

## 基于精细化梯度的无线传感器网络汇聚机制及分析\*

朱红松<sup>1,2</sup>, 孙利民<sup>3</sup>, 徐勇军<sup>1</sup>, 李晓维<sup>1+</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 计算技术研究所,北京 100080)

<sup>2</sup>(中国科学院 研究生院,北京 100049)

<sup>3</sup>(中国科学院 软件研究所,北京 100080)

### Mechanism and Analysis on Fine-Grain Gradient Sinking Model in Wireless Sensor Networks

ZHU Hong-Song<sup>1,2</sup>, SUN Li-Min<sup>3</sup>, XU Yong-Jun<sup>1</sup>, LI Xiao-Wei<sup>1+</sup>

<sup>1</sup>(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2</sup>(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>3</sup>(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62600740, E-mail: lxw@ict.ac.cn, <http://test.ict.ac.cn>

Zhu HS, Sun LM, Xu YJ, Li XW. Mechanism and analysis on fine-grain gradient sinking model in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1138–1151. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1138.htm>

**Abstract:** Data sinking is one of the typical transmission patterns in WSN (wireless sensor network). There is inherent unbalanced traffic load distribution in such funnel like transmission. A case in hop-based sinking (HBS) model is found more intricate than simple thought that inner nodes burden more forwarding tasks, showing the inverse direction within the same hop level comparing with global trend. With a simple weighted average mechanism, a continuous gradient parameter is introduced, which will be dedicated to instructing how to forward data to sink in place of hop count, namely fine-grain gradient sinking (FGS). Through traffic analysis and detailed simulation, in FGS model the network turns out to be smoother on traffic load distribution and more efficient on data forwarding than that in HBS model.

**Key words:** wireless sensor network; hop-based sinking; fine-grain gradient sinking; traffic load distribution; communication efficiency

**摘要:** 信息汇聚是无线传感器网络的典型传输形态之一.在信息汇聚过程中,网络存在数据流分布内密外疏的不均衡特性.研究发现,在传统跳数模型下,网络数据流分布不仅存在全局不均衡性,而且同层节点内还存在着内疏外密的反向不均衡现象,从而使网络流量分析复杂化.提出一种精细化梯度模型,通过引入加权平均机制,将跳数信息转化为精细梯度信息,并以梯度作为数据汇聚的参考依据.通过理论和仿真分析,精细化梯度模型下网络具有更平稳的网络数据流分布特征,并在通常情况下具有更高的通信效率.

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60633060 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant Nos.2006CB303007, 2005CB321604 (国家重点基础研究发展规划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2006AA01Z223, 2006AA01Z225 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2006-12-31; Accepted 2007-03-05

关键词: 无线传感器网络;跳数模型;精细化梯度模型;通信负载分布;通信效率

中图分类号: TP393 文献标识码: A

信息汇聚是无线传感器网络的典型传输形态之一.在跳数模型(hop-based sinking,简称 HBS)下,节点根据自己到达汇聚节点的跳数形成拓扑层次,并依据跳数层次传递数据.层次内部的节点具有相同的跳数,彼此之间无法区分到达汇聚节点的远近,故节点必须通过随机方法选择下一层次中的转发节点.跳数层次有一定的宽度,主要由节点的有效通信距离决定.同层次节点根据汇聚方向分为外边界节点和内边界节点(距离汇聚节点远的节点为外边界节点).至此,我们讨论 HBS 模型下的信息汇聚存在的两个问题.

问题1:层次内节点转发负载的不均衡性.如图 1 所示,节点  $i$  为处于层次  $N$  的外边界节点, $j$  为处于层次  $N$  的内边界节点, $F_s(i)$  节点集中任何节点都可能选择  $i$  作为其转发节点, $F_s(j)$  节点集中任何节点可能选择  $j$  作为其转发节点.直观上看, $F_s(i)$  节点数远大于  $F_s(j)$ ,故直觉判断  $i$  节点会比  $j$  节点负担更多的转发任务.后面将通过理论分析证明这一结论.这种数据流在层次内分布的不均衡性会导致层次中外边界的节点先死亡,而并非节点越靠近汇聚点越先死亡.

问题2:边界节点层次的稳定性不好.无线信道的开放特性和通信环境的不确定性,使得无线通信链路存在过渡带、非对称性问题.第 3.2 节将描述数据转发成功率与通信距离之间的关系.通信过渡带的存在使得层次中边界上的节点不断调整自己的层次.如图 1 所示,外边界节点  $i$  可能因为无法连接  $N-1$  层节点而降低到  $N+1$  层,而内边界节点  $j$  则可能因为连接到  $N-2$  层节点而上升到  $N-1$  层.这种调整对于无状态的路由选择算法影响不大,仅影响到临近节点的转发列表,但对于依赖树型拓扑的汇聚算法来说则是致命的,因为一个节点的跳数切换,将影响到该节点所有子节点的跳数的调整.

本文在 HBS 模型的基础上通过引入加权平均机制,将跳数信息转化为精细梯度信息,并以其作为转发节点选择的参考依据,后文称此模型为精细梯度汇聚模型(fine-grain gradient sinking,简称 FGS).本文的主要贡献在于:

- (1) 发现了跳数模型下数据汇聚的两个问题,通过引入精细化汇聚梯度的方法给予解决.
- (2) 提出了网络数据流分布特征的评价方法.通过分析和仿真发现,在 HBS 模型下存在层内数据流外密内疏的复杂分布特性,而 FGS 模型则在全网范围内表现为外疏内密的连续分布特性.
- (3) 在无状态随机转发策略的基础上建立理论分析模型,一方面证明了 HBS 和 FGS 模型下网络的分布规律,另一方面分析了两种模型下网络的通信效率,发现通常配置下 FGS 模型实现数据汇聚具有更高的通信效率.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节概述 HBS 模型和 FGS 模型的定义和汇聚方法.第 3 节建立数据流分析模型.第 4 节仿真比较 HBS 模型和 FGS 模型下数据流分布特征,并研究在不同网络配置情况下两种模型的网络通信效率.第 5 节讨论 FGS 模型下汇聚和转发策略的设计思路.最后总结全文.

## 1 相关工作

无线传感器网络是多学科交叉的网络技术,能量高效是无线传感器网络技术研究的核心内容之一<sup>[1-3]</sup>,不同学科的研究者都把如何降低节点和网络能耗作为主要研究内容.能量高效的目的是要延长节点和网络的生命期.节点生命期主要取决于其各功能部件的能量消耗,而网络的生命期一方面取决于节点的生命期,另一方面取决于网络连通性质.如果网络不连通,即使个别节点能量再充裕,整个网络也无法工作.

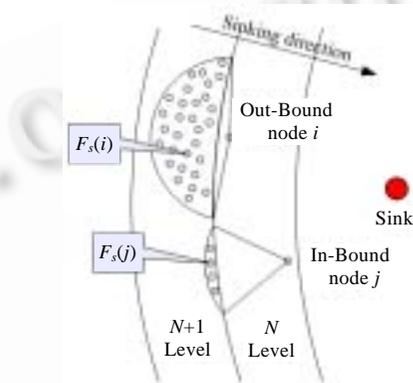


Fig.1 Forward source sets of in/out-bound node in the same level

图 1 同层内、外边界节点的转发源集

通信的能量消耗在节点能耗中占很高的比例,故通信效率直接影响到网络的生命周期.通信热点和瓶颈节点的存在,是造成网络过早不连通的重要原因.减少热点和瓶颈节点,或者能够预测热点和瓶颈节点的分布状况,对于维护和延长网络生命周期意义重大.通信热点和瓶颈节点一方面与网络部署相关,另一方面与网络协议有密切的关系.文献[4]提出,在层次型网络的树型拓扑汇聚策略下,距离汇聚节点越近的节点,其转发效率越高,从而成为通信的瓶颈节点.文献[5]研究了传感器网络中可能处于连通割点上的网络准瓶颈节点,一旦该节点死亡,则网络将可能失去连通性.文献[6]通过移动 Sink 节点使负载在网络中的分布更均衡.本文通过比较 HBS 模型和 FGS 模型下的数据汇聚特征发现,HBS 模型下使用无状态随机转发策略将导致同层中的外边界节点也成为一种瓶颈节点,而且其通信热度不低于内层的内边界节点.

