

# 用于多跳无线传感器网络的能量有效数据转发协议<sup>\*</sup>

郑国强<sup>1,2</sup> 李建东<sup>1</sup>

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室信息科学研究所宽带无线通信实验室 西安 710071)<sup>1</sup>

(河南科技大学电子信息工程学院 洛阳 471003)<sup>2</sup>

**摘要** 为了增加无线传感器网络的寿命,必须尽可能地节省节点的能量。节省能量最显著的方法就是在节点不参与数据传输时,使其无线模块处于睡眠状态。本文提出了一种适用于无线传感器网络的可靠、能量有效的数据传输(REEGF)协议。此协议通过使网络节点的唤醒模块工作于周期性的侦听/睡眠方式,当节点有数据业务时,利用节点的唤醒模块把节点的一跳邻居节点同步唤醒,确保数据被及时、可靠地发送。通过采用类似于 RTS/CTS 的控制信息交换方式和发送忙音,REEGF 协议有效地避免了数据传输的隐藏和暴露终端问题。基于节点的位置,REEGF 协议采用竞争的方式,选取朝着目标 SINK 节点前进距离最大的邻节点,作为中转接收节点,实现了路由、MAC 和拓扑管理的有机结合,节省了节点的资源。分析表明,在网络节点密度适度的情况下,REEGF 协议的可靠性、能量消耗和链路建立时延显著地优于文[8]提出的 GeRaF 协议。

**关键词** 无线传感器网络, 能量有效, 同步唤醒, 竞争

## An Energy-Efficient Data Delivery Protocol for Multihop Wireless Sensor Networks

ZHENG Guo-Qiang<sup>1,2</sup> LI Jian-Dong<sup>1</sup>

(Broadband Wireless Communications Laboratory, Information Science Institute State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071)<sup>1</sup>

(Electronic Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003)<sup>2</sup>

**Abstract** For increasing the life of wireless sensor networks, each node must conserve energy as much as possible. To reduce the energy consumption significantly, a node should turn off its radio most of the time, except when it has to participate in data forwarding. In this paper, we proposed a novel geographic forwarding protocol for reliable and energy-efficient data delivery (REEGF) in large-scale wireless sensor networks, in which the saving energy and reliable data delivery are ensured by using both listening periodically of the wakeup radio and synchronization awakening of the main radio in the node. The hidden and exposed terminal problems are solved by using both RTS/CTS-based message exchange and busy tones, and the optimal relaying node via contention among receivers are selected, which is based on the geographical location of the nodes involved, and the resources of the node are saved due to integrating routing, Medium Access Control(MAC), and topology management into a single layer. It is shown that the proposed protocol is more reliable and energy-efficient than the existing geographic random forwarding protocol (GeRaF), and its latency is smaller in moderate node density environment.

**Keywords** Wireless sensor network, Energy-efficient, Synchronization awakening, Contention

## 1 引言

节能是传感器网络研究的热点问题<sup>[1]</sup>。在入侵目标监测、军事监控等突发事件监测的应用中,传感器网络通常有两种状态:监测状态和数据传递状态。在大部分时间里,网络处于对环境的监测状态,通过关闭节点的无线通信模块,可大量节省节点的能量。但节点有数据需要发送时,如何使网络尽快转换到数据传递状态,并把数据信息及时、可靠地报告给远端用户(SINK)节点,是传感器网络在这类应用中必须权衡的问题。

近年来就传感器网络的能效问题研究已经取得了许多研究成果<sup>[2~5]</sup>。文[6]提出的稀疏拓扑与能量管理 STEM 协

议,网络中节点采用了两个无线模块。节点中的一个无线模块用于发送忙音或信标,另一个无线模块作为数据模块。在 STEM 协议中,只有当节点需要发送数据或唤醒模块侦听到唤醒信号时,节点的数据模块才处于工作状态。由于节点的唤醒模块周期侦听/睡眠活动的随机性,STEM 协议的链路建立时延较大,且节点需要维护路由表。文[7,8]提出的基于节点地理位置的随机转发(GeRaF)协议,网络中节点也采用了两个无线模块。其中一个模块为数据模块,另一个模块为忙音模块。在 GeRaF 协议中,节点的忙音模块仅用于避免数据传输的碰撞,而数据模块以周期性的侦听/睡眠方式工作,用于控制信息和数据的传输。虽然 GeRaF 协议不需要维护网络节点的拓扑信息和路由表,对网络拓扑动态变化的适应性

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金重大项目(No. 60496316);国家自然科学基金项目(No. 60572146);高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20050701007);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划;教育部科学技术研究重点项目(No. 107103)。郑国强 博士生,副教授,研究方向为无线网络协议设计;李建东 教授,博士生导师,研究方向为宽带无线 IP 网络,无线 Ad Hoc 网络,软件无线电,自组织网络。

较强,但 GeRaF 协议要求网络的节点密度必须足够大,并且节点数据模块采用周期侦听/睡眠的工作方式,无谓消耗了太多的能量,动态选取的转发节点也并不是最好的。

结合 STEM、GeRaF 协议的优点,针对目标监测一类传感器网络的应用,提出一种高效的数据传输(REEGF)协议。只有当网络处于数据传递状态时,节点才执行 REEGF 协议。REEGF 协议按照时隙结构执行,通过采用类似 RTS/CTS 的控制信息交换机制,避免了数据传输的碰撞。基于节点的位置信息,通过竞争选取朝着 SINK 前进最大距离的节点作为接收节点,REEGF 把路由、MAC 和拓扑管理整合为单一的层,大大降低了对节点资源(内存、计算能力等)的要求。

## 2 网络模型和基本假设

传感器网络由一个用户节点(SINK)和大量的传感器节点(以下简称节点)组成,监测的区域为方形。SINK 节点具有足够的能量、内存与计算资源,用于收集来自传感器节点的数据。每个传感器节点具有两个工作于不同频率的无线通信模块,其中一个作为主模块,用于节点之间交换控制和数据信息;另一个作为唤醒模块,用于发送和侦听唤醒信号。该传感器网络具有以下性质:

