

## 时延和能耗均衡的强连通支配集构造算法

孙彦景<sup>1,2</sup>, 钱建生<sup>1</sup>, 马姗姗<sup>1</sup>, 任鹏<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对无线传感器网络中链路的非对称性, 提出时延约束的强连通支配树 (SDTT, strongly connected dominating tree with bounded transmission delay) 问题, 给出在有向图上构建传输时延和能量消耗均衡的强连通支配集的强连通支配树 (SCDT, distributed strongly connected dominating tree) 算法。首先在单位圆图 (UDG) 模型的基础上构建极大独立集 (MIS), 然后在具有双向权值的有向图上基于最小支撑树和最短路径树实现分布式 SCDT 算法, 同时满足时延和能耗均衡的约束条件要求。理论算例分析和仿真结果表明提出的算法能有效地解决 SDTT 问题, 构造联合约束的强连通支配集, 形成时延和能耗均衡的虚拟骨干。

**关键词:** 无线传感器网络; 强连通支配集; 传输延时; 能量消耗; 约束均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)05-0058-08

## Strongly connected dominating set construction algorithm balancing time delay and energy consumption

SUN Yan-jing<sup>1,2</sup>, QIAN Jian-sheng<sup>1</sup>, MA Shan-shan<sup>1</sup>, REN Peng<sup>1</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** To the asymmetry of link in wireless sensor networks, a problem about the strongly connected dominating tree with bounded transmission delay (SDTT) was put forward. The distributed strongly connected dominating tree (SCDT) algorithm was also proposed to construct strongly connected dominating set balancing transmission delay and energy consumption. Firstly, it constructed a maximal independent set (MIS) based on a unit disk graph, and then implemented the SCDT algorithm based on a double weighted and directed graph fulfilling the requirements of energy consumption and transmission delays simultaneously. The theoretical analysis and simulation results show that the presented algorithm can correctly solve the SDTT problem and construct the connected dominating sets (CDS) with constraints to form virtual backbone.

**Key words:** wireless sensor network; strongly connected dominating set; transmission delay; energy consumption; balanced constraints

### 1 引言

与传统计算机网络不同, 无线传感器网络

(WSN, wireless sensor networks)没有固定的基础结构。依据图论的独立集、支配集、连通支配集、独立支配集、团簇及染色等基本理论<sup>[1]</sup>, 研究人员提

收稿日期: 2010-11-02; 修回日期: 2011-11-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2008AA062200); 国家自然科学基金资助项目(50904070); 中国博士后基金资助项目(20100471412); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QNA48)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2008AA062200); The National Natural Science Foundation of China(50904070); The China Postdoctoral Science Foundation(20100471412); The Fundamental Research Funds for Central University(2010QNA48)

出了很多构造层次网络的方法，作为无线传感器网络的虚拟骨干<sup>[2]</sup>。在单位圆图(UDG, unit disk graph)网络模型的基础上，学者对使用最小连通支配集构造虚拟骨干的方法进行了大量的研究<sup>[3]</sup>，提出了很多最小连通支配集(MCDS, minimum connected dominating set)的构造算法。

文献[4~6]主要研究高效的分布式MCDS算法，或者在一定程度维护虚拟骨干的冗余以保证容错性和路由的灵活性。文献[7]针对最小连通支配集问题提出了具有较高能量效率的启发式算法。该算法把网络中所有的节点作为最小连通支配集的一个初始解，然后利用启发式修剪策略剔除冗余节点从而减小最小连通支配集的规模。文献[8]使用图着色算法求得的极大独立集等价于簇划分后的簇头集合，然后搜索网关节点使得簇头连通，由此生成最小连通支配集，形成虚拟主干网。文献[9]提出一种基于能量代价的最小权和连通支配集拓扑控制算法，解决无线传感器网络中最小连通支配集拓扑并非网络耗能最小拓扑的问题，最小化网络整体能耗。文献[10]为了提高无线传感器网络的能量利用效率、延长网络的生存时间，提出了用马尔科夫模型优化分布式最小连通支配集算法。文献[11]在串行最大独立集构造算法的基础上，提出了基于权重和时序的触发式连通支配集构造算法。

随着传感器网络应用范围的迅速扩大，不仅要考虑节能特性，同时也对传输时延提出了要求。文献[12]提出采用一种新型动态树来组织网络拓扑的能效与时延平衡的数据收集机制。文献[13]提出了一种基于虚拟点优先级的移动sink路径优化选择方法，以满足时延要求和最小化网络整体能耗。就无线传感器网络而言，在单位长度下，路径长度等相关因素决定了网络数据在节点之间的传输时延。在网络图上，路径长度转化为最短路径树(SPT, shortest path tree)问题，等效于传输时延。数据传输带来的能量功耗则可以看作求解最小支撑树(MST, minimum spanning tree)问题。文献[14]的研究结果表明不可能满足路径和费用同时最小的要求。在文献[15]的基础上，文献[16]提出了理想情况下基于无向图的有界传输时延连通支配树问题，并给出了构建CDT(connected dominating tree)的有效算法，构建连通支配树来平衡连通支配集中功耗和传输时延。