影响多跳网络通信效率的两个重要因素是数据转发次数和数据重发次数.转发次数由源节点和目的节点之间的距离、通信半径以及转发协议决定.数据融合和压缩算法<sup>[7]</sup>通过减小网络源生数据以及源生数据的转发次数来减少网络负载.基于分簇的数据聚合方法<sup>[8,9]</sup>最主要的思想也在于此.

通信信道的开放性和不稳定性是造成数据重传的主要原因,而重传负载是数据融合和压缩不能解决的问题.文献[10]通过实验的方法指出,由无线信道的开放性和环境相关性引起的信号衰落和干扰对于协议设计有至关重要的影响.文献[11]根据通信理论分析了通信过渡区的存在和数据概率转发的本质,并分析了不同调制方式下,影响过渡区宽度的因素.文献[12]研究了在这种概率转发链路上,基于地理信息的能量高效的转发策略,通过改进协议来提高网络效率.文献[13]研究非对称概率转发链路上的数据汇聚方法,通过使用数据包序列号和偷听机制替代 ACK(acknowledge)应答机制,抑制了因为 ACK 丢失导致的额外重传,提高网络通信效率.本文将通过分析和仿真说明在无状态随机转发策略下,基于 FGS 模型的汇聚机制比 HBS 模型具有更高的通信效率.而 FGS 模型在很多协议中可以直接代替 HBS 模型来提高网络通信效率.

文献[14,15]最早提出了利用梯度概念进行数据汇聚.文献[14]提出了相当好的协议在源与目的节点之间建立梯度.这两篇文献的梯度定义为从源到汇聚点之间的代价,代价定义为链路质量.链路质量的评估往往需要节点硬件上提供支持,且链路质量的不稳定性对梯度的影响很大.本文提出使用跳数平均的梯度方法,对硬件没有要求,通过偷听和捎带方法即可进行梯度的维护.另外,本文最主要的贡献不在于精细梯度实现方法,而在于分析精细梯度与跳数模型之间的网络特性差异,这一点是在上述文章中未见体现.

## 2 HBS 模型和 FGS 模型概述

HBS 模型下节点转发数据以跳数为依据进行.在汇聚网络中,跳数通常标志节点到汇聚点之间的通信距离.汇聚网络中层次的形成通过汇聚点发起的洪泛过程完成,节点通过数据收发和信道监听可以维护自己的跳数层次.在 HBS 模型下,网络中跳数的间断性分布(以整数递进)是导致边界节点层次不稳定(问题 2)、网络负载在层间分布出现跳变(问题 1)的重要原因.

精细汇聚梯度模型通过引入一个与汇聚点距离呈准线性连续变化的参数代替跳数,作为数据在网内传输的指导参数.Ye 在文献[15]的技术报告中提出了一种梯度建立方法,但是,该方法假设所有节点测定的链路质量值是可区分的,通过该链路值确定转发梯度建立请求的退避时间.Ye 的假设存在实现上的问题,不同节点测定的链路质量未必一定可区分.本文建议的精细梯度通过两次特殊的洪泛过程完成:第 1 次洪泛,所有节点测定自己的跳数,并记录所有邻居节点的跳数;第 2 次洪泛,节点向邻居节点公布自己的梯度.洪泛过程的特殊性体现在两个方面:(1) 使用 CSMA-CA(carrier sense multiple access/collision avoidance)退避时需要保持接收状态;(2) 尽量减少洪泛冲突,使得更多的节点能够在新一轮的洪泛过程中得到所有邻居节点的信息.图 2 给出了通过跳数平均生成的精细梯度的理想形态.

每个节点根据自身梯度独立选择转发节点,不受跳数边界的限制,由此消除了 HBS 模型下内、外边界节点的  $F_c(i)$  集(参考定义 3、图 1 和图 3)的显著差异,从而消除了问题 1 产生的条件.另外,在 FGS 模型下,节点不按照跳数参数转发数据,跳数只反映到达汇聚点的距离,故在维护跳数的时候,只要记录到达汇聚点的最小跳数即可.这样就很好地抑制了问题 2 中边界处节点层次抖动的问题.因为梯度是对众多邻居节点的平均,单个节点的

跳数变化对梯度的影响不大,故梯度无须实时维护,可以在网络运行中通过捎带和监听邻居数据传输信息进行维护更新.所以对于 FGS 模型来说,维护的代价非常小.

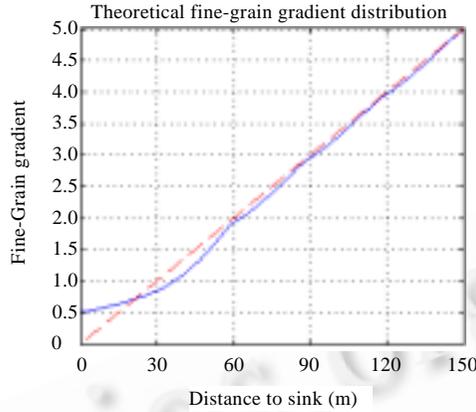


Fig.2 Fine-Grain gradient calculated by simply averaging neighbor's hops

图 2 简单平均邻居跳数得到的连续梯度

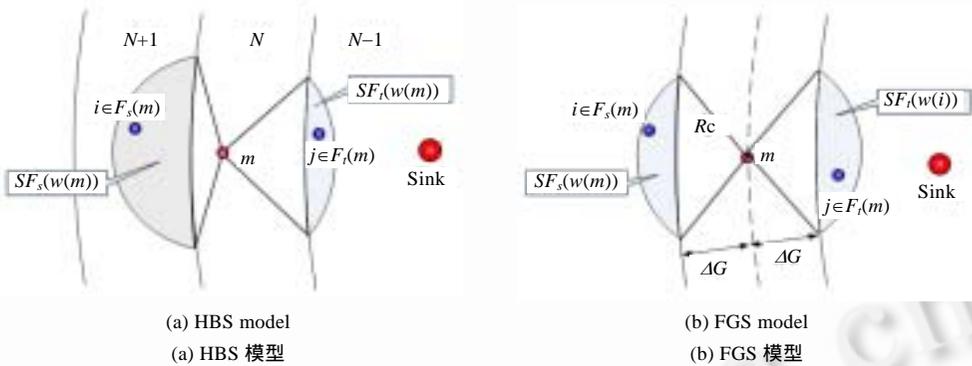


Fig.3 Illustration of data forwarding in both HBS and FGS model

图 3 HBS 模型和 FGS 模型的数据转发示意图

### 2.1 相关定义

定义 1. 节点  $i$  的源生负载  $T_g(i)$  为自身产生的负载,转发负载  $T_f(i)$  为帮助其他节点传送的负载.

定义 2. 节点  $i$  的转发目的集  $F_t(i)$  为可能帮助  $i$  转发数据的节点集合.区域中某点  $w$  的转发目的区域  $SF_t(w)$  为有效通信半径  $R_c$  和转发策略决定的  $F_t(i)$  可能存在的区域. $w(i)$  表示节点  $i$  所在的位置坐标.

定义 3. 节点  $i$  的转发源集  $F_s(i)$  为可能将数据负载转发给  $i$  的节点集合.区域中一个点  $w$  的转发源区域  $SF_s(w)$  为有效通信半径  $R_c$  和转发策略决定的  $F_s(i)$  可能存在的区域.

