

# 无线传感器网络中联合路由优化的 高效链路调度

贾 杰<sup>1,2</sup>, 代恩亮<sup>1</sup>, 陈 剑<sup>1</sup>, 王兴伟<sup>1</sup>, 赵林亮<sup>1</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 沈阳理工大学, 辽宁沈阳 110159)

**摘 要:** 链路调度技术是提高无线传感器网络数据传输可靠性的重要途径. 传统的链路调度算法主要关注如何寻找无干扰传输条件下的最小调度帧, 而忽视路径选择对链路调度的影响, 会导致部分链路的干扰集过大, 降低了时隙复用性. 针对这一难题, 系统分析了链路调度与路径选择及网络能耗的关系, 提出联合路径优化的高效链路调度模型. 为加快求解速度, 首先通过变量删减及模型转化, 提出基于整数规划的最优路由树构建算法; 进一步, 根据整数规划求解的路由树与链路需求, 提出基于最大干扰度优先的启发式链路调度算法. 大量仿真实验验证了本文算法的有效性.

**关键词:** 无线传感器网络; 链路调度; 路由树; 整数规划

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014) 06-1118-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.013

## Energy-Efficient Link Scheduling Combined with Routing Optimization in Wireless Sensor Network

JIA Jie<sup>1,2</sup>, DAI En-liang<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, WANG Xing-wei<sup>1</sup>, ZHAO Lin-liang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China)

**Abstract:** Link scheduling technology plays an important role in improving data transmission reliability in wireless sensor networks. Traditional link scheduling algorithms mainly focus on how to find the minimum scheduling frame under the condition of interference-free transmission, but ignore the impact of route selection on link scheduling, which leads to an expansion of interference set for some links and reduces the slot reusability. In response to this problem, the relationship between link scheduling, route selection and energy consumption is analyzed systematically, and an energy-efficient link scheduling model combined with routing optimization is presented. Through variables deletion and model transformation, an optimal routing tree construction algorithm is proposed to accelerate the solution speed based on integer programming. Furthermore, according to the routing tree and link demands achieved by integer programming, a heuristic slot allocation algorithm is proposed based on maximum degree of interference, to minimize the scheduling period. Extensive simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of our proposed algorithm.

**Key words:** wireless sensor network; link scheduling; routing tree; integer programming

## 1 引言

无线传感器网络由大量集成了传感器、处理器、无线通信等模块的低功耗节点以 Ad hoc 方式构成, 通过节点协作对监测区域的环境信息进行采集、处理和转

发, 最终实现对特定区域内目标环境参数的感知、识别、定位与跟踪等<sup>[1]</sup>. MAC 接入是传感器网络设计中面临的关键问题, 直接影响着网络生存周期、信息感知精度、传输延迟等<sup>[2]</sup>. 基于 TDMA 的 MAC 接入机制通过为各节点动态分配时隙以实时调度全网节点, 具有高效及

收稿日期: 2013-03-27; 修回日期: 2013-05-27; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61173153, No. 60903159, No. 61070162, No. 71071028, No. 70931001); 国家杰出青年科学基金(No. 61225012); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. N110404014, No. N110318001, No. N110204003, No. N120104001); 中国博士后科学基金(No. 20110491508, No. 2012T50248); 高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(No. 20120042130003); 沈阳理工大学计算机应用技术重点学科开放基金资助课题(No. 4771004kfx06); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20100042110025, No. 20110042110024); 工信部物联网发展专项资金资助项目

面向连接的服务特性,引起了广泛关注<sup>[3,4]</sup>.然而,受传感器网络资源有限及多对一通信的影响,如何实现高效的链路调度以增强数据传输的可靠性与实时性,并提高网络吞吐量,是值得研究的难点问题.

近年来,已有部分文献针对满足全网链路需求的无干扰最短调度帧问题展开研究<sup>[5-14]</sup>.鉴于无线网络干扰可以采用干扰图<sup>[5]</sup>来描述,为了寻找无冲突的链路调度机制,文献[6,7]中提出了基于图着色的启发式求解方法,但由于传感器网络的多跳特性,各链路除了需要传输自身流量外,还需要对路径上其他节点的流量进行转发,这将导致各链路具有不同的时隙需求,使得上述无干扰调度机制不能直接应用于无线传感器网络中.文献[8]则基于干扰图,系统研究了互不干扰链路调度算法的时间复杂度,提出一种多项式时间复杂度的图着色解决方案.为了降低因获取全网拓扑而引发的消息负载,文献[9,10]提出了基于局部拓扑的分布式调度机制,虽然灵活性较强,但其调度周期较长.文献[11~14]则通过考虑链路调度顺序对算法性能的影响,分别提出了最小负载优先<sup>[11]</sup>、最小干扰度优先<sup>[12]</sup>、最大干扰度优先<sup>[13]</sup>、最短跳数优先<sup>[14]</sup>的调度机制.

