器节点来发送关联请求。

当子节点决定发送关联请求时, 需要根据 PANDescriptorList 字段描述的内容和自身的需求, 选择其中的一个作为其父节点并向选定的父节点发出关联请求。关联原语允许传感器设备节点与网络中的协调节点建立关联关系, 加入协调器节点网络中, 成为该网络的成员节点, 关联原语的请求原语的原型如下所示:

MLME-ASSOCIATE.request (LogicalChannel, ChannelPage, CoordAddrMode, CoordPANId, CoordAddress, CapabilityInformation, SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource, KeyIndex)

CapabilityInformation 参数描述了子节点自身的操作能力, 如: 节点类型, 能否成为 PAN 网络协调器, 是否使用外接电源, 当节点空闲时是否打开接受器, 是否具备安全能力和是否希望父节点为其分配短地址等。父节点可以通过这个参数来决定是否接受关联申请。

MLME-ASSOCIATE.confirm(AssocShortAddress, status, SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource, KeyIndex)

如果一个子节点需要关联一个网络的时候, 它将其 MAC 层调用 MLME-ASSOCIATE.request 关联请求原语来请求加入该网络。当子节点的 MAC 层收到网络层发送过来的关联请求原语后, 将使用原语中的逻辑信道 LogicChannel 和协调器 PanId 来更新物理层 PIB 中的 phyCurrentChannel 和 MAC 层 PIB 中的 macPANId 参数, 更新成功后, MAC 层将根据 PanId

值和协调器地址值发送一个关联请求命令帧。发送成功后, MAC 将等待接收父节点的关联响应。如果收到父亲节点的响应命令帧, MAC 层将向网络层汇报关联请求的结果, 通过调用 MLME-ASSOCIATE.confirm 来实现, 如果子节点关联成功, MAC 层则使用父节点分配的短地址来更新 MAC PIB 的短地址参数 macShortAddress。此外, 子节点还需要和父节点的信标周期和超帧激活周期保持同步, 调用 MLME-START.request 开始请求原语来初始化自己的配置或发布自己的信标帧。如此, 子节点便成功地加入了父节点的网络。

- 父节点处理关联请求

协调器在发出信标帧后, 等待周围节点的向其提交网络关联请求。父节点收到子节点的提交的关联请求命令后, MAC 层使用关联指示原语向网络层汇报收到的关联请求。关联指示原语原型如下所示:

MLME-ASSOCIATE.indication(DeviceAddress, CapabilityInformation, SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource, KeyIndex)

通过该指示原语, 父节点可以决定子节点是否能够加入网络。该原语的 CapabilityInformation 参数描述了子节点的操作能力, 例如: 能否成为 PAN 网络协调器、外接电源的使用是否允许、空闲时接受器是否要打开以及安全能力和觉得是否使用父节点为其分配短地址等。父节点可以通过这个参数来决定是否允许其他节点申请关联。如果允许, 父节点将根据自身短地址空间来启动短地址分配算法为关联节点分配短地址。地址分配成功后, 父节点网络层将通过关联响应原语, 告知 MAC 层关联结果, 关联响应原语原型如下所示:

MLME-ASSOCIATE.response(DeviceAddress, AssocShortAddress, status, SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource, KeyIndex)

父节点 MAC 层收到关联响应原语后, 并不是直接发送 MAC 命令帧, 而是将该响应原语封装成关联响应命令帧, 采用间接数据传输, 即在父节点信标帧的待转发数据目标地址 PendingAddress 字段中加入子节点的地址, 当子节点收到该信标帧后, 则查看信标帧的 PendingAddress 字段, 如果包含自己的地址, 子节点将用数据请求命令帧向父节点抽取关联请求原