定义 4. 节点集  $I$  的有效通信负载  $T_e(I)$  表示节点集  $I$  理论上必须承担的通信负载量,为  $T_g(I)+T_f(I)$ .

定义 5. 节点集  $I$  的真实通信负载  $T_r(I)$  表示节点集  $I$  在实际通信过程中发生的通信负载量,包括有效通信负载  $T_e(I)$  以及在通信过程中因为误码造成重传而产生的额外负载.

定义 6. 数据包的负载转发效率为其一跳转发过程中发送的次数的倒数.

定义 7. 无状态随机转发策略是指在转发目的集中,等概率随机选择一个节点转发数据,且每次独立选择.

定义 8. FGS 模型下的梯度门限  $G_r$  是指节点自身与转发节点的梯度差的最小值.

图 3 展示了 HBS 模型和 FGS 模型相关概念在两种模型下网络拓扑中的含义.

### 3 HBS 模型与 FGS 模型的数据流分析

#### 3.1 理论模型假设和说明

本节将给出数据负载分布和网络通信效率在汇聚型网络中的静态分析方法.本文在一个理想的圆形部署区域、汇聚点位于圆中心的拓扑形态情况下讨论问题.区域记为 $\Omega$ ,汇聚点记为 $\Theta$ ,区域半径为 $R$ ,节点的有效通信距离定义为 $R_c$ .为了讨论方便、完备,给出如下假设和说明:

A.1. 节点在区域 $\Omega$ 内均匀部署,密度为 $\xi$ (个/ $m^2$ ),并以均值为 $1/\lambda$ 负指数分布为间隔产生源生负载.

A.2. 网络中节点密度 $\xi$ 足够大,保证网络具有较高的连通度.

A.3. 所有节点的汇聚梯度与节点到汇聚节点的距离呈严格的线性关系,即 $G(i)=k \cdot d(i)$ , $d(i)$ 表示节点 $i$ 到汇聚点 $\Theta$ 的距离, $k=1/R_c$ .本条件与 A.2、梯度生成算法及汇聚协议有很大关系.

A.4. 假设 MAC 协议采用无冲突、抑制无隐藏终端的协议,如 FAMA 协议.并将信令开销(ACK,RTS,CTS等)按照固定比例计入数据包收发开销中.

A.5. 网络工作在轻负载条件下,即满足条件: $\xi\lambda(\pi R^2) \ll BW(\Theta)$ , $BW(\Theta)$ 为汇聚带宽.本条件是希望在无冲突的情况下考察网络的数据流分布和效率特征.

A.6. 节点采用无状态随机转发策略进行数据转发.

A.7. 假设 MAC 使用基于 ACK 的无限重传模型(实现 1 可信度数据传输).

#### 3.2 信道模型

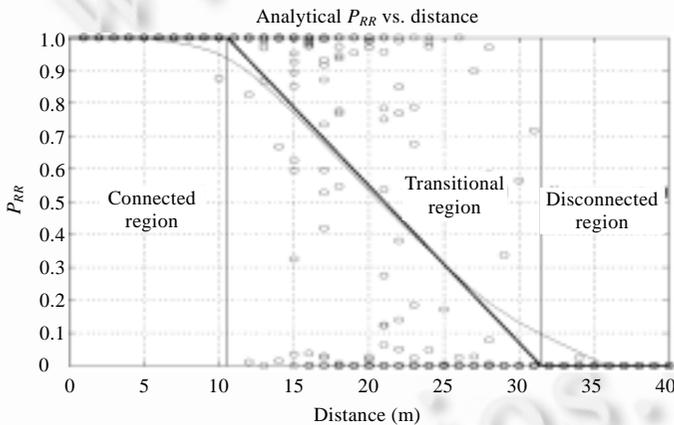


Fig.4 The theoretical and its approximate model of short wireless channel

图 4 短距离无线信道模型及其近似模型

短距离低功耗无线传感器网络的真实链路行为与理想的通断模型完全不同,与长距离视距传输模型也不相同.无线信道的自由衰落、阴影衰落以及复杂环境、接收机噪声等导致无线数据传输的误码率呈现非常复杂的情况.Zuniga 在文献[11]中根据通信理论分析了在无线短距离通信中链路误包率特征,证实了 Ganesan 在文献[10]中发现的无线传输区域中存在的连接区、过渡区和非连接区的存在.文中给出了连接区的范围、过渡区的范围以及过渡区内数据接收概率特征.图 4 描述了通信范围与包接收率(1-丢包率)的典型示意.从图中可以看出,在过渡区内,靠近连接区的节点,其包

接收率接近 1;而靠近非连接区的节点,其包接收率接近 0.其均值呈现准线性下降趋势.

Woo 在文献[17]中通过实验的方法测定了在特定环境中,网络节点的包接收率及其与发送点远近的关系.文中图 2 反映出,真实环境中的链路行为虽然可以通过理论给出解释,但无法用解析和统计的方法直接分析.

本文旨在从网络整体的角度来讨论数据流分布和效率,更希望能够通过理论上的分析,反映出大规模网络在一段较长工作时间内的一种总体趋势.而这种大规模网络在多种环境下的行为通过实验模型分析存在着成本和实现上的困难.为了便于从全局角度对两种模型下的网络行为及其运行趋势进行分析,且不丢失最基本的无线链路特征,本文采用了简化的统计均值模型描述包接收率与传输距离之间的关系,定义如下:

$$P_{RR}(d) = \min\left(\frac{(d_0 + D_t - d)}{D_t} u(d_0 + D_t - d), 1\right) \quad (1)$$

其中,  $u(t)$  为阶跃函数,  $d_0$  是过渡区起始位置,  $D_r$  是过渡区的宽度, 其曲线如图 4 中的粗实线所示。

在实际通信中, 造成丢包的因素除了信道噪声引起的误码以外, 还包括信号冲突造成的误码。A.4 和 A.5 通过对流量和协议进行假设, 将后续分析简化为只考虑信道及接收机噪声导致的误包。

### 3.3 模型评价标准

定义 9. 网络通信效率表示网络单位时间内, 源生负载与真实通信负载的比值, 即

$$\eta = \frac{\sum T_g(i)}{\sum T_r(i)} \quad (2)$$

公式(2)定义的网络通信效率是从网络全局的角度给出的评判标准。文献[13,18]从链路和路径的角度给出通信效率的标准与公式(2)定义的效率本质相同。公式(2)定义的网络通信效率反映了无线传感器网络的两个最主要的特性: 能量效率和延迟。在传感器网络的能量消耗中, 通信消耗的能量占据很大比例<sup>[16]</sup>。源生负载是不能被削减的, 减小通信能耗的唯一途径是通过转发策略降低真实通信负载量。本文讨论等包长、固定发送功率的情况, 故网络通信效率的倒数, 即单个源生数据汇聚到网关过程中实际发生的数据包收发次数, 与通信能耗相差常数比例。延迟定义为一个数据包从源到汇聚节点之间传递所耗费的时间。在轻负载条件下不考虑排队时间, 则通信延迟主要源于对误包的重传。网络通信效率也恰好通过重传频率反映数据延迟特性。

定义 10. 网络负载流量分布表示网络中处于不同位置节点承担的收发数据负载量的分布特征。

网络负载流量分布反映数据在网络中流动形成的局部负载分布特征。网络部署区域内负载的不均衡特性是汇聚型传感网络的另一个重要特征。首先, 汇聚特性使靠近汇聚点的节点有效通信负载量总体大于外围节点, 成为网络通信热点; 其次, 田乐等人在文献[5]中提出, 在节点随机部署中, 割点的存在导致负载分布的局部不均衡; 最后, 本文通过理论和仿真分析发现, 在 HBS 模型中同层节点也存在内疏外密的反向不均衡, 外边界节点也可能成为通信热点。

