

# 基于动态树拓扑的多时隙分配无线传感器网络数据传输算法

孙利\*, 宋喜忠

(黄淮学院 信息工程学院, 河南 驻马店 463000)

(\*通信作者电子邮箱 sunli\_72@126.com)

**摘要:**针对无线传感器网络(WSN)在数据传输过程中节点能量负载不均衡问题,提出了一种基于动态树拓扑的多时隙分配无线传感器网络数据传输算法。该算法首先建立了树链路模型来分析无线传感器网络的数据传输模式以及时隙需求问题;接着通过在树拓扑上使用父代和子代的关系,使节点基于时隙需求执行帧时隙分配,并给出了接收时隙的一个序列模式和发送时隙的序列模式,允许节点更加有序且在干扰更少的信道下接收其他节点发送的数据包,减少时隙的浪费并提高信道利用效率。最后,实验仿真结果表明,与基于数据传输优化的无线传感器网络的生命周期延长算法,以及基于能量感知和时隙分配的可靠数据传输算法相比,所提算法的网络能量效率分别提高了42.8%和51.7%,节点平均寿命延长了1.7%和37.5%,网络的能量效率和网络生命周期得到了提高。

**关键词:**动态树拓扑;多时隙分配;无线传感器网络;数据传输

**中图分类号:** TP393.0 **文献标志码:** A

## Multi-slot allocation data transmission algorithm based on dynamic tree topology for wireless sensor network

SUN Li\*, SONG Xizhong

(School of Information Engineering, Huanghuai University, Zhumadian Henan 463000, China)

**Abstract:** Concerning the load imbalance of nodes in Wireless Sensor Network (WSN), a new multi-slot allocation data transmission algorithm was proposed based on dynamic tree topology. The data transmission mode and slot allocation were analyzed by a tree link model at first. Then the node performed frame slot allocation based on slot requirements by using the relationship between parent and offspring in the tree topology; and a sequence mode for reception slot and a sequence mode for transmission slot were given, so as to allow the node to be more ordered and receive packets sent by the other nodes in less interference channel, reducing waste of time slot and improving utilization efficiency of channel slot. Compared with life cycle extension algorithm for WSN based on data transmission optimization and reliable data transmission algorithm based on energy awareness and time slot allocation, the simulation results show that the network energy efficiency of the proposed algorithm increases by 42.8% and 51.7% respectively, and the average lifetime of the nodes extends by 1.7% and 37.5% respectively, the energy efficiency and network life cycle are optimized.

**Key words:** dynamic tree topology; multi-slot assignment; Wireless Sensor Network (WSN); data transmission

## 0 引言

对于大规模无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的应用,如环境监测和农业自动化管理<sup>[1-2]</sup>,是通过超过数百个的传感器节点部署在大覆盖面积,当应用程序启动时大量的节点被激活并开始传输数据流量,大量的流量数据会导致网络拥塞,拥塞会增加数据包的延迟和能量的消耗量,而且数据拥塞导致的重传会给网络寿命和效率带来很大的限制<sup>[3]</sup>。而且在传统的集中式方法中来自传感器的数据流量会聚集到一个汇聚端节点,当网络容量有限时,在能量消耗和数据包延迟方面并不能体现出性能效率<sup>[4-5]</sup>。因此,在本文中采用多个汇聚端的方案,通过平衡流量负载来提高网络的利用效率。从起始端到一个目的地的数据流需要最优的路由协议,来有效地利用有限的容量,处理内存和资源。

在事件驱动的传感器网络中,例如有关监控和检测的应用,节点通常在较低或空载的状态下运行<sup>[6]</sup>。当突发事件发生时,这些网络节点会突然变得活跃,从而使得网络出现部分超载,并造成网络拥塞。比如:文献[7]提出一种无线传感器网络跨层拥塞控制算法,引入滑模变结构机制,采用节点输出流最小的数据包优先进行传输的原则以及利用主动队列管理方法实现拥塞控制,同时自适应地分配MAC(Media Access Control)信道,可以有效缓解拥塞的发生,大大降低排队时间。文献[8]提出一种无线传感器网络中最大化网络寿命的数据聚合路由算法,提出了数据聚合路由问题的网络流量模型,设计了一组混合整数规划代价函数,并通过对偶分解的方法来得到最优的中继传输速率和路由,减少数据通信量,均衡各个节点的能量消耗。文献[9]提出无线传感器网络Agent数据分流策略,通过移动Agent技术实现特定功能的