由于传感器网络多跳通信及多对一流量的特点, sink 附近节点需要转发更多的数据,因而调度算法应与路由机制进行协同设计,以进一步提升网络性能<sup>[15]</sup>.基于此,文献[16]在 MAC 接入时考虑了节点的具体负载需求,并通过修改握手机制以提高网络吞吐量.文献[17]采用按需路由算法生成多条路径,并根据评判标准选择一条最佳路由,再基于该路径进行时隙分配.文献[18]根据节点的初始部署与流量需求,使用已有的路由算法求出待调度链路及各链路负载,并提出基于遗传算法与混合粒子群算法的时隙分配机制.文献[19]则通过对路由、链路调度与功率控制进行跨层优化,以提高数据传输速率.文献[20]建立了物理层、MAC 层与网络层的协同优化模型,提出一种基于凸优化的求解方法,但该方法并没有利用链路并发传输的特性,当应用于大规模无线传感器网络时,容易引起较大的传输延时.

基于此,本文通过系统分析无线传感器网络流量特点及能耗模型,提出了联合路径选择的高能效链路调度模型.为了快速求解上述问题,首先通过变量删除及模型化简,提出基于整数规划的最优路由树构建机制.进一步,基于求解的调度周期下限,设计了基于启发式算法的链路调度机制,从而快速完成链路调度与时隙分配的对应关联.

## 2 网络与干扰模型

将无线传感器网络建模为有向通信图  $G = (V, E)$ , 其中,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示网络节点集合,  $v_1$  为 sink

节点,  $v_2, \dots, v_n$  为感知节点,各感知节点具有相同的通信半径  $R_c$ ;  $E$  表示网络中有向链路集,  $e_{ij} \in E$  当且仅当  $d_{ij} \leq R_c$ ,  $i$  为数据发送方,  $j$  为数据接收方,  $d_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的欧氏距离.

### 2.1 无干扰链路调度

采用协议干扰模型<sup>[5]</sup>来描述网络的干扰情况.假设网络中存在  $e_{ij}, e_{ab} \in E$  同时使用信道  $C$  进行数据通信,则链路  $e_{ij}$  与  $e_{ab}$  能够成功通信的充要条件为:  $(d_{ia} \geq R_l) \&\& (d_{jb} \geq R_l)$ ,  $R_l$  表示节点的干扰半径(通常是通信半径  $R_c$  的  $k$  倍,  $k \geq 1$ ).

引入冲突图  $G_c(V_c, E_c)$  来描述  $G(V, E)$  中链路的潜在干扰,建立一个与  $G(V, E)$  中通信链路  $E$  相对应的顶点集  $V_c$ , 表示为

$$V_c = \{e_{ij} \mid d_{ij} \leq R_c\} \quad (1)$$

使用冲突图的边  $e_c \in E_c$  描述  $G(V, E)$  中链路  $e_{ij}$  与  $e_{ab}$  ( $e_{ij}, e_{ab} \in E$ ) 存在相互干扰.链路调度问题可形式化描述为:  $\forall e_{ij} \in E$ , 寻求一种针对链路与时隙 TDMA 调度帧中各时隙的绑定关系矩阵  $Y: E \times M \rightarrow \{0, 1\}$ , 表示为

$$y_{ij}^t = \begin{cases} 1, & \text{如果链路 } e_{ij} \text{ 在时隙 } t \text{ 工作} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