考虑到无线网络中通信链路的非对称性，本文

使用加权有向连通图建模无线网络，在文献[16]的基础上提出对应无线传感器网络有界传输时延强连通支配树联合约束问题，并给出基于有向加权图的时延和能耗均衡的强连通支配集算法，验证了算法的有效性。

## 2 SDTT 问题

在无线网络中，相邻节点间的边权重并不是对称的，例如，节点  $u$  和  $v$  在不同噪声环境下，有不同的信号检测阈值，这样从  $u$  到  $v$  和从  $v$  到  $u$  的路径上发送的功率也就不同，依图论理论，本文使用有向图进行网络建模。

文献[14]研究表明不可能同时满足最小化权重和距离的目标。为平衡 MST 和 SPT 的目标要求，本文分别以 MST 和 SPT 的费用(权重)表示发送时消耗的能量和从发送方到接收方的路径长度，构造具有双重权值的生成树。同时，为简化分析，以路径长度代替传输时延。这样，对强连通支配集的生成树而言，目的是在能量消耗( $\alpha$ )和传输时延( $\beta$ )要求之间进行折中。设加权有向图  $G=(V, E)$ ，要找到支撑  $G$  满足( $\alpha, \beta$ )约束要求的强连通生成树  $C$ ，相关符号沿用文献[16]中的定义：

$P_{uv}$ ：从节点  $u$  到  $v$  发送成功所需要的功率  
 $p_{uv} = C_v d_{uv}^g$ ；

$d(u, v)$  或  $d(e)$ ：在单位长度下，从节点  $u$  到节点  $v$  沿边  $e$  的欧氏距离；

$C_v$ ：信号侦测阈值常量，与具体环境条件相关。无线信号传输消耗的能量正比于  $d^2$ ， $\beta$  的取值是从 2 到 4，本文设为 2；

$p(u)$ ：从节点  $u$  到节点  $v$  的最大发送功率为  
 $p(u) = \max\{p_{uv} : (u, v) \in G\}$ ；

$w(e)$ ：从节点  $u$  到节点  $v$  的边  $e$  的权重为  
 $w(e) = w(u, v) = C_v d_{uv}^r$ ；

$w(C)$ ：强连通树  $C$  的权重  $w(C) = \sum_{e \in T} w(e)$ ；

$p(C)$ ：强连通树  $C$  的能量消耗  $p(C) = \sum_{u \in V} p(u)$ ；

$d(G)$ ：图  $G$  的路径长度(传输时延)  $d(G) = \sum_{e \in E} d(e)$ 。

**定义 1** 无线传感器网络有界传输时延强连通支配树约束(SDTT)问题：给定无线传感器网络子集，构建一个 SCDT-tree，使得  $d(\text{SCDT})$  不大于用户设定的阈值，并且  $p(\text{SCDT})$  有界。

通过构建一个强连通 SCDT，同时满足能量均

衡和传输时延约束的要求。据文献[16]SCDT-tree 定义如下：

定义 2 如果图  $G$  的强连通支配树  $C$  在  $a \geq 1$  且  $\beta \geq 1$  时，满足下面的要求，则称  $C$  为图  $G$  的 SCDT-tree：

- 1) 距离：对每一个顶点  $u$ ，根节点  $r$  与  $u$  之间的距离至多是从  $r$  到  $u$  的最短路径的  $a$  倍；
- 2) 能耗： $C$  的能量消耗最多是 SDTT 问题最优解的  $\beta$  倍。

针对链路的不对称性，本文使用加权有向连通图建模无线网络，提出对应 SDTT 问题在有向加权图中的 SCDT 算法。

### 3 SCDT 算法

在加权有向连通图上，该图的最小费用树把节点对间的发送功率作为权值，最短路径树以路径长度为权值，任选根节点  $r$ ，SCDT 算法构建能耗和时延均衡的强连通支配树。

算法构造以  $r$  为根的最小生成树  $T$  和以  $r$  为汇聚点的  $T'$ ，通过二者的叠加得到强连通图。依据网络的连通信息构建  $H$ ， $H$  包含从根  $r$  至每个顶点的最短路径；使用文献[17]提出的 MWIA-TC 算法构建  $T$  和  $T'$ 。

SCDT 算法按深度优先(DFS, depth first search)的方式遍历最小生成树  $T$ ，当访问节点  $u$  时，如果在  $T$  中从  $r$  到  $u$  的路径长度大于  $a$  倍  $H$  中的最短路径，则用  $H$  中从  $r$  到  $u$  的路径取代  $T$  中的路径。对于  $T'$  执行同样的过程。这样，在遍历所有节点后，SDTT 问题得以解决。算法输入  $a, r, MST T, MST T'$  和 SPT  $H$ ，最后返回 SCDT-tree  $C$ 。