收稿日期:2015-04-09;修回日期:2015-07-13。 基金项目:河南省科技厅发展计划项目(142102110088)。

作者简介:孙利(1972-),男,河南平舆人,副教授,主要研究方向:计算机网络; 宋喜忠(1977-),男,河南驻马店人,讲师,硕士,主要研究方向:计算机网络、数据库。

MA(Moving Average)到异常目标位置附近收集传感器节点的感应监测数据,能够大大减少在网络中传播的数据流量,降低了数据传输的能量消耗。文献[10]提出基于数据传输优化的无线传感器网络的生命周期延长算法,首先对于给定的传感器的固定基站提出了有效的算法来计算传输方案,并展示了如何以分布式的方式来实现基站与传感器节点的通信,接着通过将数据传输的多跳问题转化为 NP 难问题,再通过优化解来得到最佳的数据传输方式。文献[11]提出基于集群的无线传感器网络高效的数据传输算法,通过使用基于身份的数字签名(Identity-Based digital Signature, IBS)的方案和基于身份的在线/离线数字签名(Identity-Based Online/Offline digital Signature, IBOOS)方案,通过进一步降低计算开销和减少网络通信的安全性验证时间来提高数据传输效率。文献[12]提出无线传感器网络基于能量感知和时隙分配的可靠数据传输算法,由不相交的方式和接收时隙的序列来分配时隙给每一个节点,接着发送时隙的序列。这样的时隙分配允许节点在发送数据前过滤和汇聚接收到的数据,从而有效地信道利用率和平衡功耗。

以上无线传感器网络数据传输算法在网络传输的能量效率和网络生命周期方面还有很大的优化空间,为提高传感器网络的能量效率和节点平均寿命,本文提出了基于动态树拓扑的多时隙分配无线传感器网络数据传输算法。

## 1 模型介绍

### 1.1 无线传感器网络模型

传感器节点不发生移动,网络由一个汇聚节点和多个源传感器节点组成一个树状结构。当两个节点分别位于它们的互相传输范围内,这两个通信节点之间链路被称为是父端与子端之间的树链路。一个节点周期性地感测数据<sup>[13-14]</sup>,并通过多个跳距离将数据发送到汇聚节点。本文假设一组数量相对较少的节点控制一个网络。其中每个节点生成的数据分组需要被及时、可靠地传递到汇聚端。每个节点都有一个传输半径,节点将其传输半径内的下层节点作为子端节点,自身作为父端节点。例如在图1所描述的网络模型图中,编号1和5的节点在汇聚节点的传输范围内,都作为父端节点,编号2的源节点的父节点为编号1的节点,而2号节点下面连接的节点为2号节点的子端节点。此外,本文假设每个传感器节点在一个数据收集周期内最多产生一个数据分组,且节点会由于因为电池电量的消耗而死亡<sup>[15]</sup>。由于某一端节点的死亡或突然之间在节点间放置了障碍,都会造成通信链路中断。

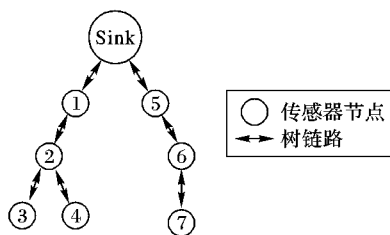


图1 树链路模型

### 1.2 符号描述

为了方便接下来对网络及算法的描述,本文采用如下符号:

$H_i$  表示节点  $i$  到汇聚节点的树深;

$A(i)$  表示源于节点  $i$  的属于一个树的节点集合;

$p_i$  表示节点  $i$  的父端;

$c(i)$  表示节点  $i$  的子端的集合;

$d_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的距离。如果节点  $i$  和节点  $j$  在相同的树路径上,则  $d_{ij} = |H_i - H_j|$ 。