定义链路  $e_{ij}$  的干扰边集为  $I(e_{ij})$ . 为了实现无干扰传输,需令相互干扰的链路处于不同时隙进行通信,即:

$$\sum_{e_{ij} \in I(e_{ij})} y_{ij}^t \leq 1 \quad (3)$$

### 2.2 流量守恒

假设初始化时,网络中共有  $Q$  ( $Q \leq n - 1$ ) 个节点向 sink 传输感知数据,其路由需求可表示为  $\langle s_q, r_q \rangle$  ( $q \in Q$ ),  $s_q, r_q$  分别表示第  $q$  个数据请求的源节点及时隙请求数.定义  $f_{ij}^{q,t}$  表示路由需求  $q$  在  $t$  时刻经链路  $e_{ij}$  传输,表示为

$$f_{ij}^{q,t} = \begin{cases} 1, & \text{如果路由 } q \text{ 在时隙 } t \text{ 使用链路 } e_{ij} \text{ 传输} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

由于当  $f_{ij}^{q,t} = 1$  时,  $y_{ij}^t = 1$  恒成立,因而有

$$f_{ij}^{q,t} \leq y_{ij}^t \quad (5)$$

为保证无干扰传输,同样有

$$\sum_{e_{ij} \in I(e_{ij})} f_{ij}^{q,t} \leq 1 (e_{ij} \in E, q \in Q, t \in T) \quad (6)$$

基于上述定义,流量守恒条件为

$$\sum_{i \in T} \sum_{e_{ia} \in E}^{k \neq 1} f_{ki}^{q,t} = \sum_{i \in T} \sum_{e_{ij} \in E}^{j \neq s(q)} f_{ij}^{q,t} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{e_{ij} \in E}^{j \neq s(q)} f_{ij}^{q,t} = r(q) (i = s_q, q \in Q, \lambda \geq 0) \quad (8)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{e_{ij} \in E}^{j \neq s(q)} f_{ij}^{q,t} = r(q) (i = 1, q \in Q, \lambda \geq 0) \quad (9)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{q \in Q} f_{ij}^{q,t} \leq \sum_{i \in T} y_{ij}^t (e_{ij} \in E, q \in Q) \quad (10)$$

其中,式(7)为中间节点的流量守恒条件,即单位调度周期内,任意节点流入时隙数等于流出时隙数;式(8)与式(9)为源节点与目的节点的流量守恒条件,即源节点只有数据流出,而目的节点只有数据流入,且流入流出总量为路由需求  $q$  的时隙请求数  $r(q)$ ;式(10)为容量约束条件,即任意链路传输的时隙数不能超过该链路被分配的总时隙数。

### 2.3 能耗模型

基于调度周期  $T$  及变量  $f_{ij}^{q,t}$ ,路由  $q$  的最终路径长度  $\Gamma_q$  可表示为

$$\Gamma_q = \sum_{t \in T} \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^{q,t} (i, j \in V, q \in Q) \quad (11)$$

假定网络中节点能耗仅与数据通信有关,节点每发送单位时隙数据的能耗为  $r_t$ ,每接收单位时隙数据的能耗为  $r_r$ ,sink 节点能量充足,不考虑其能量消耗.则路由需求  $q$  传输单位时隙数据到 sink 节点的能耗为

$$E_q = r_t \Gamma_q + r_r (\Gamma_q - 1) \quad (12)$$

图1给出了节点  $A$  传输单位时隙感知数据到 sink 节点时,网络能耗情况的简单示例.其中,路径长度为3.由能耗模型可知,整个数据路由过程共需要发送3次数据,接收2次数据,无须考虑 sink 节点接收数据产生的能耗.因而,最终能耗为  $3r_t + 2r_r$ .

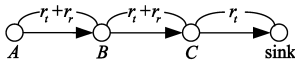


图1 路径长度与能耗

### 3 问题描述

无线传感器网络中联合路由优化的高能效链路调度问题可表述为:已知网络的路由需求  $\{ \langle s_q, r_q \rangle \mid s_q \in V, q \in Q \}$ ,需要为全网链路寻找一种最优路由,并基于该路由树,计算最优的时隙分配方案,使得该调度机制能够满足全网所有节点的传输需求,并获得最短的调度周期及最少的能量消耗.形式上,高能效链路调度问题可以表述为

