

文章编号 1004-924X(2014)02-0474-07

能量有效的分布式链路调度协议

董恩清¹, 乔富龙¹, 邹宗骏¹, 王佳仁¹, 张德敬¹, 李立^{2*}

(1. 山东大学(威海)机电与信息工程学院, 山东威海 264209;

2. 中山大学肿瘤医院影像与微创介入中心, 广州 510060)

摘要:提出了一种基于图着色法的无线传感器网络分布式链路调度(DLS)协议以减小调度周期长度、降低网络能耗。采用的策略是先对任意节点构建两跳邻居范围内的冲突图,然后根据每条链路在干扰图中的优先级及干扰度决定时隙分配的先后顺序,从而解决传统随机调度方法调度周期较长及节点状态转换频繁的问题。由于该调度策略尽可能地为节点分配相邻时隙,减少了节点不必要的状态转换,从而降低了网络能耗。对基于干扰度和优先级的联合调度策略表现出的减小调度周期长度、降低网络能耗的特点进行了分析。网络仿真结果表明,DLS协议比DS-fPrIM(Distributed Scheduling-fixed Power Protocol Interference Model)及DRAND(Distributed RANDOMized time slot scheduling)协议的调度周期长度少1~2个时隙,其能耗与DS-fPrIM协议的调度能耗相当,但二者都比DRAND协议的调度能耗低。另外DLS协议比DS-fPrIM及DRAND协议平均每周期少1次状态转换,说明提出的分布式链路调度协议能效较高。

关键词:无线传感器网络;链路调度;调度优先级;干扰度;状态转换

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0474

Energy efficient distributed link scheduling protocol

DONG En-qing¹, QIAO Fu-long¹, ZOU Zong-jun¹, WANG Jia-ren¹, ZHANG De-jing¹, LI Li^{2*}

(1. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering,
Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China;

2. Imaging Diagnosis and Interventional Center, SunYat-sen University
Cancer Center, Guangzhou 510060, China)

* Corresponding author, E-mail: enqdong@sdu.edu.cn, li2@mail.sysu.edu.cn

Abstract: To decrease the scheduling length and energy cost of a wireless sensor network, a Distributed Link Scheduling (DLS) protocol was proposed based on graph coloring. With proposed scheme mentioned in the protocol, every node was required to construct its two-hop conflict graph, and the scheduling order of every link was decided by its priority and interference degree in the conflict graph. The proposed DLS algorithm relaxes the problem of longer scheduling caused by randomly scheduling and frequent state transition in traditional algorithms. Since the DLS can assign the adjacent slot for every node, the times of node's state transition and the energy cost can be decreased. The efficiency on decreasing the scheduling length and network energy cost of DLS was analyzed. The simulation results show that the scheduling length of the proposed DLS protocol is less about 1-2 slots than those

收稿日期:2013-06-08;修订日期:2013-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 81371635, 81071207, 81271622);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20120131110062);山东省科技发展计划资助项目(No. 2013GGX10104);华南肿瘤学国家重点实验室开放基金(HN2013-08)

of the Distributed Scheduling-fixed Power Protocol Interference Model (DS-fPrIM) and Distributed RANDomized time slot scheduling (DRAND) and its scheduling energy cost is the same as that of the DS-fPrIM, but less than that of the DRAND. Moreover, the state transition of the DLS is once less than those of the DS-fPrIM and DRAND. The results also indicate that the proposed DLS protocol has good performance on energy efficiency.

Key words: wireless sensor network; link scheduling; scheduling priority; interference degree; state transition

1 引言

无线传感器网络由大量节点构成,它需要通过多跳的方式实现远程节点与基站的通信^[1-3]。无线传感器网络能耗主要来自数据传输、数据处理以及传感器的感知能耗,其中,以传输能耗为主。为了节约能量,多路访问控制(Medium Access Control, MAC)协议应尽可能地使节点保持睡眠^[4]。

无线传感器网络的 MAC 协议主要有基于竞争的和基于时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的两类。基于竞争的 MAC 协议虽然能够较好地适应网络拓扑的变化,但是,大量的控制信息以及不必要的空闲侦听增加了网络能耗,降低了信道利用率。基于 TDMA 的调度协议是通过为节点分配时隙来完成数据的接收和发送的,虽然其适应网络拓扑变化的能力较差,但是可以有效地避免冲突,实现数据的无干扰传输,因此,更适合于大规模无线传感器网络。基于 TDMA 的调度协议主要分为中心式和分布式两类。