**定义1** 时隙是一个时间片段,表示一个节点发送一个数据包到它的父端的时间过程。在时隙内,一些控制消息例如 RTS(Request To Send) 和 CTS(Clear To Send) 能够被用于相邻方之间实现可靠的数据传输。

**定义2** 给定一个树,它的超帧(Super-Frame, SF)作为时隙数目的总和,该树中的每一个节点的目的是发送其自己的数据包到汇聚节点而不对其他节点的传输产生干扰<sup>[16]</sup>。其中,一个超帧表示在树中的每个节点可以安全地发送它的感知数据到汇聚点的一个时间周期。

**定义3** 节点  $i$  对应于它的起始节点  $j$  的时隙需求,记为  $T_i^j$ ,表示时隙数量的总和,在  $A(i)$  中每个节点需要传输自身的数据包到节点  $j$  并且不干扰其他节点的数据传输。其中  $T_i^j$  表示为:

$$T_i^j = \sum_{k \in A(i)} d_{kj} \quad (1)$$

**推论1** 节点  $i$  从它的父端能够计算出它自身的时隙需求,公式如下:

$$T_i^{p_i} = \sum_{k \in c(i)} T_k^{p_i} + |A(i)| \quad (2)$$

**证明** 通过定义3可知:

$$T_i^{p_i} = \sum_{k \in A(i)} d_{kp_i} = \sum_{k \in A(i)} (d_{ki} + 1) = \sum_{k \in A(i)} d_{ki} + \sum_{k \in A(i)} (1) = \sum_{k \in A(i)} d_{ki} + |A(i)| \quad (3)$$

其中:

$$\sum_{k \in A(i)} d_{ki} = \sum_{k \in c(i)} \sum_{j \in A(k)} d_{ij} + \sum_{k=1} d_{ki} = \sum_{k \in c(i)} T_k^i \quad (4)$$

通过将式(4)代入式(3)中即可证明式(2)成立。

在推论1中,  $\sum_{k \in c(i)} T_k^i$  表示节点  $i$  的子端的时隙需求总和。

$|A(i)|$  表示节点  $i$  为了发送  $|A(i)|$  个数据包所需要的时隙数。 $T_i^{p_i}$  表示  $p_i$  必须分配给它的子端超出其自身时隙需求的时隙数。

**推论2** 一个汇聚节点  $v$  的时隙需求  $T_v$  给定如下:

$$T_v = \sum_{k \in c(v)} T_k^v \quad (5)$$

**证明** 如果节点  $i$  不具有父端,它就不会传输数据包到父端,因此此时式(2)中的  $|A(i)|$  等于零,将  $i$  替换为  $v$ ,本文可以得到式(5)且超帧为  $T_v$ 。

## 2 动态树拓扑的多时隙分配

帧时隙分配(Frame Slot Allocation, FSA)算法把一个 SF 划分为帧,每帧划分成三个时隙,通过在树拓扑上使用的父子关系,节点执行帧时隙分配<sup>[17-18]</sup>。对于节点的子端,通过防止横向干扰的不相交方式,伴随着子端的后代数量的增长所分配的帧数量通过加一的形式递增。对于每个所分配的帧的

三个时隙,每个节点确定使用公式“发送时隙# = 深度 mod 3”来发送时隙号码。以这种方式,两跳的垂直距离内该算法避免了使用相同的时隙号,例如分别有三个节点:一个节点在深度  $3i$  使用时隙 #0,一个节点在深度  $3i+1$  使用时隙 #1,另一个节点在深度  $3i+2$  使用时隙 #2。

对于 FSA 的算法的应用,如图 2 为在树链路模型下节点 1、节点 2 和节点 3 的时隙分配图,对应于图 1 树链路模型,将灰色表示休眠的时隙,白色表示传送数据的时隙,黑色表示接收数据的时隙。在图 2 中:节点 1 的前 3 个帧用来接收和发送子端节点的数据,1 个帧用来发送自己的数据,4 个帧共包括了 4 个发送时隙、5 个休眠时隙和 3 个接收时隙,在图 1 中由于节点 1 处于深度  $3i+1$ ,因此使用时隙 #1 来发送数据;而类似地,节点 2 前 2 个帧用来接收和发送子端节点的数据,1 个帧用来发送自己的数据,且节点的深度为  $3i+2$ ,因此使用时隙 #2 来发送数据;而节点 3 只需要将自己的数据发送给父端节点,因此只需要一个时隙,深度为  $3i$ ,使用时隙 #0 发送数据。时隙分配符合“发送时隙# = 深度 mod 3”。汇聚点 sink 需要 7 个帧,是节点 1 和节点 5 的帧需求的总和,且它们需要成为一个超帧。在帧时隙对分配算法生成的时间表中本文分析浪费的时隙数,给定一个树拓扑,FSA 算法开始用 SF 调度作为帧的数量,当一个汇聚点不具有父端时对应的节点数量减 1。除了汇聚节点外的每一个节点是被分配唯一的帧,以此将它自己的数据包发送到它的父端。这些唯一的帧被称为所述节点的所有者帧,一旦在其自己的帧期间每一个节点能够确定可能被浪费的时隙数,则对于给定的树拓扑,浪费的时隙总数就可以求出。