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \sum_{q \in Q} E_q \right. \\ \text{s.t.} \quad & y_{ij}^t = \begin{cases} 1, & \text{如果链路 } e_{ij} \text{ 在时隙 } t \text{ 工作} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ & \sum_{e_{ij} \in I(e_{ij})} y_{ij}^t \leq 1 \\ & f_{ij}^{q,t} = \begin{cases} 1, & \text{如果路由 } q \text{ 在时隙 } t \text{ 使用链路 } e_{ij} \text{ 传输} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ & f_{ij}^{q,t} \leq y_{ij}^t \\ & \sum_{e_{ij} \in I(e_{ij})} f_{ij}^{q,t} \leq 1 (e_{ij} \in E, q \in Q, t \in T) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{t \in T} \sum_{e_{ki} \in E} f_{ki}^{q,t} = \sum_{t \in T} \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^{q,t} \\ & (i \neq s_q, i \neq 1, i \in V, q \in Q, t \in T) \\ & \sum_{t \in T} \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^{q,t} = r(q) (i = s_q, q \in Q, \lambda \geq 0, t \in T) \\ & \sum_{t \in T} \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^{q,t} = r(q) (i = 1, q \in Q, \lambda \geq 0, t \in T) \\ & \sum_{t \in T} \sum_{q \in Q} f_{ij}^{q,t} \leq \sum_{t \in T} y_{ij}^t (e_{ij} \in E, q \in Q, t \in T) \\ & \Gamma_q = \sum_{t \in T} \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^{q,t} (i, j \in V, q \in Q, t \in T) \\ & E_q = r_t \Gamma_q + r_r (\Gamma_q - 1) \\ & y_{ij}^t, f_{ij}^{q,t} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (13)$$

总体优化目标为最小的调度周期及最小的全网能耗.上述优化模型可归属于多目标混合整数规划问题,且属于 NP 难问题<sup>[8]</sup>.

### 4 问题求解

针对无线传感器网络中联合路由优化的高能效链路调度问题,提出一种两阶段求解机制,首先利用多目标加权将其化简为单目标优化问题,同时通过消除 0、1 整数变量,并使用常规整数规划方法快速求解当前组合目标下的最优路由由拓扑及调度周期.进一步,针对求解的路由拓扑图及调度周期,提出求解最小链路调度周期的启发式链路调度算法.

#### 4.1 基于整数规划的路径选择

定义变量  $y_{ij} = \sum_{t \in T} y_{ij}^t$  表示链路  $e_{ij}$  在调度周期  $T$  内分配的总时隙数,可知该变量满足

$$0 \leq y_{ij} \leq T \quad (14)$$

对于式(3),将不等式两边同时在调度周期  $T$  内求和,并交换求和的顺序,可将其改写为

$$\sum_{e_{ij} \in I(e_{ij})} y_{ij} \leq T \quad (15)$$

定义  $f_{ij}^q = \sum_{t \in T} f_{ij}^{q,t}$  为表示在调度周期  $T$  内,路由需求  $q$  经由链路  $e_{ij}$  传输的流量,可将流量守恒条件改写为

$$\begin{cases} \sum_{e_{ki} \in E} f_{ki}^q = \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q (i \neq s_q, i \neq 1, i \in V, q \in Q) \\ \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q = r(q) (i = s_q, q \in Q, \lambda \geq 0) \\ \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q = r(q) (i = 1, q \in Q, \lambda \geq 0) \\ \sum_{q \in Q} f_{ij}^q \leq y_{ij} (e_{ij} \in E, q \in Q) \end{cases} \quad (16)$$

同理,基于变量  $f_{ij}^q$ ,路由  $q$  的最终路径长度  $\Gamma_q$  可重新表示为

$$\Gamma_q = \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q (i, j \in V, q \in Q) \quad (17)$$

将高能效调度问题改写成加权整数规划模型,表

述为

$$\begin{aligned}
 & \min(\alpha \cdot T + \beta \cdot \sum_{q \in Q} E_q) \\
 & \text{s.t. } 0 \leq y_{ij} \leq T \\
 & \sum_{e_{ij} \in I(e_i)} y_{ij} \leq T \\
 & 0 \leq f_{ij}^q \leq y_{ij} \\
 & \sum_{e_{ki} \in E} f_{ki}^q = \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q (i \neq s_q, i \neq 1, i \in V, q \in Q) \\
 & \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q = r(q) (i = s_q, q \in Q, \lambda \geq 0) \\
 & \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q = r(q) (i = 1, q \in Q, \lambda \geq 0) \\
 & \sum_{q \in Q} f_{ij}^q \leq y_{ij} (e_{ij} \in E, q \in Q) \\
 & \Gamma_q = \sum_{e_{ij} \in E} f_{ij}^q (i, j \in V, q \in Q) \\
 & E_q = r_i \Gamma_q + r_r (\Gamma_q - 1) \quad (18)
 \end{aligned}$$