网络负载的不均衡会造成两个直接后果: 一是导致网络内节点寿命不同; 二是网络通信的阻塞导致更多的数据包在负载繁重的节点上排队。内密外疏的不均衡分布对于汇聚型网络来说存在必然性, 但一种稳定的、可预测的不均衡分布对于延长网络寿命有很大帮助。

### 3.4 有效负载分布特征分析

本文通过节点转发的空间相关性对负载在网络中的分布进行静态分析, 并通过分析证明了 HBS 和 FGS 模型负载分布形态的必然性。

引理 1. 圆形部署区域内距离汇聚中心相同的环带区域内的节点具有相同的负载流量、转发目的区域面积和转发源区域面积。

证明: 根据圆形部署区域、中心汇聚拓扑形态的对称性可知:

网络有效通信负载根据定义 4 包括节点源生负载和节点的转发负载, 即

$$T_c(i) = T_g(i) + T_f(i) \quad (3)$$

根据 A.1 中的假设, 源生负载是节点以负指数分布时间产生的负载, 在统计上具有均匀性。静态分析在单位时间内讨论问题, 故  $T_g(i)$  可以直接用  $\lambda$  表示。  $T_f(i)$  是节点  $i$  的转发负载, 由下式计算:

$$T_f(i) = \sum_{j \in F_s(i)} T_c(j) \cdot P(i|j) \quad (4)$$

其中,  $F_s(i)$  是节点  $j$  的转发源集,  $P(i|j)$  表示如果  $j$  节点有数据转发, 则其选择  $i$  节点转发的概率。根据无状态随机转发策略,  $P(i|j)$  取决于节点  $j$  的转发目的集  $F_t(j)$  中的节点个数。因为是等概率随机选择, 故有

$$P(i|j) = \frac{1}{\|F_t(j)\|} \quad (5)$$

其中,  $\|F_t(j)\|$  为  $F_t(j)$  中的节点个数。综合式(4)和式(5)有

$$T_f(i) = \sum_{j \in F_s(i)} \frac{T_e(j)}{\|F_t(j)\|} \tag{6}$$

定义 11. 区域  $S$  的有效负载  $T_e(S)$  为  $S$  内节点有效负载之和, 区域  $S$  的有效转发负载  $T_f(S)$  为  $S$  内节点有效转发负载之和.

以  $T_e(s)$  为测度, 定义积分如下: 当  $s$  邻域中有节点时,  $T_e(s)$  测度为节点有效负载; 否则, 测度为 0.

$$\tilde{T}_f(i) = \iint_{SF_s(i)} \frac{1}{SF_t(s) \cdot \xi} d(T_e(s)) \tag{7}$$

由上式可知,  $\tilde{T}_f(i)$  是  $T_f(i)$  的测度积分形式. 该积分形式使得后面可以直接在区域上讨论问题.

### 3.4.1 HBS 模型的讨论

定理 1. 在 HBS 模型下, 同一层次外边界节点的有效负载大于等于内边界节点.

证明: 定义  $r_m$  为节点  $m$  到汇聚点  $O$  的径向距离. 设  $m, n$  同属于第  $i$  层, 记为  $L(i)$ , 且  $r_m \geq r_n$ , 如图 5 所示. 其中,  $A_N - O_N$  表示层次  $N$  的内外边界. 由 A.1 可知, 不同节点的源生负载是相同的, 所以有效负载的比较只需针对转发负载进行.

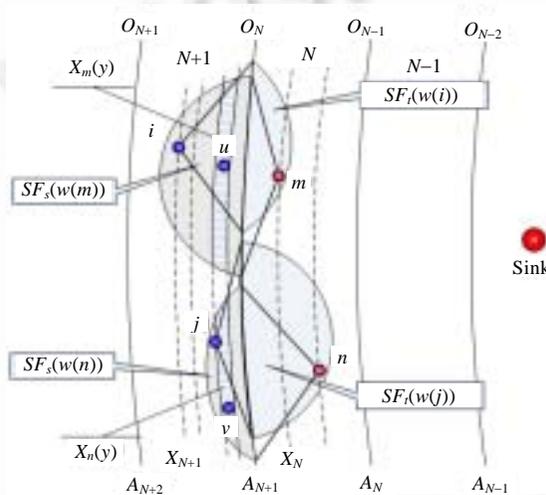


Fig.5 Effective traffic load of in/out bound nodes in same level under HBS model

图 5 HBS 模型下, 同层内、外节点的有效通信负载

(1) 若  $i$  代表网络最外层

由于最外层节点没有转发负载, 而节点源生负载相同, 所以  $T_e(m) = T_e(n)$ , 结论成立.

(2) 若  $i$  代表网络内部层次

用以汇聚点  $O$  为中心,  $[y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_p]$  (记为  $[y]$ ) 为半径的圆对  $SF_s(w(m))$  和  $SF_s(w(n))$  进行等距切分, 间距设为  $\Delta d$ . 从图 5 可以看出,  $SF_s(w(m))$  和  $SF_s(w(n))$  被  $[y]$  切分成很多弧带. 定义  $SF_s(w(m))$  和  $SF_s(w(n))$  被切分成的圆弧集为  $\{X_m(y) | y \in [y]\}$  和  $\{X_n(y) | y \in [y]\}$ ,  $[y]$  从  $L(i)$  的外边界一直切分到  $SF_s(w(m))$  的外边界. 由此, 公式 (7) 可以转化为如下形式:

$$\tilde{T}_f(j) = \lim_{\Delta d \rightarrow 0} \sum_{[y]} \int_{X_j(y_k)} \frac{1}{SF_t(y) \cdot \xi} d(T_e(y)), \quad j = m, n \tag{8}$$

要比较  $\tilde{T}_f(m)$  和  $\tilde{T}_f(n)$ , 只要比较和式内对  $X_j(y_k)$  的积分即可. 当  $[y]$  切分足够细时,  $\Delta d$  足够小, 根据引理 1, 对任意点  $b_m \in X_m(y)$  及任意点  $b_n \in X_n(y)$ , 有  $SF_t(b_m) = SF_t(b_n)$ , 且在区域  $X_m(y)$  和  $X_n(y)$  中恒定, 记为  $SF_t(y_k)$ . 同样, 根据引理 1,  $X_j(y_k)$  中任意节点  $i$  的  $T_e(i)$  也是相同的, 记为  $T_e(y_k)$ . 由此可得,  $d(T_e(y))$  的测度可以表示为  $T_e(y_k) \cdot \xi \cdot dy$ , 代入公式 (8), 得到

$$\tilde{T}_f(j) = \lim_{\Delta d \rightarrow 0} \sum_{[y]} \frac{T_e(y_k)}{SF_f(y_k)} \int_{X_j(y_k)} dy, \quad j = m, n \tag{9}$$

其中,积分  $\int_{X_j(y_k)} dy$  是  $X_m(y_k)$  和  $X_n(y_k)$  的面积,记为  $S(X_m(y_k))$  和  $S(X_n(y_k))$ 。从图 5 可以直接看出  $S(X_m(y_k)) \geq S(X_n(y_k))$ ,代入公式(9)进行比较,可得出  $\tilde{T}_f(m) \geq \tilde{T}_f(n)$ 。进而有:  $T_e(m) \geq T_e(n)$ 。定理得证。

3.4.2 FGS 模型的讨论

观察1. 在 FGS 模型下,节点的层次被精细化.节点  $i$  通过设定或动态计算的梯度门限  $G_i$  来确定其转发目的集  $F_i(i)$ ,即所有小于其最大通信半径且梯度比自己小  $G_i$  的节点将属于  $i$  的转发目的集。