图2 基于树拓扑的时隙分配图

**引理1** 在 FSA 算法中,深度为 1 的每一个节点对于其自身的帧总会浪费两个时隙。

**证明** 一个深度为 1 的节点是被分配所需要的来自汇聚节点的帧数量,并且使用专门用于发送它自己的(本地生成的)数据到其父端(即汇聚节点)的所有者帧。一个时隙在其所有者帧内是可被利用的,此外它不接收在其所有帧内任何子端的数据包,因此有两个时隙被浪费。

**引理2** 在 FSA 算法中,深度为 2 的每一个节点对于其自身的帧总会浪费一个时隙。

**证明** 在 FSA 算法中深度为 2 的节点是从父端获取所需要的帧数量,并且仅使用其所有者帧来发送一个数据包到其父端,节点使用时隙 #2 来进行数据传输。在这种情况下,节点的父端,其深度为 1,在相同帧内可利用时隙 #1 用于转发数据。因为在其所有者帧期间节点没有接收到任何数据包,因此

一个时隙(时隙 #0)是被浪费的。

**引理3** 在 FSA 算法中,深度大于 2 的节点不会浪费任何时隙。

**证明** 对于一个深度为  $i+3$  的节点,给定它的所有者帧,该节点使用时隙  $((i+3) \bmod 3)$  来进行数据传输,它的深度为  $i+2$  的父端使用时隙  $((i+2) \bmod 3)$  来转发所接收的数据包,并且其深度为  $i+1$  的初始父端使用时隙  $((i+1) \bmod 3)$  在其所有者帧期间来进一步转发数据。其结果是三个节点可以利用一组时隙  $(i+3) \bmod 3$ 、 $(i+2) \bmod 3$  和  $(i+1) \bmod 3$ ,此时没有时隙是浪费的。

**推论3** 给定一个带有汇聚节点的树,浪费的时隙数量在 FSA 算法中用  $F(\text{sink})$  表示:

$$F(x) = \sum_{k \in c(x)} (|c(x)| + 2) \quad (6)$$

**证明** 根据引理 1 ~ 3,可以得到:

$$F(x) = (2N_1 + N_2 + \dots + 0) * \sum_{k=3} N_k \quad (7)$$

其中  $N_k$  表示在深度  $k$  的节点数量。

$$F(x) = 2 * |c(x)| + \sum_{k \in c(x)} |c(x)| = \sum_{k \in c(x)} (|c(x)| + 2) \quad (8)$$

根据上述的推理本文可以证明推论 3。

根据推论 3, FSA 算法不可避免地浪费了一些时隙,为了克服 FSA 算法的缺陷,本文提出了一种新的基于需求的时隙分配 (Demand-based Slot Allocation, DSA) 算法,其中每个节点都会声明它的时隙需求,例如它能够成功传递它的感测数据到汇聚节点,并且被分配对应于该时隙需求的时隙数。DSA 算法可以直接解决存在于 FSA 算法的问题,DSA 算法不限制树形拓扑结构的构造方式,因为对于接收到的数据包转发它不重复使用时隙空间,它可以通过分配一个唯一的时隙发送到每个节点防止节点之间数据传输的互相干扰并且不浪费时隙。DSA 算法通过一个接收时隙和发送时隙的序列形式分配时隙到节点,这种方式的时隙分配简化了数据包的聚合和过滤并保存了时隙,保留的时隙允许节点较早进入睡眠状态;此外,它在很大程度上可以减少接收端切换时间的次数。