其中  $\alpha, \beta$  为加权系数,  $\alpha + \beta = 1$ ; 另外, 经过变换后, 上述模型仅由  $f_{ij}^q, y_{ij}$  及  $T$  等整数变量组成, 具有比原始模型更少的优化变量. 在路由需求为  $Q$ , 链路数量为  $L$  的情况下, 原始优化模型中优化变量数为  $L * Q * T (T \gg 1)$ , 而变换后模型中的优化变量删减为  $L * Q + 1$ . 考虑到目前整数规划求解方法的复杂度 (如分支限界法等) 随优化变量呈幂指数增加, 可知经变量删减后, 算法求解复杂度可从  $O(2^{(Q * L * T)})$  迅速减少为  $O(2^{(Q * L + 1)})$ .

#### 4.2 基于最大干扰度优先的启发式链路调度

经过优化变量删减与模型转化后, 可以使用整数规划方法快速获得当前权重系数下的最小调度周期  $T$  及最优路由拓扑  $G'(V, E')$ . 基于  $G'(V, E')$  与路由图中各链路的时隙需求, 提出基于最大干扰度优先的启发式链路调度算法. 算法的基本思想为, 优先处理具有最大干扰度的链路, 并令尽可能多的链路并行传输, 从而完成链路调度与时隙分配的快速映射, 以缩短调度周期, 提高网络吞吐量并降低传输延时.

##### 启发式链路调度算法

输入 路由图  $G'(V, E')$ , 第  $k$  条链路的时隙需求  $r_k (k = 1, \dots, m)$

输出 调度周期  $T$  及时隙分配情况

(1) 基于  $G'(V, E')$  构建干扰图  $G_c'(V_c, E_c')$

(2) while  $G_c' \neq \Phi$  do

(3) 搜索  $G_c'$  中具有最小度的节点;

(4) 从  $G_c'$  中删除该顶点及其相连边;

(5) 设置  $e_k$  表示第  $(m - k + 1)$  个删除顶点;

(6) end while

(7) 设置  $T = 1$ ;

(8) for  $e_k \in E', k = 1: m$

(9) assign = false,  $a(e_k) = 0$

(10) for slot  $t = 1: T$

(11) if  $e_k$  在时隙  $t$  与其在  $G_c'$  中的邻居不发生干扰

(12) 为  $e_k$  分配时隙  $t$ ;

(13) if  $(a(e_k) + + = r_{e_k})$

(14) assign = true;

(15) break;

(16) end for

(17) if assign = false

(18)  $T = T + r_{e_k} - a(e_k)$ ;

(19) 为  $e_k$  分配时隙  $(T - r_{e_k} + a(e_k), T]$ ;

(20) end for

整个启发式链路调度算法的执行复杂度仅与链路数  $L$  及调度周期  $T$  有关, 其中干扰度排序部分的平均时间复杂度为  $O(L^2)$ , 时隙分配部分的时间复杂度为  $O(T * L^2)$ , 可知调度算法的时间复杂度近似为  $O(T * L^2)$ .

## 5 实验结果与分析

**实验 1** 首先考察本文算法获得的路由拓扑及时隙分配情况, 并与整数规划求得的下限值进行比较, 以验证算法有效性.

表 1 时隙分配表

链路编号	时隙分配	链路编号	时隙分配
1	1, 10	27	6, 7
2	2	28	1, 8
3	1, 11, 13, 14, 15	29	8, 14, 17, 18, 63
4	3	30	7
5	2, 5	31	2
6	3, 4, 5	32	4, 6, 10
7	6, 10, 22, 23, 24, 25, 26, 27	33	5, 7, 11, 19, 20, 64
8	16, 21, 28, 29, 30	34	4
9	6, 7, 11	35	4
10	5	36	6
11	4, 8, 11, 14	37	4, 8, 16, 21
12	2, 6	38	12, 65, 66, 67, 68
13	1	39	9, 12, 13, 15
14	1	40	3, 9
15	2	41	7, 9, 12, 17, 18, 19, 20
16	1	42	1
17	2	43	2, 69, 70, 71, 72
18	7, 8, 11	44	9, 10, 12
19	31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40	45	3
20	3	46	5, 6, 22
21	41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	47	5
22	3, 4, 10	48	3
23	5	49	1
24	9, 13, 15, 50	50	1, 2
25	51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62	51	3
26	1		