观察2. 根据 A.3,梯度线性变化,故  $G_i$  对应的距离尺度  $\Delta R$  满足:  $\Delta R = Rc \times G_i$ 。

观察3. 考察节点  $i$  的转发源集,由观察 1 和观察 2 可知,  $F_i(i)$  中的节点必然处于比  $i$  节点距离汇聚点大于  $\Delta R$  以上的区域,否则将可能存在节点  $j \in F_i(i)$ ,使得  $i \notin F_i(j)$ 。

定理 2. 在 FGS 模型下,节点越是靠近汇聚点,其有效负载越大。

证明: 设  $m, n$  为网络中的两个节点,且  $r_m > r_n$ ,  $r_m$  和  $r_n$  的定义同上;用区间归纳法来证明。

(1) 首先,当  $R > r_m > r_n > (R - \Delta R)$  时( $R$  为网络外边界半径),  $m$  和  $n$  节点都没有转发负载,所以有  $T_e(m) \leq T_e(n)$ ;定义大于  $R$  的区域内的有效负载为 0,则对任意  $m, n$ ,若  $r_m > r_n > (R - \Delta R)$ ,都有  $T_e(m) \leq T_e(n)$  成立。

(2) 任取正实数  $C$ ,假设当  $r_m > r_n > C$  时  $T_e(r_m) \leq T_e(r_n)$  成立,以下证明,在当  $r_m > r_n > (C - \Delta R) > 0$  时结论同样成立。

(3) 图 6 给出了  $r_m > r_n > (C - \Delta R)$  的情况.由观察 3 可知,  $m$  和  $n$  的目的转发区域  $SF_s(w(m))$  与  $SF_s(w(n))$  必然处于以汇聚点  $\theta$  为中心、 $C$  为半径的圆域之外。

考察图 6 中  $SF_s(w(m))$  与  $SF_s(w(n))$  两个鱼形区,它们有相同的径向宽度  $(Rc - \Delta R)$ 。用以  $\theta$  为中心、 $[y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_q]$  (记为  $[y]$ ) 为半径的一族圆  $C_m([y])$  和以  $([y] + r_n - r_m)$  为半径的一族圆  $C_n([y])$  对  $SF_s(w(m))$  和  $SF_s(w(n))$  进行等距切分,径向宽度记为  $\Delta d$ ,由此得到两组弧段  $X_m([y])$  和  $X_n([y])$ ,两组弧段一一对应.考察对应弧段  $X_m(y_k)$  与  $X_n(y_k)$ ,其面积记为  $S(X_m(y_k))$  和  $S(X_n(y_k))$ ,弧长记为  $A(X_m(y_k))$  和  $A(X_n(y_k))$ ,如图 7 所示。

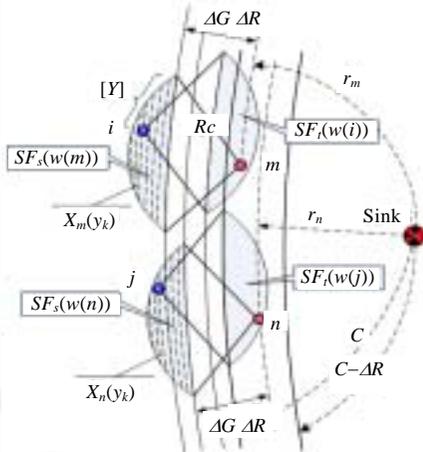


Fig.6 Effective traffic load comparison of inner and outer nodes under FGS model  
图 6 FGS 模型下,内、外节点的有效通信负载对比

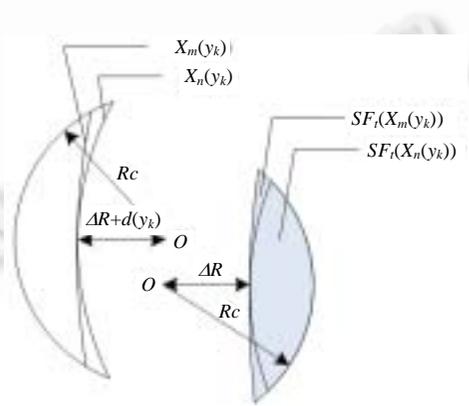


Fig.7 Contrast of arcs' lengths of  $X_m(y_k), X_n(y_k)$  and areas of  $SF_f(X_m(y_k)), SF_f(X_n(y_k))$   
图 7 两组弧段  $X_m(y_k), X_n(y_k)$  的尺寸及区域  $SF_f(X_m(y_k)), SF_f(X_n(y_k))$  的面积对比

类似定理 1 中的分析,FGS 模型仍然有公式(9)成立,只是  $T_e(X_j(y_k)), S(X_j(y_k))$  和  $SF_f(y) (y \in S(X_j(y_k)))$  对于  $m$  和  $n$  来说都不相同.图 7 左侧给出弧段  $X_m(y_k)$  与  $X_n(y_k)$  的弧长关系,由  $r_m > r_n$  可知,  $A(X_n(y_k)) \geq A(X_m(y_k))$ 。

因为  $\lim_{\Delta d \rightarrow 0} \frac{S(X_j(y_k))}{A(X_j(y_k)) \cdot \Delta d} = 1 (j = m, n)$ ,所以当  $\Delta d \rightarrow 0$  时,有  $S(X_n(y_k)) \geq S(X_m(y_k))$ 。

如图 6 所示,任取  $X_m(y_k)$  与  $X_n(y_k)$  内节点  $i$  和  $j$ , 两节点转发目的区域具有相同的径向距离  $(R_c - \Delta R)$ . 同样因为由不同半径的圆切割, 所以其面积存在差异. 图 7 右侧给出了两个区域的重叠关系, 有  $SF_s(w(i)) \geq SF_s(w(j))$ .

再由  $SF_s(w(m))$  与  $SF_s(w(n))$  处于半径为  $C$  的圆域之外, 故  $X_m(y_k)$  与  $X_n(y_k)$  也处于半径为  $C$  的圆域之外. 根据(2)中假设, 有  $T_e(X_m(y_k)) \leq T_e(X_n(y_k))$ .

将上面 3 个结论代入公式(9)可知, 对任意  $y_k$ , 始终有  $\tilde{T}_f(m, y_k) \geq \tilde{T}_f(n, y_k)$ , 其中,  $\tilde{T}_f(m, y_k)$  为  $X_m(y_k)$  的转发负载. 由  $\Sigma$  内  $\tilde{T}_f(m, y_k)$  始终非负, 故求和后仍有  $\tilde{T}_f(m) \geq \tilde{T}_f(n)$ . 由此证明  $m, n$  在  $C - \Delta R$  外结论仍然成立.

综合(1)~(3)以及  $C$  取值的任意性(并不局限于  $\Delta R$  的倍数)和  $\Delta R \neq 0$  可知, 定理在整个网络部属区域内都成立.