语对应的关联响应命令帧。

### 2.2.2. 网络数据传输

本文将对设备节点移动的层次型无线传感器网络中数据传输过程进行研究,对于文中提出的无线传感器网络体系结构中,数据的传输过程主要发生在协调器节点与传感器设备节点及协调器节点与协调器节点之间,传感器设备节点之间不进行数据传输。在 IEEE802.15.4 标准中,规定传感器节点在 CSMA-CA 的竞争期中,传感器设备节点从休眠状态醒来,处于空闲侦听状态,当传感器设备节点存在数据发送的需求时,则把数据发送给协调器节点,由协调器节点在协调器节点构成的路由层进行多跳传输,最终传递到用户手中。当用户需要给下发数据时,则也将数据发送路由层,各个协调器节点获得用户的数据后,将数据发送到传感器节点,以实现传感器设备的任务要求。

本文要求传感器设备节点在竞争期时,首先侦听协调器节点发送过来的信标帧,一方面,判断协调器节点是否存在发送给自己的数据,若存在数据接收的需求,随后则竞争发送一个 GTS 请求,让协调器节点为自己分配一个接收 GTS 时隙,并进入休眠状态以达到节省能量的目的;另一方面,当传感器设备节点需要向协调器节点发送数据时,传感器设备节点在接收到信标帧后,则竞争提出一个 GTS 请求获得协调器节点分配的发送时隙,并进入休眠状态。当传感器设备节点成功获得 GTS 后,等待了协调器节点为其分配的休眠时间超时时,则苏醒过来进行性数据传输,具体的过程如图 2 显示了层次型移动无线传感器网络的数据传输过程。

在使用 GTS 之前首先应该先分配 GTS,在 IEEE 802.15.4 协议中,只能由协调器节点进行 GTS 的分配,并且 GTS 数据的传输只能在协调器节点和加入协调器节点网络的网络节点之间进行数据传出。一个 GTS 可以扩展出一个或者多个超帧时隙。一个 PAN 协调器可以同时分配不多于 7 个 GTS,并且为超帧提供充足的资源。GTS 的分配是基于先来先服务的原则进行分配的,所有 GTS 是连续的分配在 CAP 的末尾,并且每个 GTS 都可以在任何时间有传感器设备节点或 PAN 协调器解除分配。

如果一个传感器设备存在于协调器节点通信的

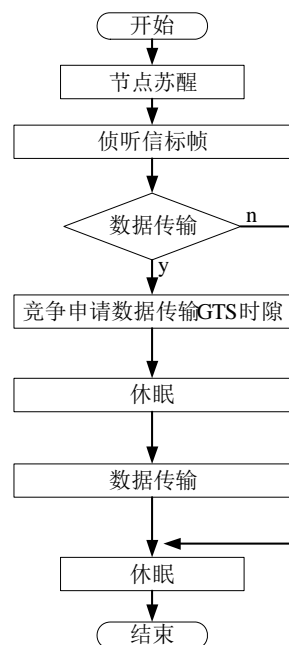


Figure 2. Process of data transfer  
图 2. 数据传输过程

需求时,可以通过发送一个 MLME-GTS.request 原语指令让协调器节点为其分配一个 GTS 时隙。同时这个原语也可以用来解分配一个 GTS 时隙。具体指令原型格式如下所示:

MLME-GTS.request(GTSCharacteristics,SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource, KeyIndex)

其中, GTSCharacteristics 指定了传感器设备节点请求分配一个新的 GTS 还是解除一个 GTS。

当发送一个 MLME-GTS.request 原语后,可以采用 MLME-GTS.confirm 原语来汇报 MLMEGTS.request 原语的分配或解分配的结果,该原语的原型如下所示:

MLME-GTS.confirm (GTSCharacteristics,status)

如果 MLME-GTS.request 原语执行成功,那么该原语将会返回一个 SUCCESS 的状态值,并且 GTSCharacteristics 的 Characteristics Type 子域将设置成 0 或 1 的值。否则, status 参数将会被指定一个适当的错误代码。

