

# 基于送达率约束的无线传感器网络低时延拓扑控制算法研究

孔姗姗<sup>1,2</sup> 刘林峰<sup>1,2,3</sup> 陈行<sup>4</sup>

(南京邮电大学计算机学院 南京 210023)<sup>1</sup> (江苏省无线传感网高技术研究重点实验室 南京 210003)<sup>2</sup>  
(东南大学计算机科学与工程学院 南京 211189)<sup>3</sup> (南京工程学院计算机工程学院 南京 211167)<sup>4</sup>

**摘要** 基于数据紧迫采集应用场景(如地震、火灾预警),分析了其拓扑控制的目标和需求,建立了网络模型并且进行了形式化描述和数学分析,提出了一种基于送达率约束的低时延拓扑控制算法(LDBDC)。该算法可以根据给定的送达率约束计算给定区域的近似最优平均跳数,从而得到虚拟网格的边长。仿真实验表明,LDBDC能够获得近似最优的拓扑结构,在满足送达率约束的前提下使得网络的平均时延最小。

**关键词** 无线传感器网络,拓扑控制,送达率,低时延

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.032

## Low Delay Topology Control Algorithm Based on Delivery Ratio Constraint in Wireless Sensor Networks

KONG Shan-shan<sup>1,2</sup> LIU Lin-feng<sup>1,2,3</sup> CHEN Hang<sup>4</sup>

(School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)<sup>1</sup>

(Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210003, China)<sup>2</sup>

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)<sup>3</sup>

(Department of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)<sup>4</sup>

**Abstract** In the paper, the objective and requirement of topology control were analyzed based on the application scenes of emergency data collection (such as earthquakes, fire alarms), then network model was constructed, and it was described formally and analyzed by mathematical theory. A low delay topology control algorithm based on delivery ratio constraint (LDBDC) was proposed accordingly. The algorithm can calculate the approximate optimal average number of hops for given area so as to obtain the length of virtual grid based on pre-given delivery ratio constraint. The simulation experiments suggest that LDBDC can obtain approximate optimal topology structure and obtain the minimum average delay satisfying the premise of delivery ratio constraint.

**Keywords** Wireless sensor networks, Topology control, Delivery ratio, Low delay

## 1 引言

无线传感器网络<sup>[1]</sup>由大量部署在监测区域内的传感器节点组成,这些节点通常是一个微型的嵌入式系统,只有有限的处理、存储和通信能力,通过电池提供有限的能量,所以一般的传感器网络追求的首要目标是最大化网络生命周期。但是由于无线传感器网络是与应用相关的网络,不同的应用场景对网络的性能需求不同。例如,本文针对地震、火灾的搜救这种特殊的应用场景,最大化网络的生命周期就不应该作为网络的首要性能目标,因为超过一定的时间就失去了搜救的意义,相对而言,在有效的搜救期内保证数据包传送的高送达率<sup>[2]</sup>和低时延<sup>[3-5]</sup>是网络的首要目标。拓扑控制作为无线传感器网络研究的核心支撑技术之一,不仅能够提高路由协议和MAC协议的效率,还为数据融合、时间同步和目标定位等提供基础,所以良好的拓扑结构可以有效地优化网络的性能

目标。本文就地震、火灾救援这样的特殊应用场景提出一种基于送达率约束的低时延的拓扑控制算法。

## 2 相关研究

在拓扑控制领域,国内外学者已经做了大量的相关研究并且提出了很多满足不同目标的拓扑控制算法,这里主要介绍与送达率和延时相关的拓扑控制算法。文献[6]提出一个基于多集编码的多路径方案来均衡数据负载以达到减少丢包率的目的,但是这种方案会增加额外的能耗。文献[7]采用一个链接断裂预测的动态源路由(DSR)协议来增加数据包的送达率,具体的方法是移动节点使用接收报文的信号功率强度来预测链路破损时间,如果链路即将破损,则发送一个警告给源节点,源节点可以进行路由重建,以避免链路断裂。文献[8]提出一种新的分析推导可靠度量和数据包送达率的方法,这种方法可以实现一维到多维的送达率计算公式的推导,为