### 3.5 网络真实负载和通信效率分析

考察节点  $i$ ,  $i$  要将有效负载  $T_e(i)$  发送给其转发目的集  $F_i(i)$ . 根据 A.6,  $i$  将负载等概率发送给  $F_i(i)$  中任何一个节点. 由于通过渡带带的存在,  $F_i(i)$  中的节点以一定的概率接收  $i$  发送来的负载. 对任意  $j \in F_i(i)$ , 定义  $Z(i, j)$  为节点  $i$  转发数据给  $j$  的平均发送次数, 则有节点  $i$  将  $T_e(i)$  全部发送到  $F_i(i)$  的流量为

$$T_r(i) = T_e(i) \cdot \sum_{j \in F_i(i)} P(j|i) \cdot Z(i, j) \tag{10}$$

其中,  $P(j|i)$  表示  $i$  节点选择  $j$  节点转发的概率. 根据 A.6 中无状态随机转发策略,  $P(j|i)$  满足公式(5). 定义测度  $P(y|i)$  如下(其中  $y \in SF_i(w(i))$ ,  $O(y)$  为  $y$  的  $\epsilon$  邻域):

$$P(y|i) = \begin{cases} \frac{1}{SF_i(w(i)) \cdot \xi}, & \exists j, j \in F_i(i) \text{ and } j \in O(y) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

由此为公式(10)在测度  $P(y|i)$  下定义积分, 后面的讨论直接在区域  $SF_i(w(i))$  上进行,

$$\tilde{T}_r(i) = T_e(i) \cdot \iint_{SF_i(w(i))} Z(i, y) dP(y|i) \tag{11}$$

补充定义  $Z(i, y)$  为: 假设  $y$  的邻域有节点, 则  $i$  发送到节点的平均次数为  $Z(i, y)$ . 对任取点  $y \in SF_i(w(i))$ , 定义  $d(i, y)$  为节点到  $y$  点的距离. 定义  $PRR_0$  为有效通信距离  $R_c$  对应的包接收率, 如图 8 所示, 包接收率低于  $PRR_0$  的节点排除在转发集外. 由第 3.2 节可知,

$$P_{RR}(i, y) = \min \left( \frac{d_0 + D_i - d(i, y)}{D_i} u((1 - PRR_0) \cdot D_i + d_0 - d(i, y)), 1 \right) \tag{12}$$

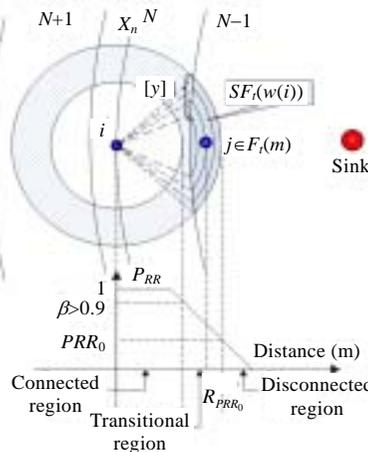


Fig.8 Relationship between  $P_{RR}$  and distance of communication under HBS model

图 8 HBS 模型下,  $P_{RR}$  与通信距离的关系

根据 A.7 定义的无限 ACK 重传策略,  $i$  若要成功发送一个数据包到  $y$  的邻域内, 需要发送  $n$  次的概率符合几何分布  $(1-p)^{(n-1)}p$ , 平均发送次数为几何分布期望值  $1/p$ , 即  $Z(i, y) = 1/P_{RR}(i, y)$ . 包接收率  $P_{RR}$  也包含 ACK 的成功接收概率, 即为数据包与 ACK 接收成功率之积. 如图 8 所示, 使用一族以  $w(i)$  为圆心、 $[y]$  为半径的圆等距切分  $S_{F_i}(w(i))$ , 得到一组弧段  $X_i([y])$ , 所有参数定义见第 3.4 节. 当  $\Delta d \rightarrow 0$  时, 考察任意弧段内的节点  $m, n, i$  传送给它们的成功概率相等, 即有  $Z(i, m) = Z(i, n)$ . 当  $[y]$  无限细分时, 公式(11)可表示为如下积分形式 ( $y_k$  弧段上任意一点的  $P_{RR}$  值相同, 故用  $P_{RR}(i, y_k)$  记为  $y_k$  内的转发概率):

$$T_r(i) = \frac{T_c(i)}{S(F_i(i))} \cdot \lim_{\Delta d \rightarrow 0} \sum_{[y]} \frac{1}{P_{RR}(i, y_k)} \int dy \quad (13)$$

其中, 积分  $\int_{X_j(y_k)} dy$  是弧段  $X_j(y_k)$  的面积. 后续仿真使用该公式计算真实负载, HBS 模型同上.

## 4 数据流分布与通信效率仿真

### 4.1 仿真配置

为了更清晰地看到两种模型下, 网络中不同位置节点的数据流分布以及网络的通信效率, 下面针对特定的网络配置进行仿真分析, 基本参数配置见表 1. 源生负载发生速率设定为单位面积每秒产生的包数, 故无须配置密度参数. 由此全网每秒产生的负载量  $T_c(\mathcal{Q}) = \pi R^2 \cdot \lambda \cdot L_f = 28.26 \text{ kbps}$ , 小于信道带宽, 满足轻负载假设.

Table 1 Simulation configuration

表 1 仿真配置

Parameters' type	Value
Radius of network domain, $R$	0~150m
Radio range, $R_c$	30m
Transitional region width, $D_t$	10m
Data generating mean rate, $\lambda$	0.001 packet/s/m <sup>2</sup>
Frame length, $L_f$	50bytes (400bits)
Bandwidth of radio transceiver, $W$	250kbps
Minimum packet receive rate of effective radio range, $PRR_0$	0.1
Forwarding gradient threshold, $G_t$	0.7

### 4.2 数据流分布特征的分析与比较

图 9 反映了在 HBS 模型和 FGS 模型下, 当网络达到稳定时, 整个网络区域中有效负载的分布情况. 从图中可以看出, HBS 模型下的负载分布在同层节点内存在内疏外密的不均衡特性, 不仅验证了定理 1 中证明的结论, 而且层内不均衡程度相当大, 几乎打破了我们一直认为的靠近汇聚点的节点先死亡的定律. 相比之下, FGS 模型下的负载分布反映了越靠近汇聚点的节点, 其有效负载量越高的规律.

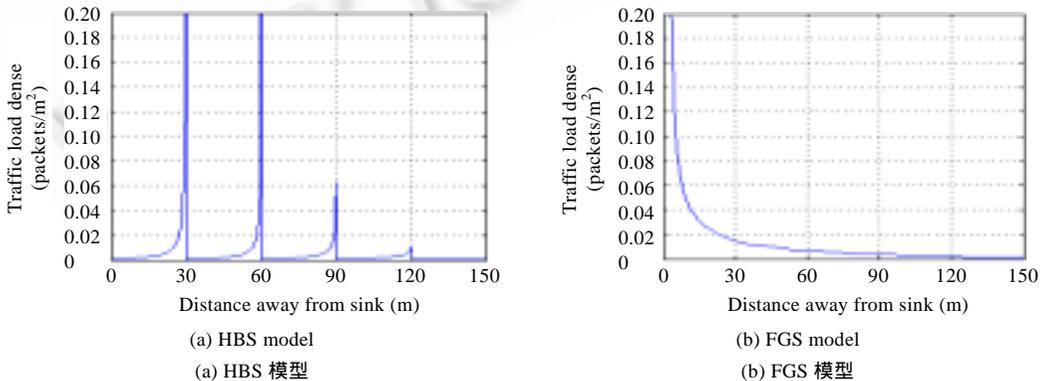


Fig.9 Effective traffic load distribution of network under two models: HBS and FGS

图 9 HBS 和 FGS 两种模型下, 网络的有效通信负载分布状况

HBS 模型的真实负载分布的层内不均衡性比有效负载要大(限于篇幅,不再赘述).这种结果可以通过直观的方法解释:对于某层次的外边界节点  $i$ ,其  $F_r(i)$  只可能处在其转发层次的外边界,而相邻层间外边界节点之间的距离远,成功率低,进一步加大了节点的真实负载量.内边界节点可以选择距离较近的转发节点,故真实负载量增加不大.FGS 的真实负载分布规律基本符合靠近汇聚点的节点负载量大的规律.

### 4.3 网络通信效率的分析与比较

第 3 节中讨论了负载在网络区域内的分布特征,即负载分布密度.通过对源生负载和真实负载的分布密度进行积分,得到整个网络的源生和真实负载,进而通过公式(2)计算网络的通信效率.