初始时,50个感知节点随机部署在 $120 \times 120$ 的监测区域内,位于区域中心的37号节点为sink节点,其余为感知节点.设置 $R_c = R_l = 20$ , $r_t = 2$ , $r_r = 1$ ,权重因子分别设置为 $\alpha = 0.6$ , $\beta = 0.4$ .图2展示了当网络中存在49个源节点,且各源节点具有单位时隙感知数据需要发送时,采用分支限界法进行整数规划求得的路由拓扑图,其中各链路上的数字表示该拓扑图下的链路编号.表1展示了基于给定拓扑图及链路需求,采用启发式算法各链路获得的时隙分配情况.从图2与表1可见,最终分配的链路时隙满足无干扰传输条件.使用启发式算法求解的总时隙数为72,稍大于整数规划求解的最小时隙分配数68.

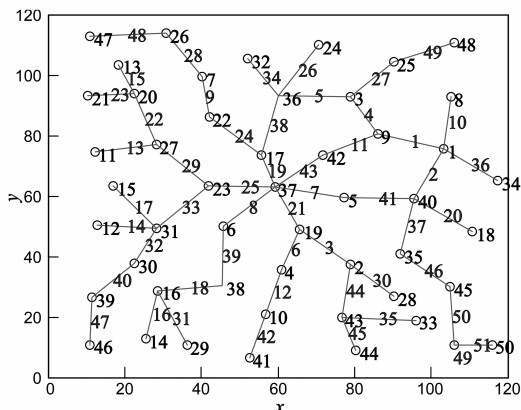


图2 获得的路由拓扑

**实验2** 考察不同网络规模条件下,链路调度周期与网络能量消耗随权重系数的变化情况.

令网络中源节点数量分别为25与49,其他条件设置同实验1.考察在不同权重系数条件下,调度周期与能量消耗的对比情况,仿真结果分别如图3与图4所示.

从图3及图4可见,随着源节点数量增加,相应调度周期与能量消耗也随之增加.同时可以发现,能耗加权因子的比重越大,相应得到的能耗值越小,调度周期则越长.

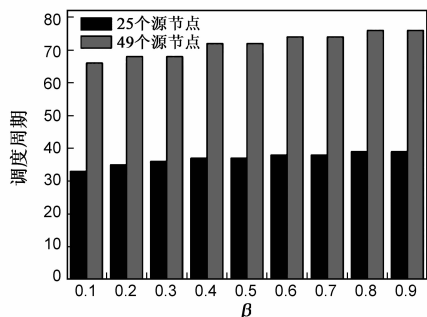


图3 不同能耗权重系数下调度周期的对比情况

时,且网络中所有非sink节点均有感知数据发送时,本文所提算法与原始整数规划算法在求解时间上的对比情况.仿真使用PC机的主频为i7-2600 3.4GHz,内存为4GB.

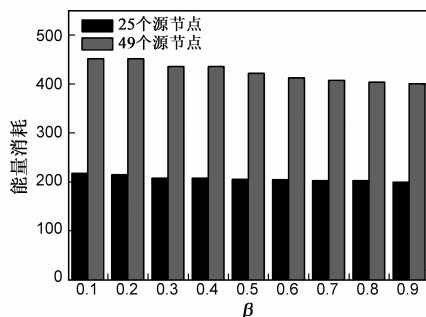


图4 不同能耗权重系数下能量消耗的对比情况

表2展示了不同部署条件下,采用启发式算法与原始整数规划方法在求解时间上的对比情况.从表2可见,采用整数规划方法对原始模型求解时,当部署节点数 $\leq 15$ 时,直接使用整数规划尚能在可接受的时间范围内获得最优解.然而,随着部署节点数量增加,在非常长时间内( $> 7200s$ )都不能获得可接受解.与之相比,本文所提算法通过削减模型中的变量数,能够大大减少求解时间,提高求解效率.