### 3 基于时隙需求的分配方法

本文假设一个最小深度的树是被构成一个先验并且每一个节点都知道自己的深度,并具有自己的父端和子端的信息。根据推论 2, SF 在一个给定的树中是通过计算所有节点的时隙需求来获得。

$$SF = T_v = \sum_{k \in c(v)} T_k^p \quad (9)$$

根据推论 1,如果节点  $i$  具有一个中间节点,且  $T_i^{pi} = 1$ ,则

$$T_i^{pi} = \sum_{k \in c(i)} T_k^s + |A(i)| \quad (10)$$

如果节点  $i$  是属于树状结构的一个叶节点,基于推论 1 和推论 2,本文可以从每个叶节点开始来计算出每个节点的时隙的需求。下面给出了基于需求的时隙分配算法的算法流程,在该算法中,除了汇聚节点外的每一个节点在完成计算需求后会被要求发送一个信息到汇聚端,算法的复杂度为  $O(n)$ ,  $n$

表示节点数量。

算法 1 DHS 算法。

- 1) For node  $i$ , slot demand request message ( $T_i^p, |A(i)|$ )
- 2) IF node  $i$  is not a leaf THEN
- 3)     Waits until it receives ( $T_i^p, |A(i)|$ ) from all its children
- 4)     END IF
- 5) IF node  $i$  is a sink THEN
- 6)     Node  $i$  calculates according to Corollary 2
- 7)     ELSE
- 8)         A leaf or an intermediate node
- 9)         Node  $i$  calculates  $T_i^p$  based on Corollary 1.
- 10)        Node  $i$  sends ( $T_i^p, |A(i)|$ ) to  $p_i$
- 11)     END IF

#### 4 实验与分析

为了验证本文算法的有效性,本文对算法的能量效率、节点的负载能力以及网络生命周期进行验证,采用 Matlab 7.1 仿真软件对算法进行编程仿真。每个节点产生一个数据包,如果一个节点有数据,它会在分配给它的时隙内传输数据。在实验中  $k$  表示给定的节点数量,其他仿真参数的设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	值
时隙大小	7 ms
帧(FSA)	3
超帧(FSA)	$k \times$ 节点帧大小
传输的单位能耗	-20 dB/m
信道频率	2.2 GHz
噪声因子	12 dB
路径衰落模型	2-ray
节点传输范围	50 m
节点数量	25
传感器能量模型	MicaZ
传感器网络范围	100 m $\times$ 100 m
仿真时间	1000 s

对于网络的能量效率,本文假设网络初始能量为  $E_s$ ,仿真结束后网络剩余能量为  $E_t$ ,仿真结束后汇聚端成功接收的数据包数量为  $C$ ,则网络能量效率定义为:

$$P_E = (E_s - E_t) / C \quad (11)$$

对于节点的负载能力,本文采用以下的模型公式来定义节点的负载指数:

$$load = \left[ \sum_{i=1}^{k(d)} (B(n_d^i) + A(n_d^i)) \right] / N_d \quad (12)$$

其中:  $n_d^i$  表示在树拓扑中位于深度为  $d$  的第  $i$  个节点,  $N_d$  表示在树拓扑中位于深度为  $d$  的节点数量,  $B(n_d^i)$  表示在节点  $n_d^i$  处接收到的数据包数量,  $A(n_d^i)$  表示在节点  $n_d^i$  处传输的数据包数量。

对于网络的生命周期,以第一个节点死亡的时间为准。

为了使实验结果更加具有说服力,从而证明本文提出的基于动态树拓扑的多时隙分配无线传感器网络数据传输算法的有效性,本文还采用了实验对比的方法,在相同的仿真条件下通过与文献[10]提出的基于数据传输优化的无线传感器

网络的生命周期延长算法,以及文献[12]提出的基于能量感知和时隙分配的可靠数据传输算法进行实验结果对比,来分析本文算法的性能,各个算法都采用表一提供的实验仿真参数,实验模拟环境及所提供的节点能量、传输范围等初始条件都相同。