MLME-GTS.indication 原语指示 GTS 申请者 GTS 请求是否执行成功,其原语原型如下所示:

MLME-GTS.indication(DeviceAddress,GTSCharacteristics,SecurityLevel,KeyIdMode,KeySource,KeyIndex)

MLME-GTS.indication 原语由协调器节点的

MLME 实体产生, 并且发往其上层协议的。当协调器节点在一个 GTS 解分配时也会给其上层发送一个 MLME-GTS.indication 原语。该原语的执行将导致 GTSCharacteristics 参数的 Characteristics Type 设置为 0 或者 1。

### 3. 仿真实验

本节所有程序的仿真平台为 linux+NS2, 调试使用 gdb。下面将结合 NS2 相关网络构件, 设计仿真脚本程序。对基于 IEEE802.15.4 的能量高效的移动 MAC 协议的功能及性能进行验证。并将该协议与标准的 IEEE802.15.4 协议进行比较分析。文中假设仿真环境由  $100 \times 80$  的区域构成, 在这个区域中有存在 21 个节点, 分别编号 0~20, 其中 0 号为 PAN 协调器节点, 该节点可以作为汇聚节点的功能, 它和 1~5 号协调器节点位置不发生变化, 起到转发数据的作用, 6~20 号节点为传感器设备节点, 可以在仿真区域中自由移动位置。

仿真的过程需要在 linux 操作系统下编写 tcl 脚本来实现, 该脚本文件可在 Linux 下的任何一个文本编译器中进行编写, 文件的后缀名为 “.tcl”, 编写完仿真脚本代码, 在 Linux 终端控制台数据仿真启动命令, 仿真脚本代码将执行, 其仿真效果如图 3 所示。

当仿真结束是 tcl 脚本将产生一个无线 trace 文件, 本文采用的是 NS2 老式的无线 trace 文件格式。本实验在运行过程中会产生一个 trace 文件, 下面是一些无线 trace 片段:

```
s 41.726720079 _1_ MAC --- 1 cbr 227 [0 6 1
800] [energy 0.562937 ei 0.000 es 0.000 et 0.063 er
0.374] ----- [1:0 6:0 30 6] [1] 0 0
```

```
N -t 41.727808 -n 18 -e 0.683730
```

第一行和第二行表示一条 trace 记录, 第三行单独表示一条 trace 记录。第一条记录表示了对应节点发送一个 cbr 的跟踪记录, 包含了 cbr 传送过程的详细信息如: 能耗, 时间等信息。而第二条记录记录了一个节点在某一时刻的剩余能量, 如该记录表示 18 号节点在 41.727808 时刻的能量。

分别对标准的 IEEE802.15.4 MAC 协议和改进的高能效的 IEEE802.15.4 MAC 协议进行仿真, 通过对无线 trace 文件进行处理, 获取实验中各个节点在两