- (1) 节点部署后不再移动;
- (2) 基站 SINK 节点部署在方形区域的某个边上的固定位置,节点的等效通信半径  $R$  远小于网络覆盖区域的等效半径,所以节点必须以多跳的方式向 SINK 节点发送数据,并且 SINK 是唯一的;
- (3) 网络中的任意节点和其通信覆盖半径  $R$  内的邻居节点之间都存在无线链路;
- (4) 所有的节点具有相似的能力,并且地位相等;
- (5) 节点可以根据位置服务模块获取自身的位置信息,并已知 SINK 节点的位置;
- (6) 通过调整发射功率,节点的两个无线模块具有相同的通信覆盖范围。

在传感器网络中,无线模块是节点能量的主要消耗者。通常节点的无线通信模块有发送、接收、空闲和睡眠四种工作状态。在入侵监测等一大类应用中,传感器网络大部分时间处于监测状态。在监测状态并不需要传递数据。所以为了节能,节点采用图 1 所示的工作方式。在这种工作方式中,节点的主模块除了维持周期性的网络同步外,其它时间均处于睡眠状态。节点的唤醒模块在主模块睡眠期间,工作于周期性的侦听/睡眠方式,且各节点唤醒模块的周期侦听同步,即所有网络节点同时处于侦听状态。网络的时钟同步可以通过执行周期性的分布式同步协议 TDP 实现,关于网络同步的过程限于篇幅这里就不再讨论,具体可参考文[9]。这里主要考虑了如下的事实:在节点的时钟稳定性较好的情况下,网络的同步周期远大于满足网络应用要求的节点唤醒信道侦听/睡眠周期。根据文中对 REEGF 协议的描述,该协议的执行对网络的同步要求非常宽松。图 1 中,  $T$  表示主信道的同步活动周期,  $T_{sync}$  表示每个周期同步的时间,  $T_{sleep}$  表示节点主模块周期睡眠的时间,  $T_w$  表示节点唤醒模块的工作周期,  $T_{wi}$  表示节点唤醒模块的周期侦听时间,  $T_{ws}$  表示节点唤醒模块的周期睡眠时间。其中  $m$  为远大于 1 的整数,  $T$  远大于  $T_w$ ,  $T_{sync}$  远小于  $T$ , 即网络的同步较长时间才执行一次。

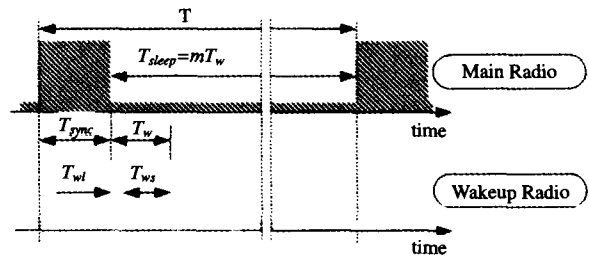


图 1 双无线模块的节点工作方式

## 3 REEGF 协议描述

根据上述节点的工作模式,一旦网络中的节点(称为 S 节点)有数据发送,S 节点的两个无线模块立即对两个信道分别进行侦听。在侦听  $\tau$  的时间内,如果节点 S 在两个信道都没有侦听到消息,节点 S 就开始发送唤醒信号,这时节点 S 的主模块转为睡眠状态;否则,节点 S 就转入睡眠状态,在等待一定时间后再重新尝试对信道的侦听。在唤醒模块的侦听活动时间到时,S 节点发送的唤醒信号,就被节点 S 的所有一跳邻居节点侦听到,从而这些一跳邻居节点和 S 节点就可以同时被唤醒。但在唤醒模块的同一个活动周期  $T_w$  中,除了 S 节点之外,可能同时有多个节点有数据需要发送,并且这些节点同 S 节点之间有共同的一跳邻居节点,所以为了避免数据传输的碰撞,首先必须解决数据发送节点的竞争问题。

在数据发送节点 S 把其一跳邻居节点唤醒后,网络就转换到数据传递状态,这时节点开始执行 REEGF 协议。REEGF 协议采用时隙结构,基于 RTS/CTS 的控制信息交换方式,通过竞争模式建立数据传输的数据链路。但这里的 RTS/CTS 信息交换机制同传统的 RTS/CTS 信息交换机制不同,需根据 RTS、CTS 包含的消息的不同,做出不同的应答,应答节点可以是多个,且在 RTS 中并不指定接收节点的地址。为了便于描述,首先给出协议中使用的有关消息的意义,其中每个控制消息仅占用一个单位时隙,DATA 消息根据数据的长度可以占用多个时隙。

RTS:在竞争发送阶段,由数据发送节点发送的消息,RTS 中包括数据报文的发送时间、节点的识别号 ID。在选取接收节点期间,RTS 中除了包括数据报文发送时间、节点的识别号 ID 外,还包括节点本身的位置。

CTS:在竞争接收节点期间,对 RTS 的应答。包含节点的识别号 ID。

COLLISION:节点在侦听 RTS 消息或 CONTINUE 消息时,在消息发生碰撞情况下节点应答的消息,该消息包括碰撞的标志信息 FLAG;如果在侦听 CTS 消息时,消息发生碰撞的情况下,节点应答的 COLLISION 消息中,包括数据报文发送时间、节点的识别号 ID、节点本身的位置信息和碰撞标志信息 FLAG。

CONTINUE:侦听到 COLLISION 消息后,节点的应答消息。在竞争数据发送节点期间,该消息包含节点的识别号 ID、数据报文的发送时间;在竞争接收节点期间,该消息包含节点的位置信息、数据报文发送时间、节点的识别号 ID。

ABNORMAL:在竞争发送阶段,节点在发出 COLLISION 消息后,等待侦听 CONTINUE 消息的过程中没有侦听到任何消息时,节点应答 ABNORMAL 消息。该消息中包含异常标志 AFLAG。