中心式调度协议是通过求解特定能量模型使吞吐量最大化的约束问题进行时隙分配。文献[5]通过研究无线传感器网络总能量、吞吐量与网络传输延迟之间的关系,提出了可同时满足能量、吞吐量和延迟三方面要求的中心式链路调度协议。该协议给出一种求解约束优化问题的改进贪婪算法,得到符合最优解的链路调度方案。文献[6]基于协议冲突模型提出一种综合考虑路由、动态信道分配和链路调度的协议,通过求解近似优化算法使吞吐量最大化。在中心式的链路调度策略中,所有节点均需要将自身信息发送给汇聚节点,汇聚节点根据其收集的网络信息执行调度算法,再将调度结果发回给各节点。中心式的调度算法在节点数目较多的长距离多跳网络中,很容

易产生传输延迟和信息丢失,有明显的多跳传输漏斗效应(funneling effect)^[7],且长距离多跳转发能量消耗较多。

为了解决中心式调度算法在多跳网络应用中的缺陷,研究人员借鉴中心式调度策略的部分思想,提出了分布式的广播调度策略和链路调度策略。文献[8]提出了一种名为 DRAND (Distributed RANDomized time slot scheduling)的分布式广播调度协议,将节点的时隙分配问题转变成哲学家就餐(Randomized Dining Philosophers)问题。使其每个节点既可以成为哲学家(发送节点),也可以成为餐叉(接收节点),哲学家必须通过竞争获得使用餐叉的机会。节点之间通过投掷硬币的方式选出赢节点,赢节点优先获得调度的机会。赢节点广播 Require 信息,如果赢节点收到其邻居节点返回的 Grant 信息,则为该赢节点分配一个时隙。由于 DRAND 协议的赢节点随机产生,因此,其调度周期较长。为了减小调度周期长度,文献[9]在其基础上提出了 DD-TDMA(Deterministic Distributed TDMA scheduling)协议。DD-TDMA 协议首先为全网设定一个较大的调度周期,通过调度逐渐减小调度周期的长度,最终将所需的调度周期长度通告全网。由于 DD-TDMA 要求按照节点 ID 号的大小依次分配时隙,因此,节点的位置对算法的性能有较大的影响。文献[8-9]中,在完成调度后,当某个节点发送数据时,其邻居节点不管有没有通信需求都必须保持激活状态,这样就增加了不必要的能量开销。文献[10]提出了一种分布式的链路调度方法(Distributed Scheduling-Fixed Power Protocol Interferences Model, DS-fPrIM),链路的发送节点根据其两跳邻居节点信息建立与该链路相互干扰的 2 个集合,通过 2 个集合中未着色链路的数目决定是否进行调度。文献[8-10]都通过为节点或者链路分配当前可用的最小时隙,这样虽然

能有效地减小调度周期的长度,但是都没有考虑节点的状态转换能耗。节点的状态转换主要指节点从休眠状态转换到发送/接收状态,或者从发送/接收状态转换到休眠状态。文献[11]提出了一种为每个节点分配连续时隙的集中式调度方法,虽然能有效减少节点的状态转换次数,但是全网所需调度周期较长,信道的利用率很低。

无线传感器网络中的调度问题,实际上是延迟、吞吐量等性能的优化问题。图论方法可以解决网络中的许多优化问题,图着色(graph coloring)(包括顶点着色(vertex coloring)和边着色(edge coloring))是图论中的常用方法。它被广泛用于任务调度和解决冲突问题。为了缓解中心式算法易丢包、高能耗的问题,使其适合远距离通信网络,在本课题组先前的工作中提出了一种基于顶点着色方法的分布式链路调度策略^[12]。该方法使节点通过两跳邻居范围内的干扰信息即可得到可用时隙。虽然该方法能够在一定程度上减少调度周期长度及调度能耗,但是链路的调度顺序仍然有较高的随机性,且其忽略了节点的状态转换能耗。由于传统的随机调度方法在减小调度周期长度方面有局限性,考虑到链路的调度顺序对调度周期长度的重要影响,以及减少节点频繁进行状态转换会产生的大量能耗,本文基于受到的限制最多的链路优先调度及为节点分配相邻时隙的思想,在先前工作的基础上提出了基于优先级和干扰度的分布式链路调度(Distributed Link Scheduling, DLS)策略。每条链路根据其已分配时隙的相连链路数目设置自己的优先级,优先级高的链路优先调度,优先级低的链路在优先级较高的链路调度完成后才能获得竞争信道的机会,从而降低了调度的随机性,可以有效地减小调度周期的长度。