#### 4.3.1 两种模型下,网络有效负载对比

HBS 模型下的有效负载流量与网络的层数、有效通信半径  $R_c$  以及  $PRR_0$  相关;FGS 模型下的有效负载除了上述因素以外,还与梯度门限  $G_r$  相关.图 10 显示了  $G_r$  从 0.1 到 0.9,FGS 模型的有效通信负载.虚线是 HBS 模型的有效通信负载.由图可见,FGS 模型的有效通信负载始终比 HBS 模型要高,其原因在于 HBS 模型下的数据汇聚梯度差始终为 1,而 FGS 模型下的汇聚梯度差则在  $G_r$  与 1 之间,故包的平均转发次数大.讨论有效负载的目的是网络的真实负载值与有效负载直接相关,通过有效负载量可以解释通信效率规律.

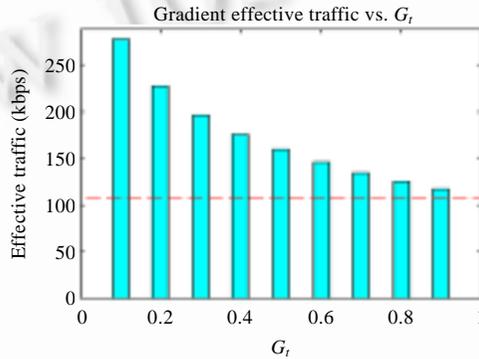


Fig.10 Relationship between effective traffic load and gradient threshold  $G_r$  under FGS model

图 10 FGS 模型下,有效通信负载与梯度门限  $G_r$  的关系

#### 4.3.2 无线通信过渡区宽度对网络通信效率的影响

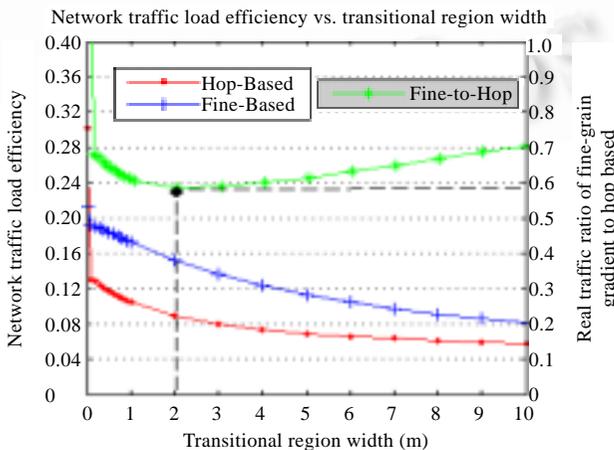


Fig.11 Relationship between communication efficiency of network and transitional region width  $D_r$

图 11 网络通信效率与过渡带宽度  $D_r$  的关系

文献[11]指出,无线链路过渡带与信道衰减指数、接收机灵敏度、包长等因素有关.鉴于此,链路过渡带的宽度将影响两种模型的网络通信效率.通过配置不同的过渡带宽度,得到通信效率与过渡带宽度之间的关系如图 11 所示.为了更清楚地比较两种模型下网络的通信效率,“- \* -”线型反映 FGS 与 HBS 模型真实负载的比值(即通信效率比值的倒数,参考右侧坐标).由图中可以看出以下几点规律:

- (1) 随着过渡带宽度的增加,两种模型的通信效率都会降低,其主要原因在于过渡带变宽后,转发目的集中传输效率差的节点比例上升.
- (2) 在第 4.1 节中的配置参数条件下(除了  $G_r$  以外),FGS 的网络通信效率始终高于

HBS 模型.两种模型的源生负载相同,差别仅在于真实负载量.HBS 模型下外边界节点的转发链路质量都很差,故真实负载始终较高.FGS 通过设置合适的梯度门限,使每个节点都有适度的链路质量好的节点存在,从而降低了网络的真实负载.

(3) 随着过渡带宽度从 0 变化到 10,FGS 与 HBS 模型的真实负载比呈现先减小后增大的趋势.

4.3.3 FGS 模型下的梯度门限对其网络通信效率的影响

FGS 模型的一个重要参数是梯度门限  $G_t$ ,当  $G_t$  由 0 到 0.9 变化时,FGS 模型的通信效率如图 12 所示,HBS 的通信效率与  $G_t$  无关.“- \* -”线型反映 FGS 与 HBS 模型真实通信负载的比值.仿真结果如下:

(1) 随着  $G_t$  的上升,FGS 模型下的网络通信效率呈现先上升后下降的趋势,并在  $G_t$  为 0.5 左右时达到通信效率的最高值.相应地,真实负载的比值呈现先抑后扬的结果.其主要原因在于,当  $G_t$  较小时,FGS 的有效通信负载较大,故尽管 FGS 下数据包的平均转发效率高,其真实负载量仍然偏高,进而表现为网络效率偏低.随着  $G_t$  的上升,效率逐渐增加.当  $G_t$  增加到一定程度后,虽然 FGS 的有效通信负载减小,但由于转发目的集中效率差的转发节点增多,有效负载的平均发送次数上升,增大了真实通信负载量,降低了网络通信效率.

(2) FGS 的真实通信负载基本上比 HBS 模型要小.主要原因在于第 4.1 节中定义的  $PRR_0$  值较小,为 0.1,导致 HBS 模型下同层外边界节点的转发效率极低,平均转发次数达到 10 次.根据第 4.2 节中的结论,HBS 模型的大部分有效负载集中在层次外边界上,这使得大部分负载的转发效率都很低.所以,尽管 HBS 模型的有效转发负载比 FGS 要小,但其真实负载明显大于 FGS 模型.

4.3.4  $PRR_0$  对网络通信效率的影响

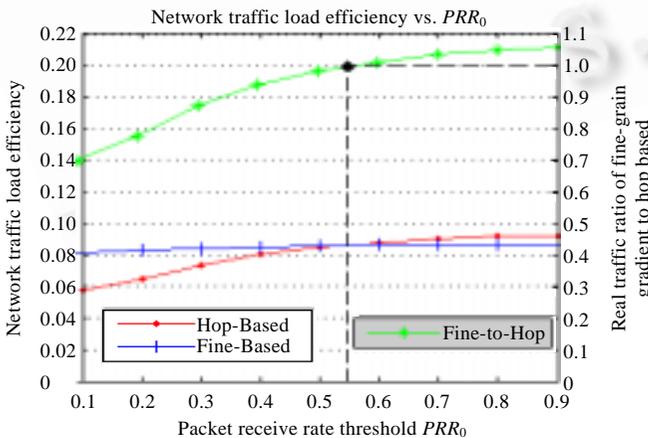


Fig.13 Relationship between communication efficiency of network and  $PRR_0$  under FGS model

图 13 FGS 模型下,网络通信效率与  $PRR_0$  之间的关系

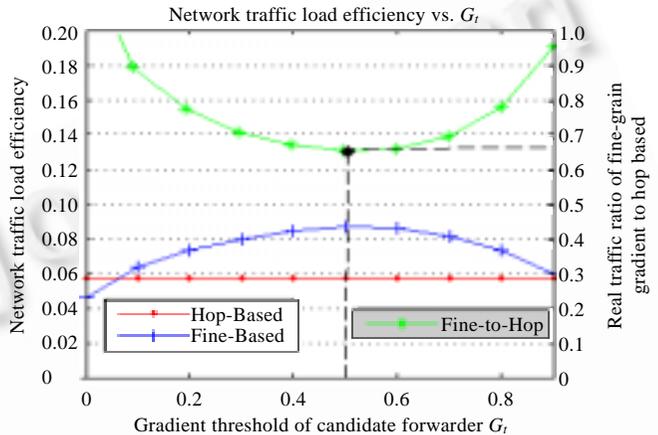


Fig.12 Relationship between communication efficiency of network and gradient threshold  $G_t$  under FGS model