#### 算法 1 SCDT 算法

```

Algorithm SCDT (MST  $T, MST T', SPT H, r, a$ )
Begin
Function INITIALIZE ( $G, r$ )
Function RELAX( $u, v$ )
Function ROUTE-ADD( $v$ )
{if  $d[v] > D_{SPT}(r, v)$  and  $parent_{SPT}(v) \neq NULL$ 
ROUTE-ADD( $parent_{SPT}(v)$ )
RELAX( $parent_{SPT}(v), v$ )
end if}
Function DFS( $u$ )
{if  $d[u] > aD_{SPT}(r, u)$ 
ROUTE-ADD( $u$ )
end if

```

```

for each child  $v$  of  $u$  in MST do
RELAX( $u, v$ )
DFS( $v$ )
RELAX( $v, u$ )
end for}
Function LCDT(MST, SPT,  $r, a$ )
{INITIALIZE(MST,  $r$ )
DFS( $r$ )
return LCDT tree  $D$ }
Function SCDT(MST  $T, MST T', SPT H, r, a$ )
{ $D=LCDT(T, H, r, a)$ 
 $D'=LCDT(T', H, r, a)$ 
return SCDT  $C=D \cup D'$ }
End Algorithm
 $C= D \cup D'$ 就是基于有向图的强连通支配树。

```

### 4 分布式强连通支配集算法

分布式强连通支配集算法过程分为 2 个阶段，首先在单位圆图构建极大独立集，然后基于有向图使用分布式 SCDT 算法构造时延和能耗均衡的强连通支配集。

#### 4.1 分布式 MIS 构建

采用文献[18]的方法让所有的节点知道自己的排序和邻居后，根节点启动染色标记过程构建极大独立集。使用分布式簇头选择算法构建有根生成树进行等级排序的机制，以保证生成的极大独立集满足两跳的标准。在生成的有根生成树中每个节点把与根节点之间的跳数看作自身的级别，节点的排序按照级别和 ID 标识的有序数对进行，遵循词典次序排列，具体过程如文献[16]所述。当所有的节点标记为灰色或黑色，根节点就开始执行下一阶段的算法。

#### 4.2 分布式 SCDT 算法

下面介绍在有向图模型下的分布式 SCDT 算法。算法运行在生成的极大独立集中的每个节点，分为 2 个阶段：采用单源分布式 dMST, dSPT 和 dDFS 算法分别获取 SPT, MST 和 DFS 的遍历次序，在无向图模型中生成连通支配集；通过改变与节点关联的边的方向反转每个节点所有的边，重复步骤的过程。通过反转得到的 SCDT  $D$  边的方向，生成反转的 SCDT  $D'$ ，联合 2 个阶段生成的 SCDT，就得到强连通支配树。在构建过程中，节点之间使用消息 WAKEUP、ADD、ADD\_FINISH、UPDATE、REVERSE 实现信息交换。WAKEUP、ADD、

ADD\_FINISH 和 UPDATE 消息如文献[16]所述，REVERSE 消息如下。

REVERSE：如果节点收到该消息，反转关联的该节点的所有边的方向，把出边变为入边，把入边变为出边。

为构建 SCDT 树，分布式算法 dSPT、dMST 和 dDFS 在每个节点执行，发起和终止由根  $r$  控制，以串行方式运行，网络内的所有节点同步。按照 dDFS 过程中得到的顺序，首先在 MST  $T$  上执行算法，每个节点  $u$  使用  $p[u]$  记录上一级的父节点， $d[u]$  记录距离。每个节点在初始时将  $d[u]$  设定为  $d_T(r, u)$ ，根  $r$  依照 dDFS 所得次序，发布 WAKEUP 消息到后续节点，发起遍历过程。

消息的传递触发以下处理规则。

1) 从节点  $v$  收到 WAKEUP 消息，节点  $u$  成为当前被访问的节点， $u$  更新  $d[u]$  和  $p[u]$ 。接着， $u$  检查是否  $d[u] > a d_{SPT}(r, u)$ ，若是，添加从  $r$  到  $u$  的路径  $P_{SPT}(r, u)$  到  $T$ ；否则，维持不变。为添加该路径， $u$  发送给其在 SPT 中的父亲  $w$  消息 ADD，这里， $u$  是 ADD 消息的发起者。接着， $u$  等待发起者为  $u$  的 ADD 消息的回复。

2) 当节点  $w$  而不是根节点收到来自节点  $u$  的发起者  $i$  的 ADD 消息， $w$  发送一个发起者为  $i$  的 ADD 消息给 SPT 中的父亲  $x$ ，同时， $w$  记录  $u$  作为新的子节点。