NORMAL:在竞争发送阶段,节点在侦听到正确的 CONTINUE 消息后应答此消息。该消息中包含正常标志 FLAG,表示节点侦听到正确的 CONTINUE 信息。

DATA:数据报文。在其最开始部分包括对接收节点的确认消息,即接收节点的识别号 ID。

ACK:接收节点接收完数据后发送此确认消息。该消息包含节点的识别号 ID。

下面分三个阶段描述 REEGF 协议的执行过程。

### 3.1 数据发送节点的竞争

为了避免数据发送节点两跳范围内邻居节点发送数据的碰撞,按照 REEGF 协议,节点按下列过程执行控制信息的交换。

① 首先由数据发送节点在第一个控制时隙发送 RTS 消息。根据侦听的 RTS 消息是否发生碰撞,一跳的邻居节点做出下列应答:如侦听到正确的 RTS 消息,节点处于空闲状态;如侦听的 RTS 消息发生碰撞,节点就用 COLLISION 消息应答;

② 数据发送节点发出 RTS 消息后,根据在第一个侦听时隙侦听到的消息不同,在其后的一个控制时隙按下列过程执行:如没有侦听到任何消息,节点就发送包含节点本身位置信息的 RTS 消息;如侦听到 COLLISION 消息,节点就以 1/2 的概率发送 CONTINUE 消息;

③ 正确侦听到 CONTINUE 消息的节点,若其在第一个控制时隙接收到正确的 RTS 消息,那么在随后的一个控制时隙该节点就处于空闲状态;若其在第一个控制时隙侦听的 RTS 消息产生碰撞,则在随后的一个控制时隙该节点就发送 NORMAL 消息;而之后侦听 CONTINUE 消息发生碰撞的节点,在其后的一个控制时隙用 COLLISION 消息应答。然后侦听到 COLLISION 消息的数据发送节点继续以 1/2 的概率发送 CONTINUE 消息,直至最后仅有一个数据发送节点接收到正确的 NORMAL 消息,表明该节点竞争成功。注意在此过程中按 1/2 概率、没有发送 CONTINUE 消息的节点,若在其后的一个控制时隙侦听到 NORMAL 消息或碰撞的消息,该节点就转入睡眠状态;若侦听到 ANORMAL 消息,该节点继续按 1/2 的概率发送 CONTINUE 消息。

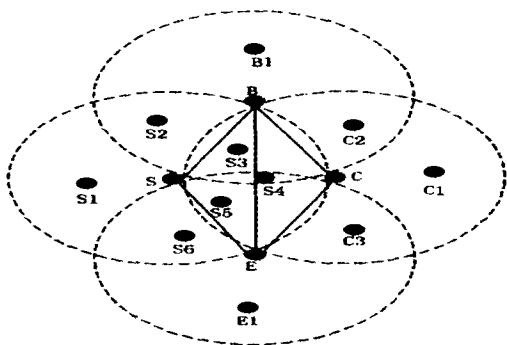


图2 数据发送节点的竞争

图2给出了多个数据发送节点竞争的情况。图中 S、B、C、E 四个节点为有数据要发送的节点,这些节点相互之间具有共同的邻居节点,图中的 S2、S3、S4、S5、S6、C2 和 C3 就属于这样的节点。为了避免节点 S 发送数据时,其接收节点受到来自 B、C、E 的数据发送的影响,B、C、E 不能同时发送数据。即在发送节点 S 的两跳范围内,不能同时存在其它的发送节点。按照上述数据发送节点的竞争过程,以节点 S 竞争

成功为例,假设 S4 为对应竞争成功的数据接收节点,图3给出了节点 S、S4 的消息交互过程。为了简化问题,这里没有考虑无线模块在发送和接收、睡眠之间的转换时间。

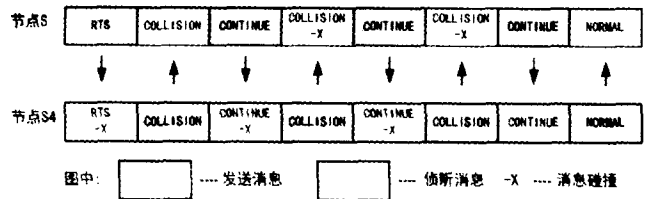


图3 节点 S 和 S4 间的控制信息交互过程

### 3.2 数据接收节点的竞争

由于传感器网络的节点采用电池供电,存储和计算能力有限,而网络通常布置在无人照看的恶劣环境中,信道的特性不断发生变化。为了尽可能地减少节点的能量消耗和有效利用节点的内存,REEGF 协议不需要节点维护邻居节点的任何信息。在传感器网络处于数据传递状态时,数据发送节点通过发送包含本身位置的信息,由所有接收到该位置信息的邻居节点,根据本身的位置,确定节点是否处于朝向目标的转发区域中,并决定是否参加接收节点的竞争。然后根据节点朝着目标 SINK 节点前进的距离不同,再决定节点参加竞争数据接收节点的时机。在描述 REEGF 协议选取数据接收节点的过程之前,首先给出下列定义。

定义1 节点  $i$  的邻居节点集合  $NS_i$ :在节点  $i$  的无线通信范围内的所有节点的集合,用  $NS_i$  表示。

定义2 节点前进的距离:给定一个发送节点  $i$  和目标节点  $D$ ,任意节点  $j$  朝着目标节点前进的距离等于节点  $i$  和  $j$  位置之间的连线在  $i$  和  $D$  节点位置之间连线上的正交投影,用  $d_i$  表示,如图4。

定义3 节点  $i$  转发区域的节点集合  $FS_i$ :在发送节点  $i$  的通信覆盖范围内,由朝着目标前进的距离  $d_i$  大于 0 的所有节点组成的节点集合。图4中带点划线的阴影区域为节点  $i$  的  $FS_i$  中的所有节点所在的区域。

