

无线传感器网络中瓶颈节点的研究^{*}

田乐⁺, 谢东亮, 韩冰, 张雷, 程时端

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

Study on Bottleneck Nodes in Wireless Sensor Networks

TIAN Le⁺, XIE Dong-Liang, HAN Bing, ZHANG Lei, CHENG Shi-Duan

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Post & Telecommunications, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62245547, E-mail: tlwhx@126.com, <http://bnrc.cs.bupt.cn>

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. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/830.htm>

Abstract: “Bottleneck Nodes” are those connecting two or more areas alone with the reason of the deployment. Compared to other nodes, this kind of nodes are more important to the lifetime of the whole network. How to find these nodes is a problem about how to find the minimum cut set in graph theory, and is difficult to implement in a distributed way. In this paper, a new kind of nodes named “quasi-Bottleneck Nodes” which have similar effect on the performance of the wireless sensor network and can be found out much more easily is introduced. Theoretical analysis and extensive simulation show that “quasi-Bottleneck Nodes” have a significant impact on the performance of the whole network (including the speed of energy consumption and packet lost ratio), and a distributed algorithm to find out all the “quasi-Bottleneck Nodes” and two effective solutions to eliminate the bad effect of these nodes are presented.

Key words: network lifetime; quasi-bottleneck node; energy consumption

摘要: 无线传感器网络中的“瓶颈节点”是指那些由于随机部署的原因而不得不成为连接两个或多个区域的孤立的节点。相对于其他节点,这类节点对网络的生存期有着更大的影响。如何找出这些“瓶颈节点”在图中是一个找到最小割集的问题。基于实际部署的可行性,提出了一个新的“准瓶颈节点”的概念,它对网络具有与“瓶颈节点”类似的影响,但是可以很容易地通过分布式算法找出来。通过分析和仿真,证明了“准瓶颈节点”对网络行为(包括能量消耗速率、丢包率)的巨大影响。最后,提出了一种分布式算法来发现这些节点,并提出了两种有效的解决思路来减小它们的不利影响。

关键词: 网络生存期;准瓶颈节点;能量消耗

中图分类号: TP393 文献标识码: A

^{*} Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.90204003, 60402012 (国家自然科学基金); the Collaborative Construction Program of Beijing Municipal Commission of China under Grant No.XK100130438 (北京市重点学科资助项目); the Nokia (China) Research Center (诺基亚中国研究中心资助项目)

Received 2005-07-07 Accepted: 2005-11-08

随着微电子技术、计算技术和无线通信技术的快速发展,无线传感器网络作为沟通客观物理世界和人类感知世界的桥梁而引起了人们广泛的关注.这种网络由一些微小的、智能化的传感器节点组成^[1,2].一般情况下,这种网络采取随机部署的形式,以自组织的方式工作.

绝大多数应用中,网络中的节点是由不可再生的电池供电的,无线传感器网络的首要性能指标是它的工作寿命.而其工作寿命由节点的能量供应水平和消耗能量的速度共同决定.如果由于一些节点消耗完能量后不能工作,因而造成基站(或者用户)不能够得到目标区域的数据,我们就说这个网络已经死亡,并且它的死亡是由那些消耗完能量的节点决定的,那些节点的寿命就是整个网络的寿命.人们定义了不同的方法来衡量网络的寿命:FND,LND 和 HND,分别表示第一个节点死亡的时间、最后一个节点死亡的时间和一半节点死亡的时间.

实际上,在一个随机部署的无线传感器网络中,由于部署的原因,一般存在一些连接两片区域的孤立的节点.这些节点独自转发两个区域之间的数据流,并且没有邻居节点的支援.如果这些节点死亡,就会造成整个网络的割裂.当基站和目标区域正好处于被割裂的不同区域内时,就会使基站再也不能接收到来自目标区域的任何信息,因而造成网络的死亡.我们称这些节点为“瓶颈节点”.如果网络生存期定义为可正常接收到来自目标区域的数据的时间,那么这些节点的寿命就决定了整个网络的生存期.

因此,“瓶颈节点”可以定义为:在一个随机部署的无线传感器网络中,那些由于它们的死亡而造成整个网络被割裂成两个或多个不相连的区域,并且由于收集数据的基站和监测目标不在同一个区域中,从而造成整个网络生存期结束的最少数目的节点.

如图 1 所示,如果基站位于区域 1,而被监测的目标位于区域 2 或者区域 3,则那些被椭圆包围起来的节点就是瓶颈节点.如果它们死亡,整个网络将会被分割成 3 个不相连的部分,网络的寿命也就此终结.

因此,如何在网络中找到这些节点并延长它们的寿命,对延长整个网络的寿命有着重大的帮助.如何找到“瓶颈节点”,在图论中是一个如何找到最小割集的问题.如果基站或者网络中的任何一个节点可以得到整个网络的拓扑信息,那么它可以用 Karger 和 Stein 提出的 MINCUT 算法来找出“瓶颈节点”.但在一个实际部署的网络中,由于网络资源的紧缺,得到整个网络的拓扑信息是一项非常困难、开销巨大甚至不可能的任务.