3) 当根节点  $r$  收到发起者为  $i$  的 ADD 消息， $r$  记录  $u$  为新的子节点，并返回 ADD\_FINISH 消息至  $u$ ，与 ADD 消息一样，ADD\_FINISH 也需要包含发起者。

4) 当节点  $u$  收到  $w$  的发起者  $i$  的 ADD\_FINISH 消息，节点  $u$  更新  $d[u]$  和  $p[u]$ 。若  $u$  不同于  $i$ ， $u$  发送发起者为  $i$  的 ADD\_FINISH 消息给向  $u$  发送发起者  $i$  的 ADD 消息的节点；否则， $u$  向由 dDFS 获得的下一个节点发送 WAKEUP 消息，若  $p[u]$  由  $x$  变为  $y$ ， $u$  发送一个发起者为  $u$  的 UPDATE 消息到  $x$ 。

5) 当节点  $x$  从  $u$  收到 UPDATE 消息，节点  $x$  更新  $d[x]$  和  $p[x]$ 。若  $p[x]$  由  $v$  变为  $w$ ， $x$  发送一个发起者为  $x$  的 UPDATE 消息到  $v$ 。

6) 若在 dDFS 所得序列中的最后一个节点  $u$  收到发起者为  $u$  的 ADD\_FINISH 消息，就反转与自己关联的边的方向，并发送 REVERSE 消息给其父亲。

7) 每个节点在收到 REVERSE 消息时，反转所关联的边的方向，并发送 REVERSE 消息给自己的父亲节点。

在收到发起者为  $u$  的 REVERSE 和 UPDATE 消息， $u$  被标记为 dDFS 队列中的最后一个节点。根  $r$  反转与其关联的边，结束第一阶段。然后  $r$  发送 WAKEUP 消息发起第二阶段。在根  $r$  收到一个发起者为  $u$  的 UPDATE 消息，而且  $u$  在 dDFS 次序中标记为最后一个节点时，算法终止。

## 5 理论分析及算例

把 SCDT 算法运用到图  $G$ ，构造强连通树  $C$ ，设  $a \geq 2$  且  $C_v = 1$ ， $p(opt)$  为 SDTT 问题的最优解  $opt$  的总能耗。

引理 1 在有向图  $G$  中，图  $G$  的支配树  $C$  总功率消耗  $p(C) \leq w(G)$ 。

证明

$$p(C) = \sum_{u \in V} p(u) = \sum_{u \in V} \max_{(u,v) \in E} w(u,v) \\ \sum_{u \in V} \sum_{(u,v) \in E} w(u,v) = w(G) \quad (1)$$

引理 2 对于图  $G$  的 SPT  $H$  和 MST  $T$  和  $T'$ ， $H$  的功耗至多  $\left(\frac{2}{a-1}\right)^2$  倍 MST 功耗。

证明 由文献[5]证明知，

$$d(H) \leq \left(\frac{2}{a-1}\right)^2 d(T), \quad d(H) \leq \left(\frac{2}{a-1}\right)^2 d(T') \quad (2)$$

显然

$$p(H) \leq w(H) = d^2(H) \\ \left(\frac{2}{a-1}\right)^2 d^2(T) = \left(\frac{2}{a-1}\right)^2 w(T) \quad (3)$$

$$p(H) \leq w(H) = d^2(H) \\ \left(\frac{2}{a-1}\right)^2 d^2(T') = \left(\frac{2}{a-1}\right)^2 w(T') \quad (4)$$

由此得证。

引理 3  $w(T_{opt}) \leq p(opt)$ ， $w(T_{opt}) \leq p(opt)$  是  $G$  中最大节点度。

证明 由文献[16]可知， $w(T_{opt}) \leq p(opt)$ 。

对于  $T'$ ，每个非根节点有且仅有一条出边，因此， $w(T_{opt}) \leq p(opt)$ ，由此得证。

定理 1 设  $C$  为由 SCDT 构建的 SCDT-tree，那么  $p(C) \leq \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) (D+1) p(opt)$ 。

证明 设图  $G$  的 SPT  $H$ ，MST  $T$  和  $T'$ ，由引理 1 和 2，可得

$$\begin{aligned}
 p(C) &= w(C) \\
 &= w(T) + w(H) + w(T') + w(H) \\
 &= \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) w(T) + \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) w(T') \\
 &= \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) (w(T) + w(T')) \\
 &= \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) (Dp(opt) + p(opt)) \\
 &= \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) (D+1)p(opt) \tag{5}
 \end{aligned}$$

由此得证。

由定理 1 可知,  $b = \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right) (D+1)$ , 在密