到稿日期:2014-12-27 返修日期:2015-04-23 本文受国家自然科学基金(61373139,71301081),江苏省自然科学基金(BK2012833),中国博士后科学基金(2014M560379),南京工程学院引进人才科研启动基金(272340726101101)资助。

孔姗姗(1988-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:372236004@qq.com;刘林峰(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络和机会网络;陈行男,博士,讲师,主要研究方向为计算机网络。

无线传感器网络的拓扑控制算法和路由算法提供了数学推导的依据。文献[9]提出的算法基于 DFS 树来最小化每个传感器节点到 SINK 节点的跳数,从而减少网络的时延。文献[10]提出一个基于多信道分配的博弈论算法,该算法提出的一个次优的解决方案可以在多项式时间内分配信道。与以前的静态分配信道的算法相比,该算法充分利用了拓扑和路由信息来完成信道分配,有效减少了网络的干扰。但是这个算法的缺点是随着网络规模和节点数目的增加,网络的干扰会迅速增加,收敛到纳什均衡的迭代步数也会迅速增加,使得网络的送达率会迅速减少,时延增加。文献[11]针对有损的链路网络提出两个独立的启发式算法来解决平行边缘碰撞问题,相对而言,该算法更加适用于现实应用,但是该算法的复杂度还有待优化。文献[12]定义了一个更加精确的基准来计算端到端的延迟,并且提出了一种满足时延约束能量高效的拓扑控制算法。该算法的基础是通过划分网络,在每部分生成最小能量生成树并且施加一定的网络延时限制来组建网络拓扑。文献[13]用正方形把监测区域网格化,在确定单元格边长时只考虑了网络的连通性,即每个正方形的边长为  $R/\sqrt{5}$ 。在簇头选举时,只考虑了节点的剩余能量,使得网络的送达率和覆盖率相对较低。

综上所述,与时延和送达率相关的算法虽然很多,但是这些算法大多数是和能量相结合来设计拓扑控制算法的,无法解决本文所提出的地震、火灾救援这种特殊应用场景问题。下面针对这种特殊应用场景,采用建模和数学分析的方法确定虚拟网格的边长,从而将监测区域网格化;除此,还提出了相应的路由选择策略,进一步优化网络的性能,解决了网络的送达率低时延高的问题,实现了数据紧迫采集的目标。

### 3 问题建模及分析

为了方便模型的构建分析和描述,本文做出如下的假设:

假设 1 假设监测区域是一个边长为  $L * L$  的正方形区域,节点是均匀分布的,只存在一个 SINK 节点,且 SINK 节点位于监测区域的中心。

假设 2 每个节点的通信半径是可调的,且最大传输范围都是  $R$ 。

假设 3 传感器网络的部署获得 GPS 的辅助,每个节点均可获得自身和邻居节点的地理位置。

#### 3.1 模型构建

首先对地震、火灾的救援这一特殊应用场景进行目标需求分析,可以将其抽象成如下的一个问题模型:假设给定的救援区域是一个  $L * L$  的正方形区域,要求数据包的平均送达率不低于  $P_{contrast}$ ,使得在满足平均送达率约束的前提下网络的平均时延最小。为了方便问题的描述和分析,把无线传感器网络的拓扑控制抽象为一个二维平面内的无向图  $G(V, E)$ ,其中  $V, E$  分别表示节点、链接的集合。若节点  $i, j \in V$ ,且  $i, j$  之间存在链接,则  $(i, j) \in E$ 。 $i, j$  之间的距离记作  $d_{i,j}$ ,节点  $i, j$  之间的送达率记作  $Delivery(d_{i,j}), Delivery(d_{i,j})$ <sup>[8]</sup>的公式如式(1):

$$Delivery(d_{i,j}) = 1 - \frac{m^m}{\Gamma(m)} \int_0^{(\frac{d_{i,j}}{R})^r} z^{m-1} e^{-mz} dz \quad (1)$$