通过大量的仿真和观察,我们发现这些“瓶颈节点”有一些共同的特点.针对这些特点,本文提出一种新的算法来找出“瓶颈节点”,这种算法具有简单、分布式、可扩展的特点,不需要获得整个网络的拓扑信息.通过这种算法找出的节点我们称其为“准瓶颈节点”.像“瓶颈节点”一样,它们具有对网络类似的影响.本文的主要工作包括:

1) 提出了一种新类型的节点——“准瓶颈节点”,并通过数学分析和仿真证明了这类节点对网络性能的不利影响.

2) 给出了发现“准瓶颈节点”的分布式算法,并提出两种思路来减小这类节点对网络的影响.

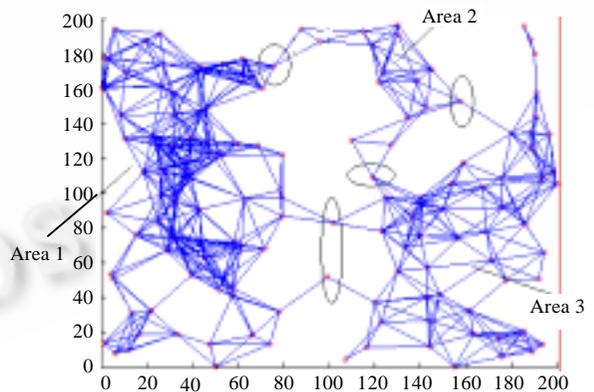


Fig.1 A topology with bottleneck nodes

图 1 一个包含瓶颈节点的拓扑

1 “准瓶颈节点”及其影响

本节首先给出“准瓶颈节点”的定义,然后分析一个节点成为“准瓶颈节点”的概率,最后给出节点对网络影响的仿真结果.从数学分析和仿真实验我们可以看出,“准瓶颈节点”对网络的性能有很大的影响.

1.1 “准瓶颈节点”的定义和概率分析

通过观察我们发现,几乎所有的“瓶颈节点”都有一个共同特点,那就是它们的邻居节点可以分为多个不相连的节点集,当这些不同节点集中的节点需要互相通信时,只能通过该“瓶颈节点”的中继.因此,本文根据这个特点去寻找这类和“瓶颈节点”类似的节点,并称其为“准瓶颈节点”.

假设传感器网络由相同的节点组成,这些节点具有相同的传输半径、相同的运算能力和相同的能量供应水平.另外,假设两个节点,当它们互相位于对方的传输半径之内时,它们就可以建立一条直接互连的链路.

定义 1. 设节点的传输半径为 R ,则一个节点的邻居集是指那些在二维平面上与该节点的距离小于 R 的所有节点的集合.

对节点 O 来说,若用 $Nr(O)$ 表示它的邻居集,则

$$Nr(O) = \{u \mid \text{distance}(u, O) < R\}.$$

定义 2. 一个节点是“准瓶颈节点”,当且仅当这个节点的邻居集可以划分成两个或者多个不相交的非空集合,并且任一集合中的任一节点不属于其他集合中的任一节点的邻居集.

现在我们来分析一个节点成为“准瓶颈节点”的概率.首先假设网络的部署是随机的,节点的密度服从均匀分布,则有如下引理.

引理 1. 设节点 O 有 N 个邻居,则该节点成为“准瓶颈节点”的概率 p^{qBN} 为

$$p^{qBN} = \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \binom{N}{n} \left(1 - \frac{\bigcup_{i=1}^n A_i}{A} \right)^{N-n} \left(\frac{\bigcup_{i=1}^n A_i}{A} \right)^n \right\} \quad (1)$$

其中, A 表示节点 O 的覆盖区域, A_i 表示 O 的第 i 个邻居所覆盖的区域和 A 的交集.

证明:因为节点的部署相互独立并且服从均匀分布,不失一般性,我们假设从第 1 个节点到第 i 个节点属于集合 S_1 ,从第 $i+1$ 到第 N 个节点属于集合 S_2 ,则集合 S_1 中节点的覆盖区域和 A 的交为 $A^{region1} = \bigcup_1^n A_i$,集合 S_2 中

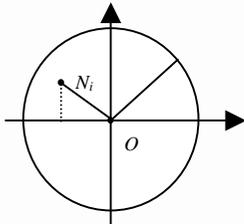


Fig.2 N_i , a neighbor of node O
图 2 节点 O 的一个邻居 N_i

节点的覆盖区域为 $A^{region2} = A - \bigcup_1^n A_i$,根据二项式分布的规律,我们可以得到公式(1).

为了进一步推导出 p^{qBN} 表达式,我们先得出下述引理.