度网络中  $D$  为  $O(n)$ , 因此  $b$  也是  $O(n)$ 。

下面分析分布式算法 SCDT 的时间和消息复杂度。

**定理 2** 分布式 SCDT 算法的时间复杂度  $O(n^2)$ , 消息复杂度  $O(n^2)$ 。

**证明** 由前面过程可知, 在每个节点同时执行 SCDT 算法。ROUTE-ADD 决定了算法的执行时间, 而 ROUTE-ADD 的最大执行时间正比于 RELEXed 边数, 而 RELEX 的执行时间是  $O(1)$  的。因此, 考虑最坏的情况下, 需要添加长度为  $O(n)$  的路径, 这

样 ROUTE-ADD 的执行时间为  $O(n)$ , 由于 dsPT、dMST 和 dDFS 等算法的时间复杂度最大为  $O(n^2)$ , 显然算法 SCDT 的时间复杂度也为  $O(n^2)$ 。

在运行过程中, 每个节点发送 REVERSE 和 WAKEUP 消息 2 次。ADD、ADD\_FINISH 和 UPDATE 至多  $O(n)$  次, 因此算法总的消息复杂度应为  $O(n^2)$ 。由此得证。

下面给出 SCDT 算法执行过程示例。

在图 1 中, 设图 1(a) 是执行 MIS 构建过程后形成的网络虚拟骨干节点的无向图, 数字表示节点之间的通信距离; 图 1(b) 是在考虑每个节点为实现有效的传输所需要的发送功率后, 形成的一个强连通双向加权信息图, 每边上的数字表示该方向上节点对间的通信所需的传输功率; 图 1(c) 是边反转后的加权图; 图 1(d) 是最短路径树  $H$ , 图 1(e) 和 1(f) 是最小支撑树  $T$  和  $T'$ ; 设节点 1 为根节点, 且  $a=2$ , 对  $T$  按照 DFS 次序进行遍历, 当访问 4 时,  $T$  中的路径  $(1,2,3,4)$   $d_T(1,4)=23$ , 此时在  $H$  中,  $d_H(1,4)=11$ , 也就是  $d_T(1,4)$  大于  $2d_H(1,4)=22$ , 于是把边  $(1,4)$  添加到  $H$ , 同时  $p[u]$  从 3 更新为 1。注意到边  $(3,4)$  没有删除, 这是因为需要从此边回溯。在遍历  $T$  之后得到  $D$  如图 1(g), 同样的在遍历  $T'$  后得到  $D'$ , 如图 1(h), 括号内的数字表示路径长度(即时延), 外面的为该边的功耗, 最后联合  $D$  和  $D'$  得到最终的 SCDT 树  $C$ , 如图 1(i) 所示。