其中,  $R$  是节点的最大传输范围,  $r$  为路径损失指数,这里取  $r=2$ ;  $m$  为衰减参数,根据实验数据统计<sup>[8]</sup>得出  $m$  的取值有如式(2)的规律。

$$m = \begin{cases} 3, & d_{i,j} < 50m \\ 1.5, & 50m \leq d_{i,j} < 150m \\ 1, & d_{i,j} \geq 150m \end{cases} \quad (2)$$

由于本文实验所采用的传感器节点的最大传输范围  $R$  都小于  $50m$ ,因此取  $m=3$ 。链接  $(i, j)$  上的时延记作  $Delay(i, j)$ ,  $Delay(i, j)$  的公式如式(3)所示。

$$Delay(i, j) = \frac{L_b}{B} + \frac{d_{i,j}}{v} \quad (3)$$

其中,  $L_b$  是数据包的长度,  $B$  是信道容量,  $v$  是电磁波的传输速率。假设节点  $d$  和  $s$  节点之间采用多跳方式通信,则节点  $d$  和节点  $s$  之间的总时延可以表示为式(4)<sup>[12]</sup>。

$$Delay(d, s) = K * hop\_count + \frac{1}{v} * \sum_{v_{i,j} \in V} l_{i,j}^{d,s} * d_{i,j} \quad (4)$$

其中,  $K = L_b/B$ ,在数据分组大小和信道容量不变的情况下,  $K$  是一个定值,即发送一个数据包的发送时延是不变的;  $l_{i,j}^{d,s}$  是一个布尔值,当链接  $(i, j)$  在节点  $d$  到节点  $s$  的一条路由路径上,则  $l_{i,j}^{d,s}$  为 1,否则为 0。即  $\sum_{v_{i,j} \in V} l_{i,j}^{d,s} * d_{i,j}$  表示节点  $d$  到节点  $s$  之间经过的总的路径长度。由于  $v$  是电磁波的传输速率,即光速 ( $3 * 10^8 m/s$ ),因此节点到节点之间的传输时延可以忽略不计,即点到点的总时延可以简化为跳数与发送时延的乘积,当数据包的长度和信道容量不变时,发送时延是固定不变的,所以时延仅由跳数来决定,即跳数越少,则时延越小。

#### 3.2 理论分析

基于以上的模型和假设,对本文所要解决的问题进行理论分析,根据送达率和时延的模型可知,这两个模型都与距离和跳数相关,因此考虑用区域网格化的方法来分簇。由于在节点的最大传输范围  $R$  相同的情况下,采用正六边形比正方形的覆盖面积大,单跳信号的利用率更高<sup>[14]</sup>,即相同  $R$  情况下跳数更少,所以时延相对较小,因此本文采用正六边形虚拟网格,从而把问题转化为如何确定正六边形的边长,使得网络的平均送达率满足约束,且平均时延最小。确定虚拟六边形的边长的计算步骤如下。

步骤 1:以监测区域的中心点为原点,建立坐标系,计算所有点到原点的平均距离  $d_{average}$ ,计算公式见式(5)。

$$d_{average} = \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sqrt{X^2 + Y^2} dXdY \quad (5)$$

步骤 2:假设把  $d_{average}$  平均分成  $k$  跳,每一跳的距离为  $d_{average}/k$ ,则所有点到原点的平均送达率的公式为式(6)。

$$Delivery(d_{average}) = \left(1 - \frac{m^m}{\Gamma(m)} \int_0^{(\frac{d_{average}}{k} * \frac{1}{R})^r} z^{m-1} e^{-mz} dz\right)^k \quad (6)$$