为了减少跳数、适应信道和网络拓扑的动态变化、延长网络的寿命,REEGF 按下列规则采用竞争的方法选取接收节点。

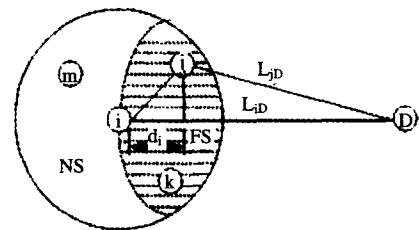


图4 节点  $i$  的  $NS_i$  和  $FS_i$

规则1 只有属于发送节点  $i$  的  $FS_i$  中的节点  $j$ ,才能参与接收节点的竞争。其它不属于  $FS_i$  但属于  $NS_i$  的节点,在开始选取接收节点时,立即转入睡眠状态。

规则2 根据节点  $j$  前进的距离  $d_i$ 、节点  $j$  同目标节点之间的距离  $L_{jD}$ ,把  $FS_i$  中的所有节点分为  $N_p$  个不同等级的节点集合  $A_1, A_2, \dots, A_{N_p}$ ,且  $|A_1| > |A_2| > \dots > |A_{N_p}|$ ,这里  $|A_k| > |A_m|, k < m (k, m = 1, 2, \dots, N_p)$  指的是  $A_k$  中的节点比  $A_m$  中的节点前进的距离大、同目标节点之间的距离更短,即区域  $A_1$  中的节点优先级最高,最早参与竞争,  $A_{N_p}$  中的节

点优先级最低,最后参与竞争。只有当  $A_1$  中不存在节点时,  $A_2$  中的节点才参与竞争。依此类推,直至当所有  $A_1, A_2, \dots, A_{NP-1}$  区域中均没有节点竞争时,  $A_{NP}$  中的节点才参与竞争。在同一个区域中的节点竞争成功的概率相等。

按照上述规则,执行 REEGF 协议,选取接收节点的工作过程如下:

① 属于节点  $i$  的  $NS_i$  中的节点,在侦听到包含位置信息的 RTS 消息后,首先判断是否属于集合  $FS_i$ ,若不属于该集合,节点立即转入睡眠状态;否则,节点根据位置信息估计所处的转发区域等级,确定参与竞争接收节点的时机。

② 若在  $A_1$  中存在节点,  $A_1$  中的所有节点在侦听到 RTS 之后,用包含自身 ID 的 CTS 进行应答。节点  $i$  根据侦听到的 CTS 消息是否发生碰撞,按下列过程执行:若侦听的 CTS 发生碰撞,节点  $i$  就发送 COLLISION 消息;若侦听到正确的 CTS 消息,接收节点选举结束,节点  $i$  准备在下一个时隙发送数据。

若  $A_1$  中没有节点,节点  $i$  将侦听不到任何消息,就在下一个时隙发送 CONTINUE 消息。侦听到 CONTINUE 消息的节点中,若存在属于  $A_2$  的节点,  $A_2$  中的所有节点就以 CTS 应答,节点  $i$  根据是否侦听到消息,以及消息是否碰撞,按照  $A_1$  中存在节点情况下的执行过程执行同样的操作,直至节点  $i$  在最大 NP 个侦听时隙中没有侦听到任何消息,就放弃本次的数据传输。

③ 若节点  $i$  在发送 RTS 或 CONTINUE 之后,侦听到的 CTS 消息发生碰撞,节点  $i$  就发送 COLLISION 消息。对发送 CTS 消息的节点,在侦听到 COLLISION 消息后,分别执行二元碰撞分解算法,直至最后只有一个节点发送 CTS 消息,竞争过程结束。注意在节点发出 COLLISION 消息之后,其它属于低等级区域的节点都自动转入睡眠状态,放弃竞争。

### 3.3 数据发送

数据发送节点在侦听到正确的 CTS 消息后,就开始发送数据消息。在数据消息的开始部分对接收节点进行应答。数据传输完成后,接收节点发送 ACK 消息,确认接收正确。

注意,为了使数据转发过程尽可能保持连续,在开始数据传输后,使竞争成功的接收节点的唤醒模块始终发送唤醒信号,直至数据发送完成。以避免接收节点通信覆盖范围内的邻居节点,误以为信道空闲、发送唤醒信号、唤醒其一跳的邻居节点、并建立数据传输链路,而使当前数据的进一步传递中断。

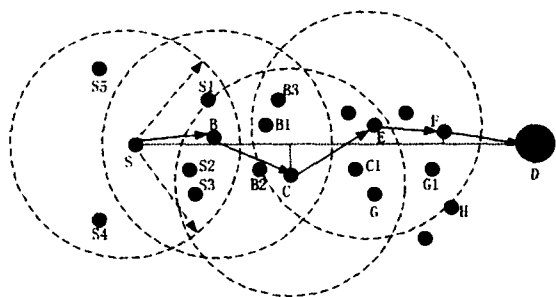


图 5 数据传递过程

图 5 给出了发送节点 S 执行 REEGF 协议的数据传递过程。数据发送节点 S 通过在其转发区域选取接收节点,首先建立与节点 B 之间的数据链路。节点 B 再执行同样的过程,建立同节点 C 之间的数据链路,直至最后建立同目标节点 D

之间的数据链路,把数据发送给目标节点 D 即 SINK 节点。注意每段数据链路在完成数据传输后就自动拆除。以图 5 为例,图 6 给出了节点 S 同节点 B 之间建立数据链路并完成数据传输的控制信息交互过程,图中假定节点 B、 $S_1$ 、 $S_2$  属于第一等级  $A_1$ 。