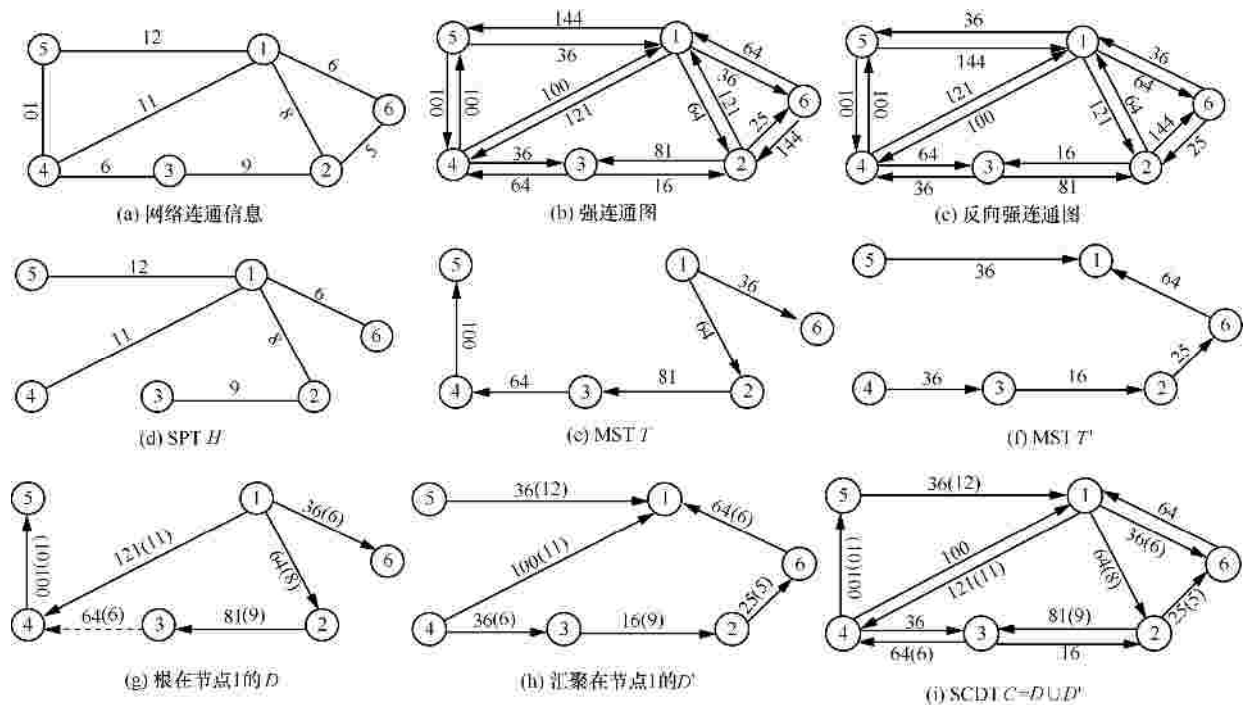


图 1 SCDT-算法示例

接下来，验证算法的约束能力，分别单独计算图 1 所示 MST、SDT 和 SPT 的功耗：

$$p(T) = 36+64+81+64+100=345$$

$$p(T') = 36+64+25+16+36=177$$

$$p(D) = 36+64+81+121+100=402$$

$$p(D') = 36+100+64+16+25=241$$

$$p(\text{MST}) = p(T) + p(T') = 345 + 177 = 522$$

$$p(\text{SDT}) = p(D) + p(D') = 402 + 241 = 643$$

$$p(\text{SPT}) = 36+64+81+121+144=446$$

以路径长度代替时延计算如下：

$$d(T) = 6+8+8+9+8+9+8+8+9+8+10=91$$

$$d(T') = 6+8+8+5+8+5+4+8+5+4+6=47$$

$$d(D) = 6+8+8+9+8+11+11+10=71$$

$$d(D') = 12+11+6+5+6+9+5+6=60$$

$$d(\text{MST}) = d(T) + d(T') = 91 + 47 = 138$$

$$d(\text{SDT}) = d(D) + d(D') = 60 + 71 = 131$$

$$d(\text{SPT}) = 6+8+11+12+8+9=54$$

根据上面的计算结果可得：

$$p(\text{MST}) = 522 < p(\text{SDT}) = 643 < 2p(\text{SPT}) = 892$$

$$d(\text{MST}) = 138 > d(\text{SDT}) = 131 > 2d(\text{SPT}) = 108$$

结果表明 SCDT 算法执行正确，具有联合约束能力，符合预期效果。

### 6 仿真实验

采用与文献[16]相同的参数设置，在网络规模从 20 到 300 个节点的情况下进行仿真，所有的网络场景在 1000×1 000 的单位区域内生成，对每个网络场景运行 20 此取统计平均值。对每条边 e 设置其权重为  $C_v d_{uv}^r$ ， $d_u$  为图 G 单位长度下的欧氏距离，r 取值 2。 $C_v$  为随机常量，由网络场景参数为每条链路设定。

图 2 的仿真结果表明，由于算法 SCDT 仅添加在最小支撑树中从 u 到 r 的权重 2 倍以上最短路径树中权重的路径，算法 SCDT 能量消耗低于 SPT，有效限制了总能耗。另外，在固定区域范围内，当网络规模不断变大，节点数增多时，邻居节点之间的距离在逐渐变小，因此总能量消耗并没有快速增加。由图 2(b)可知，就能量消耗而言，SCDT/MST 要比 SPT/MST 低，而且在固定的区域内，随着节点数增加，网络密度增加，此时节点彼此之间更加接近，分布更均匀，所以比值呈下降趋势，都更接近 MST，也就是总能耗最小。

本文通过统计路径长度来简化传输时延特性分析。由图 3 可以看出，对路径长度而言，算法 SPT

总是最短也就是说传输时延最小，符合最短路径的特性。由图 3(b)可知，就时延而言，SCDT 与 SPT 的比值要比 MST 低，而且在固定的区域内，随着节点数增加，网络密度增加，此时节点彼此之间更加接近，分布更均匀，所以比值呈下降趋势，都更接近 SPT，也就是总路径长度最小，传输时延更小。

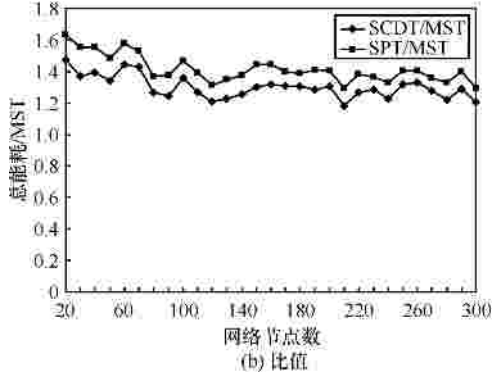
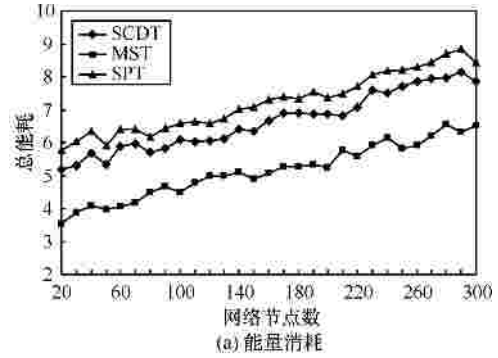