式(6)经 MATLAB 7.0 拟合的曲线如图 1 所示,其中参数设置为  $r=2, m=3, L=300m, R=30m$ 。

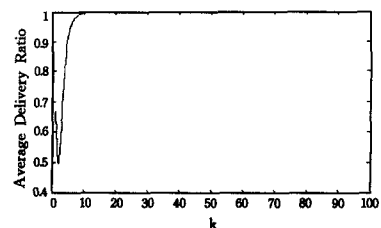


图 1  $k$  变化的拟合曲线

由图 1 可以看出,当  $k$  大于某个值时,平均送达率是随着  $k$  的增加而增加的,但是其增加的幅度逐渐趋近于 0。又由时

延公式可知,跳数越少时延越小,所以假设平均送达率的约束为  $P_{constrast}$ ,则应该取  $Delivery(d_{average}) \geq P_{constrast}$  时最小的  $k$  值,记为  $k_0$ 。

步骤 3:正六边形的边长记为  $d_0$ ,令  $\frac{d_{average}}{k_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_0$ ,

为了保证网络的连通性,则  $d_0 \leq \frac{R}{\sqrt{13}}$ 。综合以上两个公式最

终确定正六边形的边长  $d_0 = \frac{\pi * L}{12\sqrt{3} * k_0}$ ,其中  $k_0 \geq$

$\frac{\sqrt{13} * \pi * L}{12\sqrt{3} * R}$ ,如图 2 所示。然后以边长为  $d_0$  的正六边形单

元格将区域网格化,虚拟网格的数目记作  $M$ 。

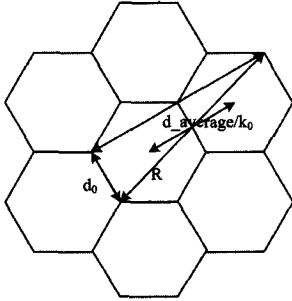


图 2 确定边长示意图

#### 4 算法描述及分析

针对地震火灾救援这一特殊应用场景,本文提出了基于送达率约束的无线传感器网络低时延的拓扑控制算法,该算法的具体执行步骤描述如下。

第 1 步:根据 3.2 节中计算正六边形边长的步骤计算出  $d_0$ ,并且以正方形监测区域的中心为第一个正六边形的中心,依次形成其相邻的正六边形,直到把整个监测区域完全覆盖。每个节点通过 GPS 获得自己的位置信息和节点号,并计算自己所属的单元格号和所属层号。已知正六边形的中心点的坐标,利用一种分层算法计算所属的层号,其中最中心的一个正六边形为第 0 层,其相邻的 6 个正六边形为第 1 层,依次类推,为每个正六边形分配层号,如图 3 所示。

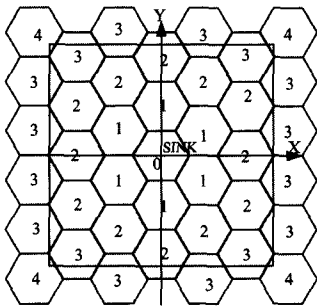


图 3 分层示意图

第 2 步:每个节点都通过广播通告自己的信息(节点 ID、单元格号、层号、剩余能量、状态等),其他节点收到广播报文后,若其单元格号和本节点的单元格号相同,则将该报文中的信息记录在自己的邻居表中,否则丢弃。经过这个阶段,节点能够得知同一个单元格中的所有节点的信息。

第 3 步:全网的每个节点同时将自身的定时器设置为  $Td = (1 - \frac{d_0}{d} * \frac{E_p - E_l}{E_0}) * Td_0$ ,一个节点在定时器超时前如果没

有收到相同单元格的广播信息,则当选为所在单元格的簇头节点,并发布一条广播报文,通告自己的信息。其他节点收到并记录该报文信息,在自身的定时器超时后,向簇头节点发送自己的信息。簇头节点按照收到信息的先后依次从小到大编号并记入簇头候选表中,在簇头的剩余能量  $E_p$  小于能量阈值  $E_l$  时,簇头向候选表中编号最小的节点发送一条信息(包括簇头候选表),使其当选下一轮的簇头,当选簇头的节点发布一条广播报文来通告自己的信息,并把簇头候选表中的最小编号的记录(即自身的信息记录)删除,在自身剩余能量小于能量阈值时,向簇头候选表中的最小编号的节点发送信息,使其当选下一轮的簇头节点。