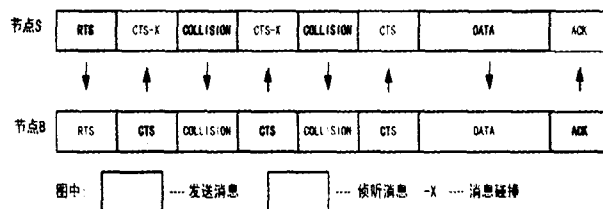


图 6 数据发送节点和接收节点间的信息交互过程

## 4 REEGF 的性能分析

在这一部分里,根据 REEGF 协议的执行过程,参考文献 [8],从理论上用近似的方法,分析节点的能量消耗和链路的建立时延。然后根据得到的理论结果,在下一部分把 REEGF 同 GeRaF 的性能进行比较。

假设节点按泊松过程分布在大小为  $L \times L$  的平面区域中,每个节点的平均报文到达率为  $\lambda$ ,节点的通信半径为  $R$ ,每个节点的通信覆盖区域内的平均节点数为  $N$ 。用  $d$  表示每个侦听/睡眠周期  $T_w$  中,节点的侦听时间占的比例即占空比。

在传感器网络中,节点在发送、接收和侦听状态的无线模块消耗功率近似相同。为了简化分析,这里分别用  $P_1$  和  $P_2$  表示节点主模块和唤醒模块,在节点处于这三种状态的功率消耗;而两个模块在睡眠状态的功率消耗,分别用  $P_{1,s}$  和  $P_{2,s}$  表示,并定义

$$\mu = P_1/P_2, \phi = (P_{1,s} + P_{2,s})/P_1 \quad (1)$$

这里  $\mu$  表示节点的主模块与唤醒模块处于激活时的相对功率; $\phi$  表示最大节能状态时,总的能量消耗的比例,这时节点的两个无线模块都处于睡眠状态。

若用  $M_d, M_r$  分别表示在足够长的时间  $t$  内,节点发送报文、接收报文的平均数,那么在时间  $t$  内节点平均消耗的能量为:

$$E_{REF} = M_d E_t + M_r E_r + E_s \quad (2)$$

这里  $E_t$  和  $E_r$  分别表示网络处于数据传递状态时,节点发送一个报文和接收一个报文所消耗的能量; $E_s$  表示在时间  $t$  内网络处于监测状态时,一个节点消耗的能量。下面分析节点在这三种情况下,分别消耗的能量。

### 4.1 节点发送报文消耗的能量

若不考虑节点需发送数据时,对信道的侦听时间  $\tau$ ,并假设在节点的每个侦听/睡眠周期内的任意时刻,节点产生数据业务的概率都相等,那么数据发送节点从开始发送唤醒信号,直至唤醒邻居节点,所需的平均时间  $T_{s,1}$  为:

$$T_{s,1} = (0.5 + d) T_w \quad (3)$$

为了分析 REEGF 协议在解决数据发送节点竞争过程中所用的时间,首先给出如下定理。

**定理 1** 按照 REEGF 协议中节点的无线模块工作方式,在使用唤醒信号唤醒节点 S 的一跳邻居节点时,节点 S 的邻居节点至多能同时侦听到来自四个不同节点的唤醒信号。

关于定理 1,可参见图 2,根据节点的工作模式和节点通信圆形覆盖的特征,采用几何方法进行证明。这里不再证明。

在两跳范围内,存在多个数据发送节点竞争的概率,通常是很难计算。这里近似用在节点的一跳和两跳之间的所有邻居节点,可能产生数据业务的概率来代替,近似为  $e^{-\lambda NT_w} - e^{-4\lambda NT_w}$ ,这里  $N$  是节点通信覆盖范围内的平均节点数。发送节点的竞争,是根据邻居节点侦听的消息是否碰撞,执行不同的应答来解决的,而数据发送节点的邻居节点,按照上述定理,至多存在来自四个不同数据发送节点的 RTS 消息产生的碰撞。所以通过执行二元碰撞分解算法,竞争数据发送节点经历的平均时间  $T_{s,2}$  近似为:

$$T_{s,2} = T_{rs} + 2(T_{om} + T_{col})(e^{-\lambda NT_w} - e^{-4\lambda NT_w}) + T_{norm} \quad (4)$$

这里  $T_{om}$ 、 $T_{rs}$ 、 $T_{col}$  和  $T_{norm}$  分别表示节点发送 CONTINUE、RTS 和侦听 COLLISION、NORMAL 消息的控制时隙时间长度。

若数据发送节点转发区域的邻居节点,占节点通信覆盖区域的节点比例为  $\xi$ ,考虑节点在网络中的布置满足泊松过程,所以节点转发区域没有节点的概率为  $e^{-\xi N}$ 。在把转发区域的节点划分为  $N_p$  个不同等级的区域后,每个区域的平均节点数  $\lambda_0$  为  $\xi N/N_p$ 。

若把数据发送节点从发送包含位置信息的 RTS 报文开始,到所有  $N_p$  个区域没有节点应答的整个过程,称为一个空闲周期,则数据发送节点成功选择数据接收节点之前,平均经历的空闲周期数为  $e^{-\xi N}/(1 - e^{-\xi N})$ 。所以从数据发送节点开始发送包含位置信息的 RTS 报文,到成功选择数据接收节点,经历的平均时间  $T_{s,3}$  为:

$$T_{s,3} = (e^{\xi N} - 1)^{-1}(T_{rs} + N_p(T_{as} + T_{om})) + T_{rs} + xT_{as} + (x-1)T_{col} \quad (5)$$

式(5)中  $x$  为在某一非空周期,数据发送节点同其转发区域的某一邻居节点,成功地建立起两者之间的数据链路,所经历的平均 CTS 时隙数,其计算如下<sup>[8]</sup>:

$$x = \frac{e^{-\lambda_0}}{1 - e^{-\lambda_0}} - \frac{N_p e^{-\xi N}}{1 - e^{-\xi N}} + \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_0} \lambda_0^k}{k!} s_k}{1 - e^{-\lambda_0}} \quad (6)$$

其中:

$$s_k = \begin{cases} 1 & k=1 \\ \frac{1 + 2^{-k} \sum_{i=1}^{k-1} \binom{k}{i} s_i}{1 - 2^{-k+1}} & k>1 \end{cases} \quad (7)$$