图 12 FGS 模型下,网络通信效率与梯度门限  $G_t$  的关系

在梯度建立的时候,如果节点利用接收“梯度建立包”时的链路质量来选择自身跳数,则建立起来的梯度层次将与  $PRR_0$  相关.梯度层次的宽度不再是通信半径  $R_c$ ,而是包接收率为  $PRR_0$  时所对应的通信半径  $R_{PRR_0}$  (参见图 8).在仿真中,通过设定不同的  $PRR_0$ ,可以得到在引入链路质量参数时两种模型的通信效率的变化情况.图 13 给出了当  $PRR_0$  由 0.1 到 0.9 变化时,两种模型下网络的通信效率的仿真结果.“- \* -”线型给出了 FGS 与 HBS 模型真实负载的比值.图 13 反映如下结论:

(1) FGS 模型的通信效率随着  $PRR_0$  的增加呈现上升趋势. $PRR_0$  增加以后,FGS 模型下节点到其转发目的集中的节点的梯度

差可能超过 1,这实际上变相调节了梯度门限  $G_r$ ,根据第 4.3.3 节中的结论,效率在  $G_r$  为 0.5 左右达到最大,而本实验调节  $PRR_0$  的效果恰好使  $G_r$  处在这个范围内。

(2) HBS 模型的通信效率也持续提高,且在  $PRR_0$  为 0.3 时出现较大的上升速率。 $PRR_0$  的提高对 HBS 的最大影响是增大了外边界节点的转发目的集尺寸,且新增节点链路质量大都较好,从而导致 HBS 模型的效率有一个很大的飞跃。当  $PRR_0$  继续增加时,质量好的节点比例增大,效率继续提高。但  $PRR_0$  增加的同时减小了跳带宽度,增加了节点平均跳数、有效负载和真实负载,从而抑制了效率的进一步提高。

(3) FGS 的真实负载在  $PRR_0$  为 0.55 附近时超过 HBS 模型。但可以看到,即使  $PRR_0$  调整到 0.9,FGS 的真实负载量也不会超过 HBS 模型的 10%。注意,实验使用的梯度门限(0.7)并不是最优的。

$PRR_0$  策略的引入,增加了维护协议的复杂度。本文的分析并未考虑维护协议开销,故在实际应用中,协议维护对网络效率的影响如何,需要通过实验来评定。

## 5 扩展讨论

FGS 模型实质上为网络提供了一维准地理信息,比依据跳数的通信距离有更高的精度。这种精细的“通信”距离给数据转发策略提供了更好的转发依据。在 HBS 模型中,内、外边界节点的目的转发集尺寸相差很远,导致带内负载的不均衡;而在 FGS 模型中,所有节点的转发目的集中节点数几乎一样,使得在网络中大部分区域,节点都有数量相近的备选节点均衡自己的负载。与很多文献中节点通过其上层节点的子节点个数选择父节点来实现负载均衡相比,FGS 的这种均衡能力是与生俱来的。

除了通过  $G_r$  选择转发目的集节点以外,FGS 模型还可以通过门限区间选择转发节点。通过选择  $G_1 \sim G_2$  之间的节点组成转发目的集,可以提高转发目的集中高链路质量节点的比例。同时,通过引入邻居节点的转发成功率的统计,自适应地调节转发节点的选择概率,可以进一步提高 FGS 模型下每个节点的整体转发效率。另外,FGS 模型还可以提高洪泛算法的效率:通过设定洪泛梯度门限指定参与洪泛的节点,从而有效减少洪泛过程中的数据包转发次数,提高效率。这些都是 HBS 模型所无法做到的。

## 6 结束语

本文提出在基于跳数平均的精细化梯度模型下进行数据汇聚的思想,并通过静态数据流分析方法比较了跳数模型和精细化梯度模型在网络数据负载流分布以及网络通信效率之间的关系。通过模型和仿真分析得到如下结论:(1) 在精细化梯度模型下进行数据汇聚,其协议维护的开销小,并可以消除跳数模型下汇聚存在的两个问题;(2) 跳数模型下复杂的负载分布很难通过协议消除,而精细化梯度模型下的汇聚机制使网络具有更好的负载分布特性;(3) 在通常参数配置下,精细化梯度模型具有更好的网络通信效率。后续工作将针对精细化梯度模型,一方面在汇聚策略上进行拓展,另一方面探讨节点部署密度、通信冲突对模型的影响。

## References:

- [1] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. Wireless Sensor Network. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [2] Li JZ, Li JB, Shi SF. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. Journal of Software, 2003,14(10):1717-1727 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>
- [3] <http://www.wsn.org.cn/>
- [4] Lee JJ, Krishnamachari B, Kuo CCJ. Impact of energy depletion and reliability on wireless sensor network connectivity. In: Raghuvver MR, Sohail AD, Michael DZ, eds. Proc. of the SPIE DSS 2004. SPIE 5440, 2004. 169-180.
- [5] Tian L, Xie DL, Han B, Zhang L, Cheng SD. Study on bottleneck nodes in wireless sensor networks. Journal of Software, 2006, 17(4):830-837 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/830.htm>
- [6] Luo J, Hubaux JP. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. In: Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE Communications Societies. Seattle: IEEE CS Press, 2005. 819-830.

- [7] Mo C, Mark LF. The importance of data compression for energy efficiency in sensor networks. In: Proc. of the 2003 Conf. on Information Sciences and Systems. The Johns Hopkins University, 2003.
- [8] Qing L, Zhu QX, Wang MW. A distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. Journal of Software, 2006,17(3):481-489 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/481.htm>
- [9] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670.
- [10] Ganesan D, Krishnamachari B, Woo A, Culler D, Estrin D, Wicker S. Complex behavior at scale: An experimental study of lowpower wireless sensor networks. Technology Report, CSD-TR 02-0013, UCLA, 2002.
- [11] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: Proc. of the IEEE SECON. Santa Clara: IEEE Communications Society, 2004. 517-526.
- [12] Seada K, Zuniga M, Helmy A, Krishnamachari B. Energy-Efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2004. 108-121.
- [13] Cao Q, He T, Fang L, Abdelzaher TF, Stankovic JA, Son S. Efficiency centric communication model for wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Barcelona: IEEE Computer Society Press, 2006. 1-12.
- [14] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Boston: ACM Press, 2000. 56-67.
- [15] Ye F, Chen A, Liu SW, Zhang L. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. Arizona: IEEE Communications Society, 2001. 304-309.
- [16] Pottie GJ, Kaiser WJ. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, 2000,43(5):51-58.
- [17] Woo A, Tong T, Culler D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In: Proc. of the Conf. on Embedded Networked Sensor Systems of the ACM. New York: ACM Press, 2003. 14-27.
- [18] de Couto DJS, Aguayo D, Bicket J, Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In: Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. San Diego: ACM Press, 2003. 134-146.

#### 附中文参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络.北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展.软件学报,2003,14(10):1717-1727. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>
- [5] 田乐,谢东亮,韩冰,张雷,程时端.无线传感器网络中瓶颈节点的研究.软件学报,2006,17(4):830-837. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/830.htm>
- [8] 卿利,朱清新,王明文.异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法.软件学报,2006,17(3):481-489. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/481.htm>



朱红松(1973 - ),男,黑龙江黑河人,博士生,高级工程师,CCF 学生会员,主要研究领域为分布式系统与网络,无线传感器网络.



徐勇军(1979 - ),男,博士,助理研究员,CCF 会员,主要研究领域为低功耗设计, VLSI/SoC 测试与验证,无线传感器网络.



孙利民(1966 - ),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线通信与自组织网络,无线传感器网络.



李晓维(1964 - ),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为 IC 测试, VLSI/SoC 测试与验证,嵌入式系统.