2 网络模型

假设所有节点共享单一信道且具有相同的发射功率。在 n 个节点的无线传感器网络中,集中式的图着色算法用 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示所有节点的集合, E 表示所有的两相邻节点 v_i 和 v_j 间的有向链路的集合,则全网可用一个有向图 $G = (V, E)$ 来表示^[13]。在分布式链路调度策略中,任一节点 i 根据其两跳邻居节点信息,建立局部有

向图 $G_i = (V_i, E_i)$,节点再根据干扰模型建立局部的干扰图 $G_c = (V_c, E_c)$,通过干扰图为每条链路分配无冲突时隙。

在无线传感器网络中,链路调度的一个关键问题是如何减少或者避免干扰^[14-15]。无线传感器网络的冲突类型主要分为主要冲突和次要冲突两类。如图 1 所示,图 1(a)~1(c)中,同一个节点同时进行发送或者接收,即 2 条链路具有相同的节点,这类冲突称为主要冲突。图 1(d)中 2 条链路不存在共同节点,但是一条链路的发送对另一条链路的接收产生干扰,这类冲突称为次要冲突。冲突模型用于描述无线网络的冲突关系,常用的 2 种无线网络冲突模型是协议模型和物理模型^[16]。物理模型利用信扰比来确定数据包能否正确接收,在模型中加入了路径衰减系数,更多地考虑了物理层细节,更接近真实,但是实现较复杂。协议模型通过两节点间的距离与通信半径和干扰半径的关系来确定数据包能否正确接收,协议模型较为理想,实现简单,能够反映网络的冲突关系,并且,在物理模型下进行链路调度是非常困难的^[17],因此本文采用协议干扰模型构建网络的冲突图。

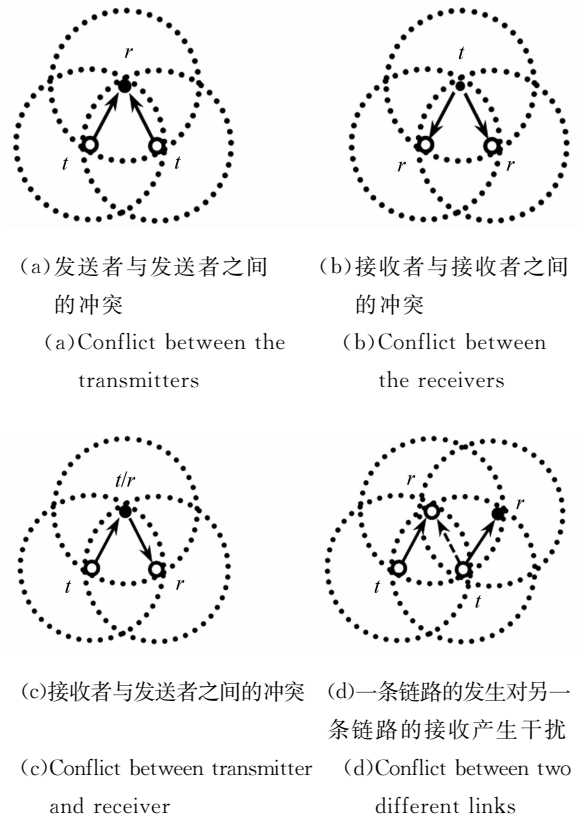
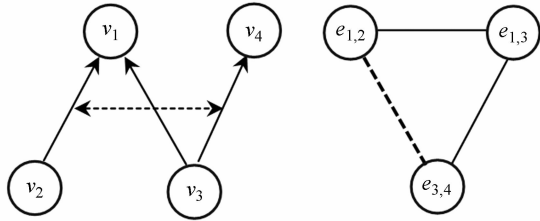