本文先进行了验证算法网络能量效率的仿真实验,仿真时间为 1000 s,每相隔 200 s 记录一次  $P_E$  值,得到了图 3 的结果。从图 3 可看出:算法的  $P_E$  值随时间变化在逐渐增大,因为网络节点的能量消耗量在逐步提升,由于成功接收的数据包也会逐渐增多,因此在仿真进行到一段时间后  $P_E$  值的增长速度会逐渐放缓。 $P_E$  值越大,说明成功接收单位数据包的能量代价越大,网络能量效率越低。从图 3 可看出,文献[12]算法的  $P_E$  值最大,网络的能量效率最低,而本文方法采用基于时隙需求的分配方法,为节点分配传输数据的所需时隙,在一定程度上减少了网络拥塞,提高了网络的数据传输效率,减少了由于数据包重发带来的过多的能量消耗量。

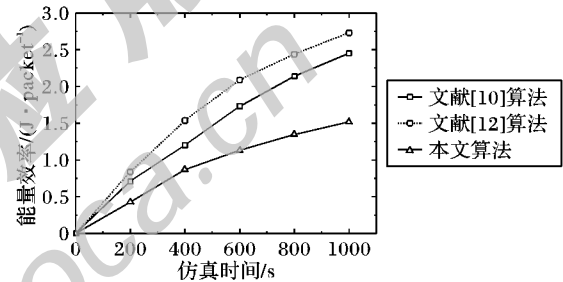


图 3 网络能量效率对比

在相同的仿真条件下本文针对算法的节点负载指数  $load$  情况进行了 1000 s 的仿真测试,  $load$  越高,说明节点的负载能力越强,即数据处理能力越强。从图 4 可看出,相比文献[12]算法,本文方法和文献[10]算法的节点负载指数  $load$  都较高,通过本文的时隙分配方法可以减少节点之间数据传输干扰,在自己的时隙期间成功地发送和接收较多的数据包,因此具有较强的负载能力,文献[10]算法通过优化的多跳数据传输的最佳数学方程来讨论节点的通信问题,在一定程度上提高了数据包的处理效率。

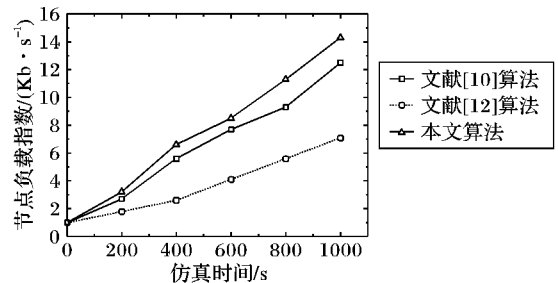


图 4 节点负载指数对比

由于无线传感器网络的每一个节点都承担着数据采集任务,也承担着其他节点的感测数据的转发任务,一旦有节点过早死亡,会对无线传感器网络的任务执行进程造成影响。因此为了更好地评估算法的性能,网络的生命周期也作为了对算法性能验证的一个重要指标。在不限制时间的前提下,通过逐渐增大节点的数量,得到网络第一个节点死亡的时间,并进行记录,得到了图 5 的结果。

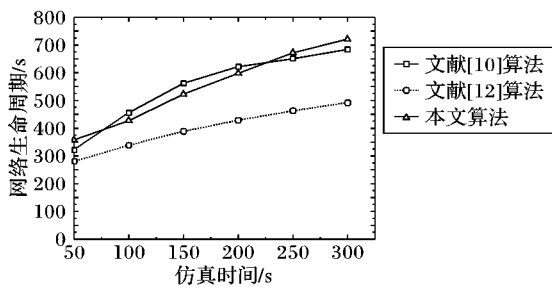


图5 网络生命周期对比

从图5可看出,文献[10]算法对于网络生命周期的优化时作为一个重要的研究问题来进行探讨,因此取得了较好的效果。而本文方法也同样表现出明显的优势,尽管在节点数量少于200时,网络的生命周期不比文献[10]算法长,但在节点数量超过250后,本文算法的网络生命周期开始赶超文献[10]算法,比较适用于节点数量较多的情况。这是由于动态树拓扑的多时隙分配可以通过分配一个唯一的时隙发送到每个节点,防止节点之间数据传输的互相干扰并且不浪费时隙,通过这种减少节点之间数据传输时隙冲突的方法,可以减少数据包碰撞概率,而数据包碰撞概率的减少意味着数据包重传次数的减少,在一定程度上节省了节点用于数据包重传所消耗的能量,使得节点寿命得到延长。当节点数量越多时,数据包碰撞概率增加,而此时更能展现本文算法的节能优势。