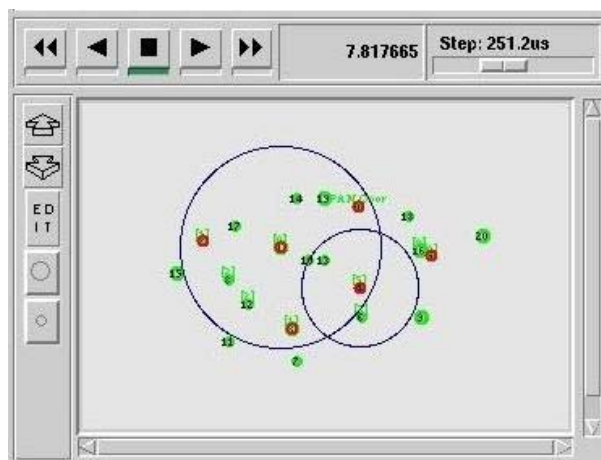


Figure 3. Simulation using NS2  
图 3. NS2 仿真效果图

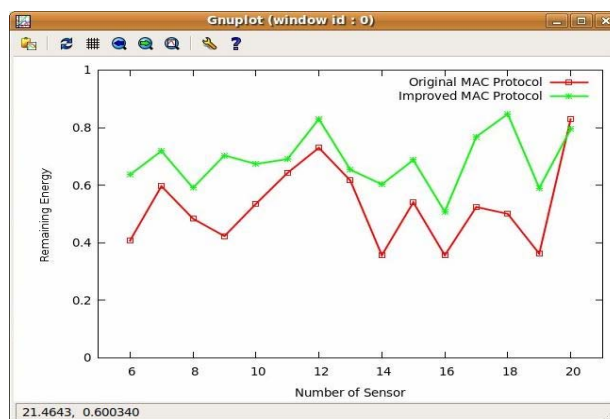


Figure 4. Residue energy of sensor nodes  
图 4. 传感器设备节点能量剩余分析图

次的仿真实验中的剩余能量记录, 以便分析文中研究的 MAC 协议的能耗性能。

实验结果采用图形分析如图 4 所示, 根据两次仿真实验的能量剩余分析图可以看出, 未经改进的 IEEE802.15.4 MAC 协议直接运用于本文研究的层次型移动 WSN 网络中, 其传感器设备节点的剩余能量普遍要比改进后的 MAC 协议要低, 通过此图可以充分证明改进后的 MAC 协议与改进前的协议具有能量高效性, 更适合层次型的移动 WSN。

### 4. 结束语

无线传感网络 MAC 层协议在扩展性、稳定性、健壮性和安全性等方面还存在诸多问题, 提高能量效率是首要设计目标。

本文分析了 IEEE802.15.4 无线传感器网络 MAC

协议,介绍了 IEEE802.15.4 协议中超帧、CSMA-CA 机制,提出一种能量高效的修改方案,采用带时隙的 CSMA-CA 机制,将超帧激活期划分成竞争期与非竞争期同时给出了方案的实施,最后通过仿真实验验证了该方案的能量高效性。

无线传感网络可能造成网络能量损耗的主要因素包括空闲帧听、竞争冲突、串扰、控制开销等进行分析,以提高协议的效率。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈冬岩. 基于多信道的 MAC 层协议在无线传感器网络中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(1): 41-49.
- [2] 刘俊, 杨全胜. 一种基于定位应用的无线传感器网络 MAC 层方案[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(1): 204-210.
- [3] 陈晨, 高新波. 一种无线传感器网络移动性支持自适应 MAC 协议[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 279-284.
- [4] 马锦雨, 徐玉斌. 一种能量有效的移动无线传感器网络 MAC 协议[J]. 电脑开发与应用, 2010, 23(9): 27-33.
- [5] J. Kim, W. J. Lee. Power saving medium access for beacon-enabled IEEE802.15.4 LR-WPANs. Lecture Notes in Computer Science, Human Interface and the Management of Information, 2007, 4558: 555-562.
- [6] 程宏斌, 孙霞. IEEE802.15.4 网络的性能仿真研究[J]. 常熟理工学院学报(自然科学), 2009, 23(4): 113-119.
- [7] 孟繁亮. 基于时间敏感应用下 IEEE802.15.4 网络的研究和改进[D]. 天津: 南开大学, 2010: 11-15.
- [8] Z. L. Xiao, C. He and L. G. Jiang. Slot-based model for IEEE 802.15.4 MAC with sleep mechanism. IEEE Communications Letters, 2010, 12(2): 154-156.
- [9] C. Y. Lee, H. Cho and G. Hwang. Performance modeling and analysis of IEEE802.15.4 slotted CSMA/CA protocol with ACK mode. International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(2): 123-131.
- [10] 王辛果, 张信明, 陈国良. 时延受限且能量高效的无线传感网络跨层路由[J]. 软件学报, 2011, 22(7): 1626-1640.