上式中,  $s_k$  表示由于节点侦听的 CTS 消息碰撞,执行二元碰撞分解所需要的平均时隙数。

根据上述分析,若数据发送节点发送数据报文的时间为  $T_D$ ,接收 ACK 的时间为  $T_{ACK}$ ,则传输一个报文,数据发送节点的主模块、唤醒模块的平均工作时间  $T_{r,m}$ 、 $T_{r,w}$  分别为:

$$T_{r,m} = T_{s,2} + T_{s,3} + T_D + T_{ACK}, T_{r,w} = T_{s,1} \quad (8)$$

所以发送节点发送一个报文平均消耗的能量  $E_i$  为:

$$E_i = P_1 T_{r,m} + P_2 T_{r,w} \quad (9)$$

#### 4.2 数据接收节点消耗的能量

根据假设,数据接收节点被唤醒的概率为  $1 - e^{-\lambda NT_w}$ 。同样,数据接收节点也必须解决侦听 RTS 信息发生碰撞的问题,且经历相同的时间。在选取数据转发节点的过程中,数据发送节点的转发区域内的节点参与竞争的概率为  $\xi$ 。采用同数据发送节点相类似的分析方法得到,接收一个数据报文,接收节点的主模块、唤醒模块的平均工作时间  $T_{r,m}$ 、 $T_{r,w}$  分别为:

$$T_{r,m} = (1 - e^{-\lambda NT_w}) \{ T_{rs} + 2(e^{-\lambda NT_w} - e^{-4\lambda NT_w}) \cdot (T_{om} +$$

$$T_{col}) + T_{norm} + (1 - e^{-\xi N}) \cdot (xT_{as} + (x-1)T_{om} + T_D + T_{ACK}) / N + (x-1) \cdot (T_{as} + T_{om}) (\xi N - (1 - e^{-\xi N})) / N \} \quad (10)$$

$$T_{r,w} = (1 - e^{-\lambda NT_w}) \{ T_{rs} + 2(e^{-\lambda NT_w} - e^{-4\lambda NT_w}) T_{col} \} + T_{norm} + (1 - e^{-\xi N}) ((x-1)T_{om} + T_{ACK} T_D) / N + T_{col} (\xi N - (1 - e^{-\xi N})) (x-1) / N \quad (11)$$

所以数据接收节点接收一个数据报文消耗的能量为

$$E_r = P_1 T_{r,m} + P_2 T_{r,w} \quad (12)$$

#### 4.3 节点处于监测状态消耗的能量

在每个唤醒周期节点不发生状态转换的概率为  $e^{-\lambda NT_w}$ ,所以  $t$  时间内节点处于监测状态消耗的能量为:

$$E_s = t e^{-\lambda NT_w} ((P_{1,s} + P_{2,s}) + d(P_2 - P_{2,s})) \quad (13)$$

#### 4.4 总的能量消耗

根据上述分析结果,在时间  $t$  内,每个节点平均消耗的能量归一化值为:

$$\phi_{REE} = E_{REE} / P_1 t \quad (14)$$

为了简化,假设

$$P_1 = P_2 = P, P_{1,s} = P_{2,s} = P_s$$

$$T_{rs} = T_{as} = T_{om} = T_{col} = T_{norm} = T_{ACK} = T_{SIG}$$

上式中,  $P$ 、 $P_s$  分别表示节点的两个无线模块在工作状态、睡眠状态的功率,  $T_{SIG}$  表示每个控制时隙的时间。

把前面分析的结果代入式(14),并化简得:

$$\phi_{REE} = \lambda [(0.5 + d) T_w + T_D + T_{SIG} (3 + 12\lambda NT_w + (e^{\xi N} - 1)^{-1} (2N_p + 1) + 2x)] + \lambda NT_{SIG} \cdot (3x\xi + 2((1 - e^{-\xi N})(T_D + 1) - \xi N) / N + 4 + 18\lambda NT_w) + (1 - \lambda NT_w) [\phi + d(1 - \phi/2)] \quad (15)$$

#### 4.5 建立时延

若把节点从有数据发送,到开始传输数据报文之前的时间,称为节点的链路建立时延,用  $L_{REF}$  表示,则有:

$$L_{REF} = T_{s,1} + T_{s,2} + T_{s,3} = (2 + 2x + 12\lambda NT_w + (e^{\xi N} - 1)^{-1} \cdot (1 + 2N_p)) T_{SIG} + (0.5 + d) T_w \quad (16)$$

### 5 REEGF 协议性能的数字分析

下面根据本文的分析结果,并参考文[8]对 GeRaF 协议的分析结果,把 REEGF 同 GeRaF 协议的性能进行比较。

假定节点转发区域的分级数量  $N_{PB} = 4$ ,转发区域的相对大小  $\xi = 0.4$ ,节点在睡眠模式的相对功率消耗  $P_s/P = 0.001, 0$  且  $T_{SIG}/T_D = 0.01$ ,  $dT_w/T_L = 0.1$ ,  $T_L = 1.5T_{SIG}$ ,  $T_L$  为执行 GeRaF 协议时,节点主信道的每周周期侦听时间。下面我们以节点每个通信覆盖区域内的平均节点数  $N$  和占空比  $d$  为参变量,以每个通信覆盖区域内的平均归一化业务  $\lambda NT_D$  作为对网络负载的度量,用数字化方法给出在不同网络负载下,分别执行 REEGF 和 GeRaF 协议时,网络节点的平均能量消耗、建立时延与占空比间的关系。