## 5 结语

本文提出了一种基于动态树拓扑的多时隙分配无线传感器网络数据传输算法,在节点不相交的方式下通过给每一个节点分配时隙,并给出了接收时隙的一个序列模式和发送时隙的序列模式,这样的时隙分配允许节点更加有序且干扰更少的情况下接收到节点发送的数据包,从而提高了信道的利用效率并均衡了网络的能量消耗。并采用了基于需求的时隙分配算法来减少时隙的浪费问题,使得节点在所需的时隙下进入数据感测、收发以及睡眠状态,提高了数据传输效率。仿真实验针对了网络的能量效率、节点的负载能力以及网络生命周期进行算法性能验证。从仿真数据及对比情况来看,本文的数据传输技术具有较好的能量效率与数据处理效率。

### 参考文献:

- [1] TANG L, SUN Y, GUREWITZ O, *et al.* PW-MAC: an energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2011 INFOCOM. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1305–1313.
- [2] WANG P, AKVILDIZ I F. Spatial correlation and mobility-aware traffic modeling for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(6): 1860–1873.
- [3] DJENOURI D, BALASINGHAM I. Traffic-differentiation-based modular QoS localized routing for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(6): 797–809.
- [4] CELANDRONI N, FERRO E, GOTTAO A, *et al.* A survey of architectures and scenarios in satellite-based wireless sensor networks: system design aspects[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2013, 31(1): 1–38.
- [5] VIR D, AGARWAL S K, IMAM S A. Traffic based energy consumption analysis and improve the lifetime and performance of MAC protocols in Ad Hoc wireless sensor networks[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2013, 3(3): 335–340.
- [6] WATKINS L, CROSBY G V, SHARMIN A. Using network traffic to infer power levels in wireless sensor nodes [C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2014: 864–870.
- [7] LI M, JING Y, CHEN X. A cross-layer congestion control algorithm for wireless sensor network [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2012, 33(1): 10–20. (李明维, 井元伟, 陈向勇. 一种无线传感器网络跨层拥塞控制算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(1): 10–20.)
- [8] SHAN L, WANG J, LIU Z, *et al.* Maximum lifetime routing with data aggregation in wireless sensor networks [J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 609–617. (单立群, 汪晋宽, 刘志刚. 无线传感器网络中最大化网络寿命的数据聚合路由[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 609–617.)
- [9] HU X. Agent data separation strategy for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2011, 23(11): 2946–2954. (胡晓敏. 无线传感器网络 Agent 数据分流策略[J]. 软件学报, 2011, 23(11): 2946–2954.)
- [10] ARKIN E M, EFRAT A, MITCHELL J S B, *et al.* Data transmission and base-station placement for optimizing the lifetime of wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 12(1): 201–218.
- [11] LU H, LI J, GUIZANI M. Secure and efficient data transmission for cluster-based wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(3): 750–761.
- [12] OH H, HAN T D. A demand-based slot assignment algorithm for energy-aware reliable data transmission in wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2012, 18(5): 523–534.
- [13] ARIFUZZAMAN M, MATSUMOTO M, SATO T. An intelligent hybrid MAC with traffic-differentiation-based QoS for wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2391–2399.
- [14] PETRIOLI C, NATI M, CASARI P, *et al.* ALBA-R: load-balancing geographic routing around connectivity holes in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(3): 529–539.
- [15] ZHOU J, CHEN C L P, CHEN L, *et al.* A user-customizable urban traffic information collection method based on wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1119–1128.
- [16] MURTHY S G, SOUZA R J D, VARAPRASAD G. Network lifetime analytical model for node-disjoint multipath routing in wireless sensor networks [J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2013, 10(2): 163–175.
- [17] YANG D, GILDLUND M, SHEN W, *et al.* CCA-embedded TDMA enabling acyclic traffic in industrial wireless sensor networks [J]. Ad Hoc networks, 2013, 11(3): 1105–1121.
- [18] RAM M, KUMAR S. Analytical energy consumption model for MAC protocols in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. Piscataway: IEEE Press, 2014: 444–447.