第 4 步:每个单元在簇头选举完成后,向相邻单元格的簇头告知自己的信息。数据源节点把信息发送给所在单元格的簇头节点,簇头和 SINK 节点之间采用多跳路由算法通信,即外层簇头节点只负责把数据转发给相邻的内层簇头节点,如有两个相邻的内层簇头节点,则将其转发给距离较接近  $d_{average}/k_0$  的那个簇头节点。

根据本算法的步骤描述,可以看出本算法的时间复杂度为  $O(1)$ ,这是因为在第 3 步中用了定时器的方法来进行簇头的选举,避免了节点之间的集中式比较,有效降低了簇头选举算法的时间复杂度。此外,本文提出了简单高效的路由选择算法,每个簇头只需要从两个相邻的内层簇头中选择一个来转发数据,所以其时间复杂度为  $O(1)$ 。常用的最短路径路由算法(迪杰斯特拉算法)的时间复杂度为  $O(N^2)$ ;相比之下,本文提出的算法的时间复杂度更加稳定,不会随节点数目  $N$  的变化而变化。算法的报文复杂度<sup>[15]</sup>是指在算法执行期间所消耗的报文的数量级。本算法的报文复杂度主要集中在第 2 步—第 4 步,第 2 步的报文消耗量是  $N^2$  条,第 3 步的报文消耗量是  $2N - M$  条,第 4 步的报文消耗量为  $6M$  条,由于  $M < N$ ,因此第 4 步的最坏的报文复杂度为  $O(6N)$ 。所以综上所述可知,本算法的报文复杂度为  $O(N^2)$ 。

#### 5 仿真实验及分析

本算法的仿真采用了 C 语言程序,在实验一中采用了 MATLAB 7.0 来辅助分析送达率的误差。仿真实验的环境如下:在一个  $L * L$  的正方形区域随机均匀分布  $N$  个节点,一个 SINK 节点位于监测区域的中心位置,每个节点的最大传输范围都为  $R$ ,初始能量都为  $E_0$ ,不考虑 SINK 节点能耗。在仿真实验中,让每一个节点向 SINK 节点发送一个数据包,记录网络的平均送达率和平均时延。实验内容主要包括 4 个方面:第一个实验是对送达率的误差进行分析,并且分别测试了监测区域的边长  $L$  和节点的最大传输范围对送达率误差的影响;第二个实验主要测试不同的送达率约束下的时延的变化以及不同的  $L$  和  $R$  对时延的影响;第三个实验主要是测试节点的个数  $N$  对不同的送达率约束下的时延的影响;第四个实验是与其他的 3 种算法(GAFH<sup>[13]</sup>算法、GBCA 算法<sup>[10]</sup>、Connectivity 算法)进行目标性能的比较。其中的 Connectivity 算法就是在计算虚拟网格边长时仅考虑网络的连通性,即把本算法(LDBDC)的虚拟正六边形的边长固定为  $R/\sqrt{13}$ ,为了方便描述,称其为 Connectivity 算法。由于 GAFH 算法没有自己固定的路由算法,这里采用常见的迪杰斯特拉算法。

仿真实验中用到的主要的参数如表 1 所列,若实验中没有明确指出  $L$ 、 $R$  的值,则  $L=200\text{m}$ , $R=30\text{m}$ 。

表 1 主要参数

参数	描述	取值
R	最大传输范围	20m~40m
L	监测区域边长	200m~400m
N	节点的个数	5000~10000
m	衰减参数	3
r	路径损失指数	2
$L_b$	数据包长度	1kB
B	信道容量	3MBps
$E_0$	节点的初始能量	20J
$E_t$	节点的能量阈值	0.5J
w	单位费用函数的参数	$2 \times 10^{-5} \text{J/kB} \cdot \text{m}^3$