图 7、8 分别给出了网络负载为 0.01 和 0.001 时执行两种协议的节点能量消耗与占空比的关系。可以看出,在不同的网络负载情况下,执行 GeRaF 协议时,在相同的节点密度情况下,对应最小能量的占空比明显不同,偏离这个占空比时,能量消耗显著增加,且随着节点密度的增加,最小的能量消耗逐渐减小。在节点密度为 100 的情况下,执行 GeRaF 的最小能量消耗比 REEGF 的小;而在节点密度小于 100 的情况下执行 GeRaF 时的最小能量消耗明显比 REEGF 大。从能量消耗看,在节点密度小于 100 时,REEGF 优于 GeRaF,而在节点密度大于等于 100 时 GeRaF 优于 REEGF。

图 9、10 分别给出了网络负载为 0.01 和 0.001 时执行两种协议的节点能量消耗与建立时延的关系。两个图说明了在节点消耗能量最小时,节点的链路建立时延并不是最佳的。随着节点密度的增加,执行 GeRaF 协议时的节点最大链路建立时延显著减小,但执行 REEGF 协议时的最大节点链路建立时延随节点密度的增加几乎不发生变化。从执行两种协议时节点的链路建立时延看,不论节点的密度如何,REEGF 都优于 GeRaF,只是在节点密度大的情况下,性能的改善相对小一些。

图 11 给出了建立时延与占空比的关系。进一步说明了执行 GeRaF 协议时,随着节点密度的增加,节点的链路建立时延在同样的占空比下是逐渐减小的;而执行 REEGF 协议时,节点的链路建立时延随节点的密度变化很小。

根据上述分析,我们得到下列结论: REEGF 仅需要网络布置具有中等的密度。同 GeRaF 相比,大大降低了对网络布置密度的要求,且在相同的布置密度情况下,执行 REEGF 时节点的平均能量消耗大大减少,并具有很小的平均链路建立时延。另外,由于节点完全唤醒一跳的邻居节点,执行 REEGF 时数据传输的可靠性也比执行 GeRaF 时高<sup>[10]</sup>,且能实现最佳转发。

竞争的方法选举向着目标前进最大距离的节点作为接收节点,把网络的路由、MAC 和拓扑管理整合为单一的层,REEGF 使数据的传递具有很高的可靠性。对 REEGF 的能量有效性的理论和数字化分析表明,REEGF 仅要求网络具有中等的密度,在此情况下 REEGF 的平均节点能量消耗和链路建立时延都优于 GeRaF。所以应用 REEGF 协议,可以大大减小网络节点的布置密度,节约成本,节省节点的能量消耗,延长网络的寿命,在大规模传感器网络中具有广泛的应用前景。

本文对所提出的 REEGF 协议仅进行了初步的研究,还需要对该协议进行深入的研究。进一步的研究主要包括建立有效的仿真模型,对协议的性能指标进行评价,并同其它协议进行比较;综合考虑能量、数据传递时延和节点的资源使用,分析优化网络参数,为传感器网络的设计和使用提供指导。

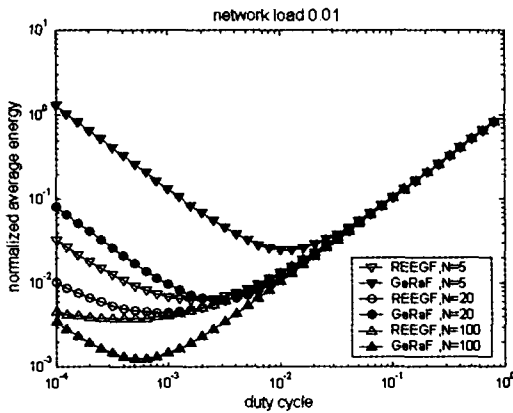


图 7 能量消耗与占空比的关系(网络负载:0.01)

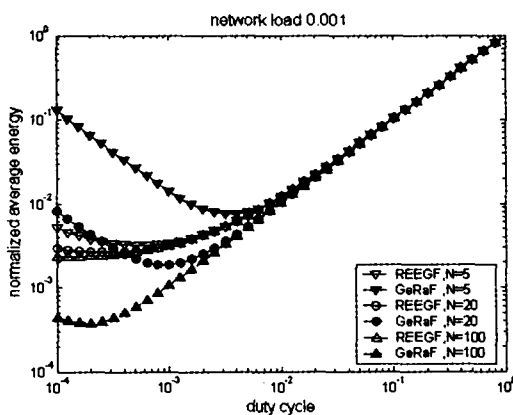


图 8 能量消耗与占空比的关系(网络负载:0.001)

**结论** 针对在目标入侵监测一大类应用中传感器网络的特点,本文提出了把信息可靠、及时报告给用户的一种能量有效的数据传输协议 REEGF。该协议充分考虑了传感器网络的节能要求,以及节点的资源有限,且容易出现故障的特点。并且仅工作于网络的数据传递状态。通过使用具有双频无线模块的节点,仅局部唤醒数据发送节点的一跳邻居节点,基于

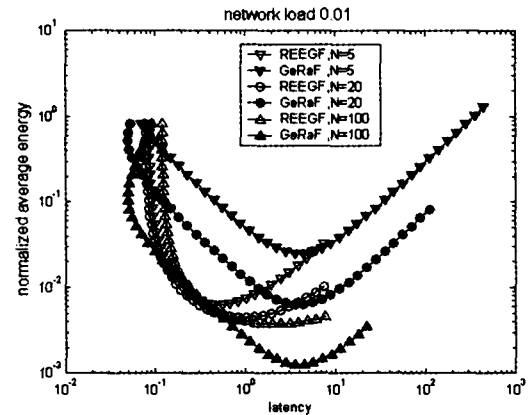


图 9 能量消耗与建立时延的关系(网络负载:0.01)

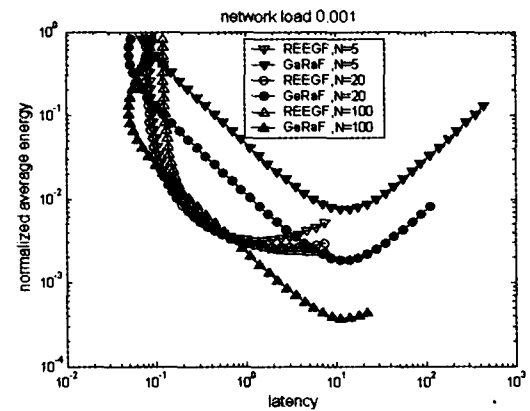


图 10 能量消耗与建立时延的关系(网络负载:0.001)