图 1 无线传感器网络的冲突关系

Fig. 1 Conflicts of Wireless Sensor Networks

冲突图 G_c 可以较好地反映链路之间的冲突, 其中的每个顶点对应局部通信图 G_i 中的一条链路, 每条边表示 G_i 中的链路冲突。图 2(a) 给出了一个局部通信图 (G_i)。假设无线网络中 4 个节点间存在 3 条链路, 链路 (v_1, v_2) 与链路 (v_1, v_3) 之间, 链路 (v_1, v_3) 与链路 (v_3, v_4) 之间存在主要冲突, 链路 (v_1, v_2) 与链路 (v_3, v_4) 之间存在次要冲突。



(a) 网络通信图 (G_i) (b) 链路冲突图 (G_c)
(a) Communication graph (G_i) (b) Link conflict graph (G_c)

图 2 通信图转换成冲突图

Fig. 2 Communication graph transformed to conflict graph

3 分布式链路调度策略及有效性分析

3.1 提出的分布式链路调度策略

为了降低链路调度周期长度, 提高时隙空间利用率, 减少节点不必要的状态转换, 本文提出了一种基于优先级和干扰度的联合调度协议 (DLS)。将一条有向链路的 2 个节点分别称为调度节点和尾节点, 链路的时隙由调度节点进行分配, 调度节点调度的链路称之为调度链路。

DLS 调度协议主要包括三个阶段: 准备阶段、调度阶段以及干扰信息更新阶段。准备阶段主要是收集两跳邻居节点信息, 并根据干扰图构建两跳范围内的干扰信息。干扰信息包括每条调度链路的优先级、干扰度、干扰链路集合以及每条干扰链路的时隙。图 3 为提出的链路调度策略示意图。假设链路 L_{ab} 、 L_{ac} 、 L_{bc} 3 条链路中, 链路 L_{ab} 的优先级最高, 链路 L_{ab} 将优先分配时隙。节点 a 根据局部干扰信息为链路 L_{ab} 分配一个可用时隙, 并将该调度信息进行广播, 节点 b 、 c 收到调度信息后, 更新自己干扰图内的干扰信息, 并设置相应链路的优先级, 然后将更新后的优先级信息进行广播。

3.2 DLS 调度协议的实现

下面将给出 DLS 的具体实现步骤。

(1) 准备阶段: 所有节点广播自己的位置信

息以及一跳邻居节点信息, 使每个节点建立包含其两跳邻居节点信息的局部有向图。每个节点再根据干扰模型建立其每条调度链路的干扰信息, 其中, 优先级初始化为零, 每条调度链路的干扰度通过干扰图中的干扰链路数进行确定。为保证链路信息在两跳邻居节点内的一致性, 干扰集合建立后, 每个节点广播其调度链路的干扰信息, 其邻居节点收到该信息后, 更新相应链路的有关信息。如果某邻居节点收到该信息后, 其干扰图内找不到相应的链路, 则该邻居节点将该链路的相关信息加入的自己的干扰图中, 更新自己的干扰信息并进行广播。

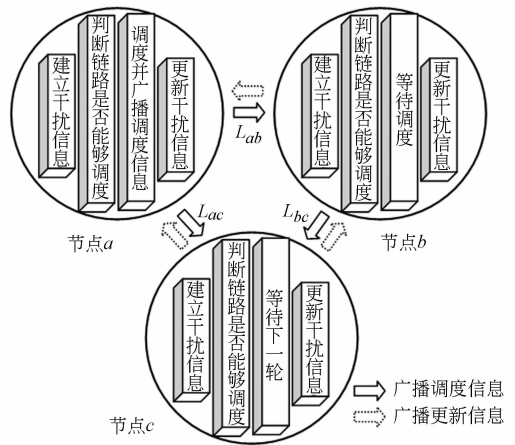


图 3 DLS 过程示意图

Fig. 3 Schematic of DLS processing

(2) 调度阶段: 调度节点根据自己干扰图中的优先级和干扰度大小进行调度, 优先级高的优先调度; 优先级相同, 则干扰度大的链路优先调度; 优先级和干扰度相同, 则这些链路通过竞争随机产生一条链路进行优先调度。调度完成后, 调度节点将该链路的优先级和干扰度置零, 然后, 广播该调度信息。图 4 为该调度策略的调度流程图。

为了更好地表述 DLS 调度算法的逻辑关系, 下面进一步用伪代码的形式详细地表示图 4 中的调度算法。

调度算法伪代码:

```
Collect 2-hop neighbors' information,
Creat a conflict set with the conflict model.
While(1)
{
    If all links have been scheduled
    {
```