### 5.1 实验一

本实验的目的是对送达率的误差进行分析,由送达率的计算公式(6)可以看出在  $m$  和  $r$  确定的情况下,平均送达率受  $L$  和  $R$  的影响。本实验中送达率的约束  $p_{contrast}=0.96$ ,图 4 是在  $R=30\text{m}$  时通过改变监测区域的边长  $L$  来观察平均跳数  $k_0$  的实验值和理论值之间的误差变化,图 5 是在  $L=300\text{m}$  时通过改变  $R$  来观察  $k_0$  的实验值和理论值之间的误差,可以看出在相同的送达率约束下, $k_0$  的值随  $L$  的增加而变大,随  $R$  的增加而减少。但是观察图 4 和图 5 会发现两个共同现象: $k_0$  的理论值和仿真值的曲线的形状很相似,几乎一直保持平行;在  $L$  或  $R$  相同的情况下, $k_0$  的理论值比仿真值稍微偏大,这个误差几乎稳定为 1。产生误差的主要原因是确定六边形边长的时候,把每个正六边形内的点都等效为在中心点的位置发送数据包,但是在仿真的时候所采集的平均送达率是在同一时刻每个节点发送一个数据包时被 SINK 节点成功接收的概率,单元格内的所有节点都等效在本单元格内的簇头节点的位置发送数据包,但是在节点随机均匀分布的情况下,每个单元格中的此刻簇头节点的位置不可能都保持在单元格的中心位置。现实应用中,在网络的生命期内,假设每个节点都可以依次当选为簇头,那么网络生命周期内数据包的平均送达率将更加接近理论值。

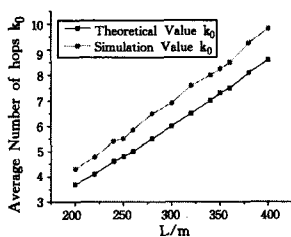


图 4 不同  $L$  下的误差数据

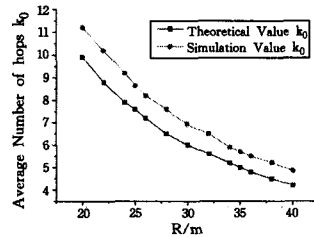


图 5 不同  $R$  下的误差数据

### 5.2 实验二

本实验是通过设定不同的平均送达率约束以及不同的  $L$  和  $R$  来观察网络的平均时延的变化规律。观察图 6 和图 7 可以发现一个共同的规律:在  $L$  和  $R$  相同的情况下,平均送达率约束设置得越高,网络的平均时延越长,这是由于设置的平均送达率越高,理论计算的网络的平均跳数  $k_0$  越大,因此时延越长。从图 6 和图 7 中可以看出,网络的平均时延随着监测区域边长  $L$  的增加而增加,随着  $R$  的增加而减少,所以当监测区域固定时,最好选用节点的最大的传输范围进行通信。

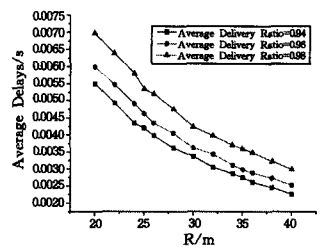
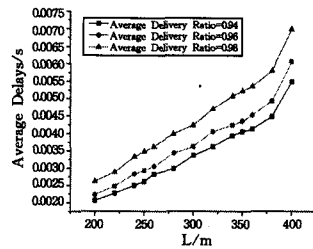


图 6 不同  $L$  下的平均时延数据

图 7 不同  $R$  下的平均时延数据

### 5.3 实验三

本实验的目的是观察不同的节点数对网络的平均时延的影响,本实验分别采集了送达率约束为 0.98、0.96、0.94 的情况下的平均时延曲线。从图 8 可以看出,节点的数目  $N$  对网络的平均时延的影响不大,虽然有所波动,但是从整体上看,一般随着  $N$  的增加,网络的平均时延相对较小。出现波动的原因可能是在簇头的选举上本算法还适度地考虑了节点的剩余能量,此外,节点是随机均匀分布的,可能某次在节点数  $N$  较小时比节点数  $N$  较大时选取的簇头整体分布更加靠近每个虚拟单元格的中心位置。