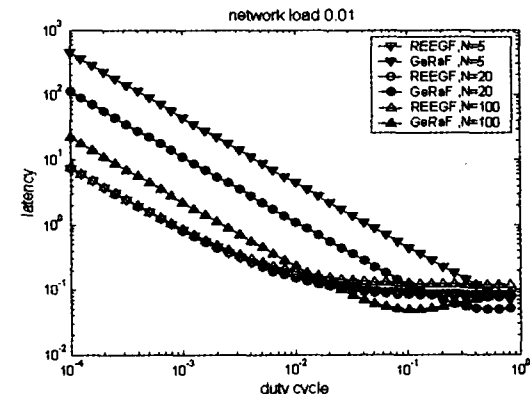


图 11 建立时延与占空比的关系

图中反映出路径的优先级别会随着当前能量及跳数等实时变化情况。

不同时刻,不同节点的传输能量消耗参数变化情况,如图6所示。

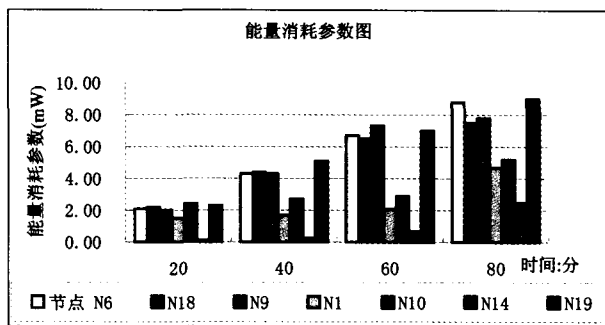


图6 不同时刻能量消耗参数变化图

图中反映出节点在经历多个任务之后,能量的消耗相对比较均衡。

### 4.3 仿真结果分析

根据上面仿真结果可知,不同路径的跳数、各路径上当前各节点的能量消耗参数及剩余能量参数等数据均动态变化,路由的健壮性及优先级也相应变化。上图中得到的两个优先序列分别为(按降序排列): $P_1, P_1, P_2, P_1$ 。即第1、2、4次路径 $P_1$ 的优先级高,第3次路径 $P_2$ 优先级高。当有四个任务时,分别按 $P_1, P_1, P_2, P_1$ 顺序来选择路由。路径上节点的能量消耗相对比较均衡,避免了部分节点能量过快耗尽引起网络性能下降或者网络路由发现频繁。在开始任务前选择路由时,利用历史数据增加少量的计算,可得到健壮性好、能耗均匀的路由,使网络整体系统的能量消耗分布较均匀,客观上使整个网络保持相对较好的运行状态,增强数据传输稳定性,这样的情形对延长网络的工作寿命也有好处。

**结论** 本文提出了能量优先分级变化的多路径路由选择协议。算法根据网络中能量消耗、剩余能量、路由跳数等参数的动态变化对路由的可靠性、健壮性的影响变化,定义优先级。算法综合考虑这三个参数的变化,利用历史数据,增加少量计算实时得到路径的优先级,根据优先级变化选择稳定健

壮的路由,客观上使网络的能量均匀消耗,增加路由的健壮性和可靠性,并能延长网络工作寿命。

### 参考文献

- Shah R C, Rabaey J M. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. IEEE, 2002. 350~355
- Srivastava M B. Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks. <http://fleece.ucsd.edu/~curts/papers/MILCOM01.pdf>
- Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000. 1~10
- Kokkinos P C, Papageorgiou C A, Varvarigos E A. Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'05), PP. 1. IEEE, 2005
- Mann R P, Namuduri K, Pendse R. Energy Aware Routing Protocol (EARP) for Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. In: IEEE Communications Society Globecom 2004 Workshops, IEEE, 2004. 419~427
- Heinzelman W B, Chandrakasan P, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE, 2002. 660~670
- Rodoplu V, Meng T H. Minimum Energy Mobile Wireless Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. IEEE, 1999, 17(8): 1333~1344
- Jayashree S, Manoj B S, Murthy C S R. A Battery Aware Medium Access Control (BAMAC) Protocol For Ad Hoc Wireless Networks. IEEE, 2004. 995~999
- Chang J H, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, IEEE, 2004, 12(4)
- Sun Liming, Li Jianzhong, Cheng Yu, Zhu Hongson. Wireless Sensor Networks. TsingHua Publisher, 2005. 7~8
- Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks, MobiCO, August 2000

(上接第29页)

### 参考文献

- Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102~114
- Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]. In: Proceedings of INFOCOM 2002, New York NY, June 2002. 1567~1576
- Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie G. Protocols for Self-Organization of Wireless Sensor Network [J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(10): 16~27
- Miller M J, Vaidya N H. A MAC Protocol to Reduce Sensor Network Energy Consumption Using a Wakeup Radio [J]. IEEE Trans. On Mobile Computing, 2005, 4(5): 228~242
- Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, Srivastava M. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2002, 1(1): 70~80
- Dhanaraj M, Manoj B S, Ram C S. A New Energy Efficient Protocol for Minimizing Multi-hop Latency in Wireless Sensor Networks [C]. IEEE PerCom 2005, IEEE Computer Society, 2005
- Zorzi M, Rao R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance [J]. IEEE Trans. On Mobile Computing, 2003, 2(4): 337~348
- Zorzi M, Rao R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003, 2(4): 349~365
- Su Weilian, Akyildiz I F. Time-Diffusion Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transactions On Networking, 2005, 13(2): 384~397
- Jung J, Park T, Kim C. A Forwarding Scheme for Reliable and Energy-Efficient Data Delivery in Cluster-based Sensor Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(2): 112~114