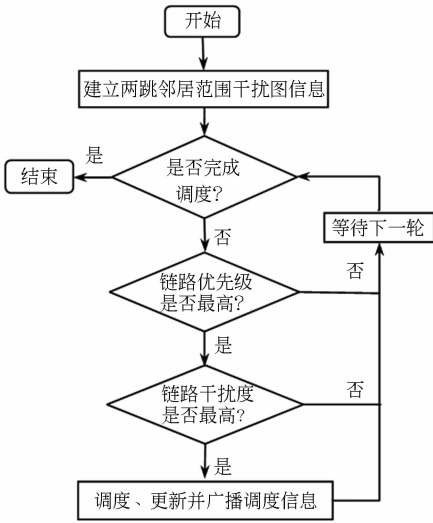


图 4 DLS 调度算法流程图

Fig. 4 Flowchart of DLS algorithm

Scheduling end;

Break;

}

else

{

If the priority of the scheduling-link is the biggest

{

If the degree of the scheduling-link is the biggest Schedule in the link;

}

else

Wait for the next round;

}

}

时隙分配算法:

Find out all slots that the scheduling-link can be used now

For all slots that the scheduling-link can be used

Calculate the state transition of the two nodes;

Find out the slot that make the state transition smallest.

Assign the slot the scheduling-link.

为减少节点不必要的状态转换,DLS 策略尽

可能地为每个节点分配相邻时隙。该调度策略要求首先找出调度链路的所有可用时隙,然后从可用时隙中查找是否有与该链路的 2 个节点已分配时隙相邻的时隙。如果有可用的相邻时隙,则将该时隙作为调度链路的最终时隙,否则将为它分配一个当前可用的最小时隙。

(3) 干扰信息更新阶段:在节点收到调度链路的调度信息后,更新该链路在自己干扰图内的相关信息。如果节点的某条调度链路与该链路相连,则将其优先级加 1,并广播更新后的干扰信息。收到该干扰信息的节点更新自己的干扰图信息。

3.3 有效性分析

由于链路时隙分配的限制主要来自当前调度周期长度、已分配给干扰链路的时隙以及已分配时隙的干扰链路个数。在不增加调度周期长度的前提下,由于链路受到的限制越多,其可用时隙的数目就越少。假设链路 i 为受限最多的链路,其当前可用时隙数及未分配时隙的干扰链路数分别为 T_i, L_i ,当 $T_i < L_i$ 时,考虑以下两种方法:方法一,先为链路 i 的干扰链路分配时隙,则链路 i 将无可用时隙,从而导致调度长度增加;方法二,先为链路 i 分配时隙,即链路 i 的优先级最高,由于其干扰链路仍然可以选用 T_i 以外的时隙,方法二的调度长度必将小于方法一。因此,相比随机调度的 DRAND 算法以及只基于干扰度调度的 DS-fPrIM 等算法,DLS 可以有效减小调度周期长度。

由于优先级较低的链路需要等待优先级较高的链路调度完后才能获得竞争信道的机会,因此,提出的分布式调度策略能够有效地减少竞争、碰撞的发生及数据重传的概率,从而降低了网络能耗。另外,在目前存在的一些调度策略中,均为节点或者链路分配当前可用的最小时隙,这虽然能够有效降低调度周期长度,但是却忽视了节点进行不必要状态转换的能耗。本文提出的 DLS 由于在减小调度周期的同时,尽可能地为节点分配相邻时隙,从而减少节点不必要的状态转换,能够有效地降低网络能耗。

4 仿真结果

提出的 DLS 调度策略在 NS2 (Network Simulator 2) 平台上进行仿真,并用 MATLAB 对实验数据进行处理。为了便于比较,对文献[8]提

出的 DRAND 算法以及文献[10]提出的 DS-fPrIM 算法在相同实验条件下进行了仿真。设置最大网络区域为 $900\text{ m} \times 900\text{ m}$, 网格节点间隔为 90 m , 在该区域标示出网格状分布的节点基准位置。每个节点的横纵轴坐标有 $\pm 10\text{ m}$ 的随机偏移。设置节点通信范围半径 $r_c = 120\text{ m}$, 干扰范围半径 $r_i = 200\text{ m}$, 射频频率为 914 MHz , 节点初始能量为 50 J , 发送功率为 14.88 mW , 接收功率为 12.50 mW , 其他参数值为 ns2 中默认参数。节点按照 3.2 节中的调度方式运行, 最终实现全网的有序调度。