图 2 能量消耗对比

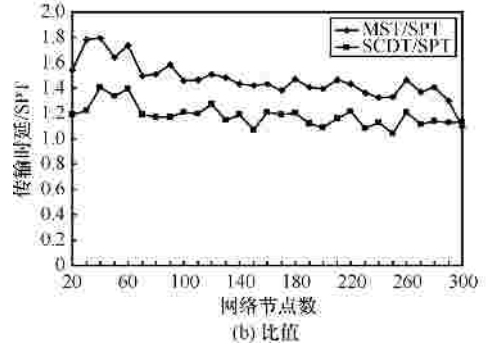
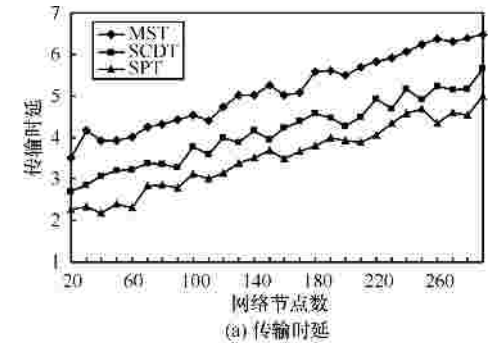
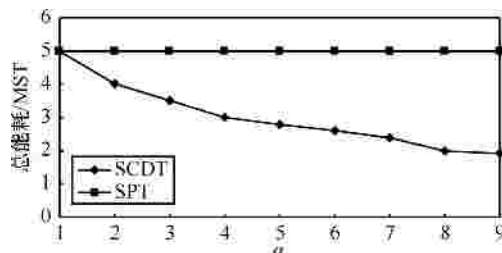


图 3 传输时延对比

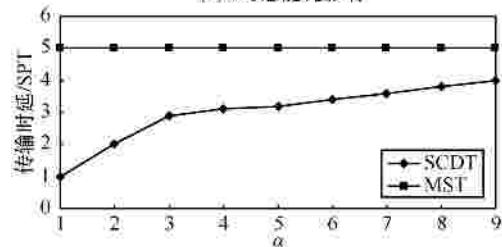
综合图 2 和图 3 的结果可知, SCDT 具有在最小费用 MST 和最短路径 SPT 之间的折中能力。

为分析  $a$  参数的选择对算法时延和能耗约束关系的影响, 分别对不同  $a$  取值时 SCDT、MST 和 SPT 算法总能耗和路径时延进行仿真。结果如图 4 所示。为分析能耗关系, 如图 4(a)所示, 分别把 SCDT 和 SPT 能耗与最小能耗 MST 进行比较。当  $a=1$  时, SCDT 算法构建 SPT, 因此, 2 条曲线在 1 处相交, 随着  $a$  得增加, SPT/MST 保持在 5 左右, SCDT/MST 逐渐降低, 当  $a$  足够大时, 此时对 SCDT 而言, 只考虑能耗而不考虑时延问题, SCDT 成为 MST, 符合  $b = \left(1 + \left(\frac{2}{a-1}\right)^2\right)(D+1)$  的关系。

为分析传输时延关系, 如图 4(b)所示, 分别把 SCDT 和 MST 总路径长度与最短路径 SPT 进行比较。当  $a=1$  时, SCDT 构建 SPT, 随着  $a$  的增加, MST/SPT 维持在 5; 然而, SCDT/SPT 逐渐增长, 最后与 MST 相交。这是因为当  $a$  足够大时, 基本不考虑时延约束, SCDT 等同于构建 MST。



(a)  $\alpha$  对总能耗影响



(b)  $\alpha$  对传输时延的影响

图 4  $a$  对约束关系的影响

## 7 结束语

为了解决无线传感器网络虚拟骨干构造时能耗和时延联合约束的问题, 考虑到无线链路的不对称性, 借鉴平衡 MST 和 SPT 树的  $(a, \beta)$  约束机制, 本文提出基于有向图构造时延和能耗均衡的强连通支配集的分布式算法, 解决了能耗和时延均衡的问题。理论分析、算例和仿真实验都证明了提出的