表2 与原始模型求解时间对比

部署节点数量	原模型求解时间(s)	本算法求解时间(s)
10	20.49	0.06
15	255.85	1.19
25	$> 7200$	74.02
35	$> 7200$	101.7
45	$> 7200$	166.5
55	$> 7200$	246.82
65	$> 7200$	345.34

**实验4** 为了进一步验证所提算法的优越性,将本文算法与最短路径算法(Dijkstra)、最小生成树算法(Minimum Spanning Tree, MST)及最优情况进行对比.

分别考察部署节点为10、15、25、35、45、55及65时,且网络中所有非sink节点均有感知数据发送时,比较上述三种算法调度周期与能量消耗的性能情况,其中最优值为使用整数规划求解式(18)后得到的能耗与调度周期.仿真结果分别如图5与图6所示,其中,权重因子分别设置为 $\alpha = 0.6$ , $\beta = 0.4$ .

从图5及图6可见,相同监测区域中部署节点越多,相应的调度周期越大.由于Dijkstra能够获得最短路径,其整体能耗最小.但Dijkstra会导致数据传输链路的聚集,尤其当网络部署密度增大时,基于Dijkstra的路由

**实验3** 考察部署节点为10、15、25、35、45、55及65

树中干扰链路数急剧增加,降低了链路复用性并加大了调度周期.基于 MST 的路由树虽较好利用了链路复用性,但却是以牺牲高效路由为代价,不可避免地引发长路径,会导致全网能耗增加.本文算法基于整数规划所求的能耗最优路由树进行启发式时隙分配,其能耗特性与整数规划所求解相同,表现为图 6 中两条能耗曲线完全重合,所构建的路由树的整体能耗特性接近 Dijkstra 路由树.本文算法在构建路由树的同时考虑了调度周期特性,且通过时隙复用机制,最终所求的调度周期接近于最优解.

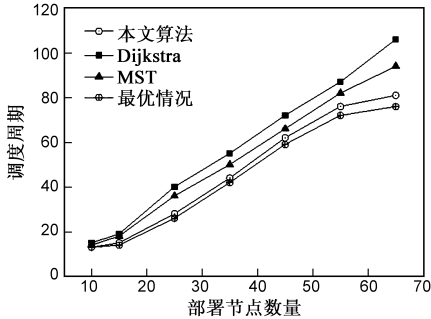


图5 基于不同部署条件下调度周期的对比情况

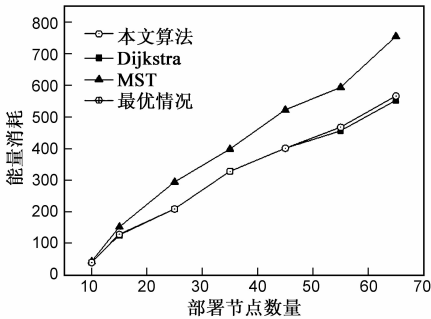


图6 基于不同部署条件下能量消耗的对比情况

## 6 结论

本文综合考虑了链路调度、网络能耗及路径选择等约束关系,对无线传感器网络的链路调度问题给出了形式化描述,提出一种联合路由优化的链路调度模型.进一步,针对高效链路调度问题,通过优化变量删除及模型化简,提出了基于整数规划的最优路由树构建算法.基于整数规划求得的路由图  $G'(V', E')$  与各链路需求,提出求解最小调度周期的启发式链路调度算法,通过对链路干扰度进行排序,令最大干扰度链路被优先处理,以保证尽可能多的链路并行传输,从而完成链路调度与时隙分配的快速映射.仿真实验表明本文设计的链路调度策略能够快速构建最优路由树,有效满足调度周期与能量消耗的双重目标,具有比现有算法更优越的性能.