为了验证该分布式链路调度策略的调度周期长度以及节点不必要的状态转换方面的性能, 将 DLS 调度策略从调度周期长度、节点平均状态转换次数以及调度能耗 3 个方面与以上 2 种协议进行比较。图 5 为调度周期长度对比图, 可以看出 DLS 能够有效减少调度周期的长度, 与其他 2 种方法相比, DLS 调度策略可以将调度周期长度减少 2 个时隙左右。图 6 是节点平均状态转换次数对比图, 从图 6 可以看出, 通过尽量为链路的 2 个节点分配连续时隙, 可以有效地减少网络节点的状态转换次数, 从而减少了不必要的能量开销。提出的 DLS 调度策略较其他 2 种算法相比可以减少全网 10% 以上的状态转换次数。图 7 给出了 3 种算法调度完成后节点的平均剩余能量, 由于提出的调度策略借鉴了 DS-fPrIM 算法的部分思想, 因此两者的调度能耗差别不大。DLS 和 DS-fPrIM 协议通过有序调度降低了调度过程中控制消息的碰撞及重发概率, 而 DRAND 算法在调度过程中需要频繁进行信道竞争及采取多次握手机制, 因此, 其调度能耗比其他 2 种算法大。

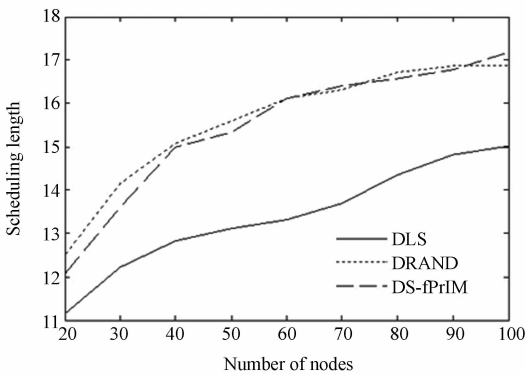


图 5 3 种协议调度周期长度对比图

Fig. 5 Comparison of period lengths for 3 protocol schedulings

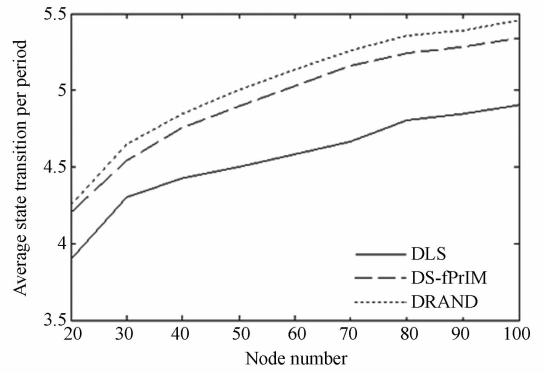


图 6 每周节点平均状态转换次数

Fig. 6 Average times of nodes state transmitted per period

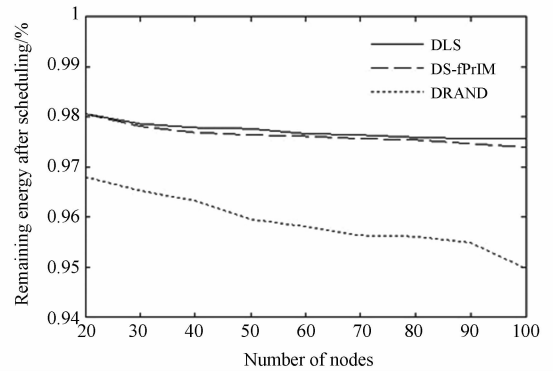


图 7 调度完成后剩余能量对比图

Fig. 7 Remaining energy after scheduling by using 3 methods

5 结论

本文提出了一种基于图着色的无线传感器网络的分布式链路调度协议, 通过分析无线传感器网络的冲突类型, 设计了调度协议, 该协议可以减少调度周期及节点不必要的状态转换。通过实验对 DLS 与 DRAND、DS-fPrIM 进行了对比。实验显示, 提出的 DLS 调度策略比 DRAND 和 DS-fPrIM 协议降低了 1~2 个调度周期时隙, 时隙空间的利用率有所提高。全网节点的状态转换次数较其它 2 种方法降低了 10% 以上, 从而减少了不必要的能量开销。但是由于提出的调度策略依赖于干扰图信息, 因此两跳邻居节点信息的完整性对调度策略的性能有较大的影响。另外, 由于提出的调度策略中每调度周期只为每条有向链路分配一个时隙, 没有考虑不同网络流量下的需求, 这将在后续的工作中进行研究。