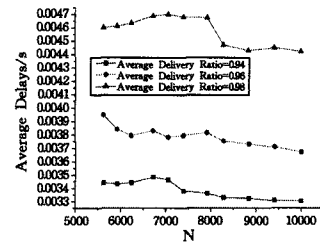


图 8 不同  $N$  下的网络平均时延数据

### 5.4 实验四

本实验是通过不断改变节点的数目  $N$  来与其他算法进行比较的,由于提出本算法的目的是解决地震、火灾救援这种特殊应用中数据的紧迫成功采集问题,因此一般要求数据包的送达率不能低于 0.90。在图 9 中与 3 种算法进行了在不同  $N$  值下的送达率的比较,通过观察可以发现 LDBDC 算法、Connectivity 算法、GAFH 算法的送达率曲线随  $N$  的变化变动不大,相对而言,GBCA 算法受  $N$  的影响较大,随着  $N$  的增加在不断变小。图 9 中的 LDBDC 算法中  $k_0$  的取值固定为在  $N=10000$  时送达率为 0.94 时的值,之所以取送达率为 0.94,是为了更容易与 GBCA 比较随  $N$  节点的变动曲线的变化趋势。Connectivity 算法和 GAFH 算法的最高送达率都低于 0.90。相比而言,Connectivity 算法整体的送达率高于 GAFH 算法,并且随着  $N$  的变化波动更小,这是由于在 Connectivity 算法中进行簇头选举时考虑了节点到单元格中心点的位置,而 GAFH 算法考虑了节点的剩余能量。此外,GAFH 算法采用了正方形的虚拟网格来划分监测区域,使得在相同的  $R$  下 GAFH 的覆盖率相对较低。由于 Connectivity 和 GAFH 算法的整体送达率都不满足约束,因此在图 10 中就不再进行时延的比较。图 10 对本算法和 GBCA 算法在不同  $N$  下的时延进行了比较,绘制了本算法的 3 条满足送达率约束的曲线,分别为 Average Delivery Ratio=0.94、Average Delivery Ratio=0.96、Average Delivery Ratio=0.98 时的平均时延曲线。结合图 9,通过观察可知,GBCA 算法的平均时延随着  $N$  的增加而较大幅度地上升,在送达率位于 0.90~0.94 之间时的平均

(下转第 168 页)

[9] Sun XACML[OL]. 2006. <http://sunxacml.sourceforge.net>

[10] Enterprise XACML[OL]. 2008. <http://code.google.com/p/enterprise-java-xacml>

[11] Liu A X, Chen Fei, Hwang J H, et al. Designing fast and scalable XACML policy evaluation engines[J]. IEEE Trans on Computers, 2011, 60(12): 1802-1817

[12] Niu De-hua, Ma Jian-feng, Ma Zhuo, et al. HPEngine: high performance XACML policy evaluation engine based on statistical analysis[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8): 206-215 (in Chinese)

牛德华, 马建峰, 马卓, 等. 基于统计分析优化的高性能 XACML 策略评估引擎[J]. 通信学报, 2014, 35(8): 206-215

[13] Wang Ya-zhe, Feng Deng-guo, Zhang Li-wu, et al. XACML Poli-

cy Evaluation Engine Based on Multi-Level Optimization Technology[J]. Journal of Software, 2011, 22(2): 323-338 (in Chinese)

王雅哲, 冯登国, 张立武, 等. 基于多层次优化技术的 XACML 策略评估引擎[J]. Journal of Software, 2011, 22(2): 323-338

[14] Wang Ya-zhe, Feng Deng-guo. A Conflict and Redundancy Analysis Method for XACML Rules[J]. Chinese Journal of Computers, 2009(3): 516-530 (in Chinese)

王雅哲, 冯登国. 一种 XACML 规则冲突及冗余分析方法[J]. 计算机学报, 2009(3): 516-530

[15] Stepien B, Matwin S, Felty A. An Algorithm for Compression of XACML Access Control Policy Sets by Recursive Subsumption [C]// 2012 Seventh International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES), 2012. IEEE, 2012; 161-167