## 参考文献

- [1] 蔚赵春,周水庚,关侗红.无线传感器网络中数据存储与访问研究进展[J].电子学报,2008,36(10):2001-2010. WEI Zhao-chun, ZHOU Shui-gen, GUAN Zhe-hong. Data storage and access in wireless sensor networks: a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 2001-2010. (in Chinese)
- [2] RHEE I, WARRIER A, AIA M, et al. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 511-524.
- [3] GANDHAM S, ZHANG Y, HUANG Q. Distributed time-optimal scheduling for convergecast in wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(3): 610-629.
- [4] 龚海刚,刘明,余昌远,等.无线传感器网络环境下基于事件驱动应用的节能 TDMA 协议[J].电子学报,2007, 35(10): 1843-1848. GONG Hai-gang, LIU Ming, YU Chang-yuan, et al. An energy efficient event driven TDMA protocol for wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1843-1848. (in Chinese)
- [5] JAIN K, PADHYE J, PADMANABHAN V, et al. Impact of interference on multi-hop wireless network performance[A]. Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)[C]. San Diego: ACM Press, 2003. 66-80.
- [6] SHARMA G, MAZUMDAR R, SHROFF N. On the complexity of scheduling in wireless networks[A]. Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)[C]. Los Angeles: ACM Press, 2006. 227-238.
- [7] SALONIDIS T, TASSIULAS L. Distributed dynamic scheduling for end-to-end rate guarantees in wireless ad hoc networks[A]. Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)[C]. Illinois: ACM Press, 2005. 145-156.
- [8] ERGEN SC, VARAIYA P. TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16(4): 985-997.
- [9] RAJENDRAN V, OBRACZKA K, GARCIA-LUNA-ACEVES JJ. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)[C]. Los Angeles, California: ACM Press, 2003. 181-192.
- [10] RHEE I, WARRIER A, MIN J, et al. DRAND: distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad-hoc networks[A]. Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)[C]. Florence: ACM Press, 2006. 190-201.
- [11] WEI H, GANGULY S, IZMAILOV R, et al. Interference-

aware IEEE 802.16 WiMax mesh networks[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC) [C]. Dallas: IEEE Press, 2005. 3102 – 3106.

- [12] CAO Y, LIU Z, YANG Y. A centralized scheduling algorithm based on multi-path routing in WiMAX mesh network[A]. Proceedings of IWCMC [C]. Vancouver: IEEE Press, 2006. 1 – 4.
- [13] HAN B, TSO F P, LIN L, et al. Performance evaluation of scheduling in IEEE 802.16 based wireless mesh networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS) [C]. Vancouver: IEEE Press, 2006. 789 – 794.
- [14] WANG Y, WANG W, LI M, et al. Interference-aware joint routing and TDMA link scheduling for static wireless networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(12): 1709 – 1726.
- [15] KWON H, KIM TH, CHOI S, et al. A cross-layer strategy for energy-efficient reliable delivery in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5 (12): 3689 – 3699.
- [16] 谢海波, 崔毅东, 徐惠民. 一种联合路由层信息设计的多跳 Ad Hoc MAC 层协议[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2129 – 2133.  
XIE Hai-bo, CUI Yi-dong, XU Hui-min. A joint route-MAC layer design multi-hop ad hoc MAC protocol [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 1843 – 1848. (in Chinese)
- [17] LIU S, FENG S, YE W, et al. Slot allocation algorithm in centralized scheduling scheme for IEEE 802.16 based wireless mesh networks [J]. Computer Communications, 2009, 32(5): 942 – 953.
- [18] MAO J, WU Z, WU X. A TDMA scheduling scheme for many-to-one communications in wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2007, 30(4): 863 – 872.
- [19] CRUZ RL, SANTHANAM AV. Optimal routing, link scheduling and power control in multi-hop wireless networks [A]. Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM) [C]. San Francisco: IEEE Press, 2003. 702 – 711.
- [20] CUI S, MADAN R, GOLDSMITH AJ, et al. Cross-layer energy and delay optimization in small-scale sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6 (10): 3688 – 3699.

## 作者简介



**贾杰(通信作者)** 女, 1980年出生于辽宁省鞍山市. 现为东北大学计算机应用技术研究所副教授, 主要从事无线网络、压缩感知和认知无线电技术等方面的研究工作.

E-mail: jiajie@ise.neu.edu.cn



**代恩亮** 男, 1990年出生于山东省济宁市. 硕士研究生, 主要从事无线传感器网络与压缩感知技术等方面的研究工作.

E-mail: windyneu2013@163.com



**陈剑** 男, 1980年出生于湖南省邵阳市. 博士, 东北大学讲师, 主要从事多媒体无线通信系统、网络管理及视频信号建模技术等方面的研究工作.

E-mail: chenjian\_2002cn@163.com



**王兴伟** 男, 1968年出生于内蒙古包头市. 现为东北大学计算机应用技术研究所教授、博士生导师, 主要从事下一代互联网、自组织网络和移动互联网等方面的研究工作.

E-mail: wangxingwei@ise.neu.edu.cn



**赵林亮** 男, 1956年出生于山东省青岛市. 现为东北大学计算机应用技术研究所教授, 主要从事无线自组织网络和移动计算等方面的研究工作.

E-mail: zhaolinliang@ise.neu.edu.cn