参考文献:

- [1] GANDHAM S, DAWANDE M, PRAKASH R. Link scheduling in wireless sensor networks: distributed edge coloring revisited [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008, 68(8): 1122-1134.
- [2] 马奎, 黄河清, 沈杰, 等. 基于混合汇聚节点的无线传感器网络数据收集方法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1752-1758.
- MA K, HUANG H Q, SHEN J, *et al.*. A Data Collection Method with Hybrid Sinks in Wireless Sensor Networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1752-1758. (in Chinese)
- [3] 鲁琴, 罗武胜, 胡冰. 无线传感网基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同实现 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 240-247.
- LU Q, LUO W SH, HU B. Multi-node cooperative JPEG2000 implementation based on neighbor clusters in wireless sensor networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 240-247. (in Chinese)
- [4] 陈德富, 陶正芳, 朱建平. 一种自适应倾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.
- CHEN D F, TAO ZH F, ZHU J P. An adaptive polling periods MAC protocol for wireless sensor networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1290-1293. (in Chinese)
- [5] GANG L, KRISHNAMACHARI B. Energy efficient joint scheduling and power control for Wireless Sensor Networks [C]. *IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Santa Clara, California, USA*, 2005.
- [6] Mahmoud Al-Ayyoub, Himanshu Gupta. Joint routing, channel assignment, and scheduling for throughput maximization in general interference models [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4): 553-565.
- [7] FAN Z ZH, CHEN Y ZH. Mobility-assisted hierarchy for efficient data collection in Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Communications*, 2010, 5(9): 665-673.
- [8] RHEE I. Randomized dining philosophers to TD-MA scheduling in Wireless Sensor Networks [S]. *In Technical Report, Computer Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC*, 2004.
- [9] WANG Y, IAN H N. A deterministic distributed TDMA scheduling algorithm for Wireless Sensor Networks [C]. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007: 2759-2762.
- [10] WANG W ZH. Efficient interference-aware TDMA link scheduling for static Wireless Networks [C]. *In Proc. Of ACM Mobi. Com.*, 2006: 262-273.
- [11] MA J CH. Energy efficient TDMA sleep scheduling in Wireless Sensor Networks [C]. *Society Subject Matter Experts for Publication in the IEEE INFOCOM 2009 Proceedings*, 2009: 630-638.
- [12] LI X Y, DONG E Q, QIAO F L. Vertex coloring based distributed link scheduling for Wireless Sensor Networks [C]. *The 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2012)*: 754-759.
- [13] MARX D. Graph coloring problems and their applications in scheduling [J]. *Periodica Polytechnica, Electrical Engineering*, 2004, 48(1): 11-16.
- [14] WANG Q, WU D O. Delay-constrained optimal link scheduling in Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(9): 4564-4577.
- [15] ZHOU Y Q, LI X Y. Distributed link scheduling for throughput maximization under Physical Interference Model [C]. *The 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications; Mini-Conference*, 2012: 2691-2695.
- [16] ZHANG X L. Joint routing, scheduling, and power control for multichannel Wireless Sensor Networks with Physical Interference [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(1): 93-105.
- [17] FAN S, ZHANG L, FENG W, *et al.*. Optimization-based design of wireless link scheduling with Physical Interference Model [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(8): 3705-3717.

作者简介:



乔富龙(1988—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络功率管理技术。E-mail: qiaofulong1988@126.com

导师简介:



董恩清(1965—),男,辽宁营口人,教授,博士生导师,1987年于中国矿业大学获得学士学位,1993年于长安大学获得硕士学位,2002年于西安交通大学获得博士学位,主要从事无线通信技术、无线传感器网络、医学图像处理等方面的研究。E-mail: enqdong@sdu.edu.cn
(版权所有 未经许可 不得转载)