(上接第 147 页)

时延高于本算法 (LDBDC) 在送达率为 0.94 时的平均时延, 且大部分时候高于本算法在送达率为 0.96 时的平均时延, 甚至随着  $N$  的增大会超过本算法在送达率为 0.98 时的时延。主要原因是 GBCA 算法采取信道分配来提高送达率, 节点数目越多, 信道干扰越大, 收敛迭代越多, 所以使得数据包的送达率越低, 时延越大。而前 3 种算法都是将监测区域网格化, 每个单元格选择一个簇头, 这使得簇头节点的分布更加均匀, 相对位置变动不大。

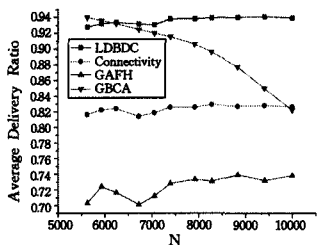


图 9 不同算法的平均送达率比较数据

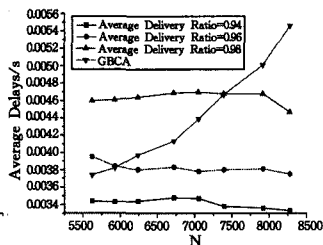


图 10 不同算法的平均时延比较数据

**结束语** 本文针对地震、火灾救援这种特殊的应用场景提出了一种满足送达率约束的低时延的拓扑控制算法, 该算法首先根据网络的送达率要求将区域网格化; 然后提出了简单高效的簇头选举机制和相应的路由选择算法, 降低了算法的时间复杂度和报文复杂度。数学理论推导和仿真实验分析证明, 本算法的实验数据和理论数据的误差很小, 能够在满足送达率的约束下近似最小化网络的平均时延。

### 参考文献

[1] Geethapriya S, Jawahar A. Performance evaluation of hybrid topology control in WSN[C]// IEEE International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). 2013; 9-13

[2] Zhao J, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2003; 1-13

[3] Xu H, Huang L, Liu W, et al. Topology control for delay-constrained data collection in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2009, 32(17): 1820-1828

[4] Toscano E, Lo Bello L. A topology management protocol with bounded delay for wireless sensor networks[C]// IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Auto-

mation(ETFA). 2008; 942-951

[5] Ammari H M, Das S K. A trade-off between energy and delay in data dissemination for wireless sensor networks using transmission range slicing[J]. Computer Communications, 2008, 31(9): 1687-1704

[6] Tsirigos A, Haas Z J. Analysis of multipath Routing-Part I: the effect on the packet delivery ratio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 138-146

[7] Qin L, Kunz T. Increasing packet delivery ratio in DSR by link prediction[C]// Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2003

[8] Ma X, Yin X, Butron G, et al. Packet Delivery Ratio in k-Dimensional Broadcast Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 2252-2255

[9] He L. Delay-minimum energy-aware routing protocol (DERP) for wireless sensor networks[C]// Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/ Distributed Computing. 2007, 3: 155-160

[10] Yu Q, Chen J, Fan Y, et al. Multi-channel assignment in wireless sensor networks: A game theoretic approach[C]// IEEE INFOCOM. 2010; 1-9

[11] Wang X, Liao X, Huang H, et al. Topology control in lossy wireless sensor networks with delay constraint[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2013; 958-963

[12] Eslamlu G B, Sabaei M, Fereydooni M. A new delay constraint topology control algorithm in WSN[C]// IEEE International Conference on Innovations in Information Technology (IIT). 2012; 189-193

[13] Santi P. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks[M]// 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks. 2004; 106-121

[14] Li Chong. Research on Topology Control and Routing Protocol Based on Honeycomb Mesh in Wireless Sensor Network[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011 (in Chinese)

李充. 基于蜂窝网格的无线传感器拓扑控制及路由协议研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011

[15] Kröller A, Fekete S P, Pfisterer D, et al. Deterministic boundary recognition and topology extraction for large sensor networks [C]// Proceedings of the Seventeenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithm. 2006; 1000-1009