算法对解决该问题的有效性。在实际应用中, 可以结合具体应用要求确定参数  $a$ 、 $b$  调节约束关系。

## 参考文献:

- [1] KIM D, WU Y, LI Y, *et al.* Constructing minimum connected dominating sets with bounded diameters in wireless networks[J]. IEEE Trans Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(2): 147-157.
- [2] MISRA R, MANDAL C. Minimum connected dominating set using a collaborative cover heuristic for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(3): 292-302.
- [3] ZHENG C, SUN S X, HUANG T Y. Constructing distributed connected dominating sets in wireless ad hoc and sensor networks[J]. Journal of Software, 2011, 22(5): 1053-1066.
- [4] 卞永钊, 于海斌, 曾鹏. 无线传感器网络中一种启发式最小连通支配集算法[J]. 信息与控制, 2009, 38(3): 355-359  
BIAN Y Z, YU H B, ZENG P. A heuristic minimum connected dominating set algorithm for wireless sensor network[J]. Information and Control, 2009, 38(3): 355-359.
- [5] 徐洪兵, 祝颖. 基于拓扑控制的异类无线传感器网络分簇算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 674-677.  
XU H B, ZHU Y. A topology-based cluster algorithm of heterogeneous wireless sensor networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(4): 674-677.
- [6] THAI M T, WANG F. Connected dominating sets in wireless networks with different transmission ranges[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(7): 1-10.
- [7] WU W L, DU H W, JIA X H, *et al.* Minimum connected dominating sets and maximal independent sets in unit disk graphs[J]. Theoretical Computer Science, 2006, 352(1): 1-7.
- [8] 许力, 林志伟. 基于图着色的无线自组网最小连通支配集算法[J]. 通信学报, 2007, 28(3): 108-114.  
XU L, LIN Z W. Graph coloring based minimal connected dominating set algorithm in wireless ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2007, 28(3): 108-114.
- [9] 孙超, 尹荣荣, 郝晓辰. WSNs 中基于能量代价的最小权和支配集拓扑控制算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 857-863  
SUN C, YIN R R, HAO X C. Energy cost based topology control algorithm of minimum-total-weight connected dominating set in WSNs[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(4): 857-863.
- [10] 汪文勇, 向渝, 董传坤等. 用马尔科夫模型优化分布式最小连通支配集算法[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2441-2446.  
WANG W Y, XIANG Y, DONG C K, *et al.* Optimizing distributed algorithm for minimum connected dominating set with Markov model[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2441-2446.
- [11] 王玉明, 赵大胜. 基于串行最大独立集的连通支配集构造及分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 61-65.  
WANG Y M, ZHAO D S. Construction and analysis of connected

dominating set based on serial maximum independent set[J]. Journal of Huazhong Science and Technology (Natural Science Edition), 2011,39(3):61-65.

- [12] 郑杰, 郭淑杰, 屈玉贵等. 无线传感器网络能效时延平衡数据收集机制[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(12):1414-1421.  
ZHENG J, GUO S J, QU Y G, *et al.* Energy efficiency and delay balancing data gathering for wireless sensor networks[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(12):1414-1421.
- [13] 郜帅, 张宏科. 时延受限传感器网络移动 Sink 路径选择方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(4):742-747.  
GAO S, ZHANG H K. Optimal path selection for mobile sink in delay-guaranteed sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4):742-747.
- [14] SAMIR K, BALAJI R, NEAL E. Young balancing minimum spanning trees and shortest path trees[J]. Algorithm, 1994, 120(4):305-321.
- [15] LI Y S, THAI M T, WU F. On the construction of a strongly connected broadcast arborescence with bounded transmission delay[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(10):1460-1470.
- [16] 孙彦景, 钱建生, 顾相平等. 联合约束无线传感器网络连通支配集算法[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(2) : 231-235.  
SUN Y J, QIAN J S, GU X P, *et al.* Distributed connected dominating set algorithm with combined constraints in wireless sensor network[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(2) : 231-235.
- [17] LI Y, CHENG M X, DU D Z. Optimal topology control for balanced energy consumption in wireless networks[J]. Journal Parallel and Distributed Computing, 2005, 65(2): 124-131.
- [18] WAN P J, KHALED M A, OPHIR F. Distributed construction of connected dominating sets in wireless ad hoc networks[J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications, 2004, 9(2): 141- 149.

作者简介：



孙彦景 (1977-), 男, 山东滕州人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络和嵌入式实时系统。



钱建生 (1964-), 男, 浙江桐乡人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为矿山通信和无线传感器网络。



马姗姗 (1978-), 女, 河南焦作人, 中国矿业大学博士生、讲师, 主要研究方向为无线传感器网络和信息处理。



任鹏 (1985-), 男, 江苏徐州人, 中国矿业大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络和无线认知网络。

(上接第 57 页)

- [18] 李挥, 何伟, 伊鹏. 排序集线器多级互连交换结构的多路径自路由模型[J]. 电子学报, 2008, 36(1):1-8.  
LI H, HE W, YI P, *et al.* Modeling multi-path self-routing switching structure from multistage interconnection of sorting concentrators[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1):1-8.

作者简介：



张博 (1982-), 男, 河北张北人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为可重构路由理论与技术、可重构交换理论与技术。



汪斌强 (1963-), 男, 安徽桐城人, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带信息网络和高速路由器核心技术。



朱圣平 (1968-), 男, 浙江东阳人, 国家数字交换系统工程技术研究中心工程师, 主要研究方向为可重构网络理论与技术。