引理 2. 如图 2 所示,节点 N_i 为节点 O 的邻居,在一个以 O 为原点的随机选取的坐标系中, N_i 的 X 轴上的坐标 $x < r$ 的概率为

$$p_r = p\{x < r\} = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{r}{R} + \frac{r\sqrt{R^2 - r^2}}{\pi R^2} \quad (-R < r < R) \quad (2)$$

证明:如图 3 所示,若节点 N_i 的 X 坐标小于 r ,则它必须位于用斜线表示的区域 A_s 内,所以 $x < r$ 的概率为 A_s/A , A_s 的面积为 $A_s = \pi R^2 - R^2 \arccos \frac{r}{R} + r\sqrt{R^2 - r^2}$,所以, $x < r$ 的概率为

$$p_r = p\{x < r\} = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{r}{R} + \frac{r\sqrt{R^2 - r^2}}{\pi R^2} \quad (-R < r < R), \text{结果得证.}$$

定义 3. 若用 P_1 表示集合 S_1 在 X 轴上的投影的点集合,用 P_2 表示 S_2 在 X 轴上的投影的点集合.那么, P_1 和 P_2 的距离为 $|x_{p_1} - x_{p_2}|$.其中, x_{p_1} 表示 P_1 中离原点 O 最近的点的 X 坐标, x_{p_2} 表示 P_2 中离原点 O 最近的点的 X 坐标.

引理 3. 对于一个给定的 $r(-R < r < R)$,点集合 P_1 和 P_2 的距离大于 R 的概率

$$p_b = (p_1 + p_2)^N - p_1^N - p_2^N \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} p_1 = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{r}{R} - \frac{r}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - r^2} \\ p_2 = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{R-r}{R} - \frac{R-r}{\pi R^2} \sqrt{2Rr - r^2} \end{cases} \quad 0 < r < R, \quad \begin{cases} p_1 = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{-r}{R} + \frac{r}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - r^2} \\ p_2 = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{R+r}{R} - \frac{R+r}{\pi R^2} \sqrt{2Rr - r^2} \end{cases} \quad -R < r < 0.$$

证明:我们只给出 $0 < r < R$ 时的证明, $-R < r < 0$ 的证明与其类似.如图 4 所示,为了保证 P_1 和 P_2 的距离大于 R ,

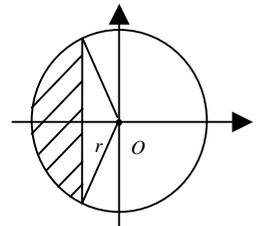


Fig.3 The probability of $x < r$
图 3 $x < r$ 的概率

集合 S_1 中的节点需位于区域 A_1 , S_2 中的节点位于区域 A_2 . A_1 的面积为 $R^2 \arccos \frac{r}{R} - r\sqrt{R^2 - r^2}$, A_2 的面积为 $R^2 \arccos \frac{R-r}{R} - (R-r)\sqrt{2Rr - r^2}$. 由于节点服从均匀分布, 所以一个节点位于 A_1 的概率 $p_1=A_1/A$, 位于 A_2 的概率 $p^2=A_2/A$. 又因为节点的分布是相互独立的, 所以给定 N 个节点, 节点分别位于区域 A_1 和 A_2 的概率为

$$p_b = \sum_{n=1}^{N-1} \binom{N}{n} p_1^n p_2^{N-n} = (p_1 + p_2)^N - p_1^N - p_2^N.$$

定理 1. 当 $N \rightarrow \infty$ 时,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E(p^{q_{BN}}) = 2\pi \int_{-R}^R p_b dp_r \tag{4}$$

证明: 在图 5 中, 由于坐标系方向的选择是随机的, 所以坐标系的方向在 $(0, 2\pi)$ 服从均匀分布. 因此, 在二维平面中, 两集间距离大于 R 的概率为 $2\pi p_b$.

当 N 趋于无穷时, 两条虚线上的节点也将趋于无穷. 因此, 区域 A_1 趋于 A'_1 , A_2 趋于 A'_2 . 由公式(2)和公式(3), 我们可以得到公式(4), 定理 1 得证.

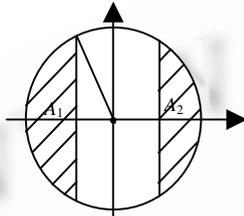


Fig.4 Probability of the distance between two sets is greater than R

图 4 两集合距离大于 R 的概率

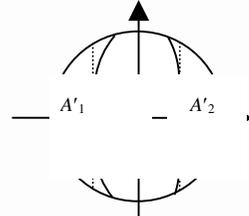


Fig.5 Probability of the distance between two sets is greater than R when $N \rightarrow \infty$

图 5 $N \rightarrow \infty$ 时两集合距离大于 R 的概率

图 6 是一个节点为“准瓶颈节点”的概率曲线. 从图中可以看出, 即使一个节点有 10 个左右的邻居, 它仍有很大的可能成为一个“准瓶颈节点”. 因此, 研究“准瓶颈节点”对网络的影响是值得的.

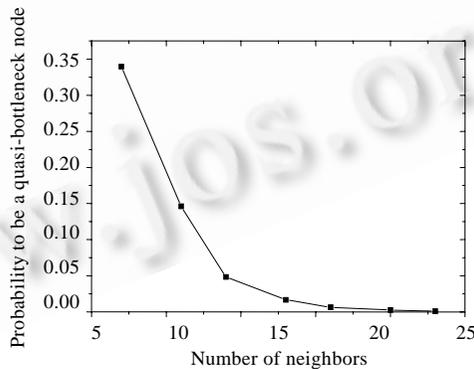


Fig.6 Probability to be a quasi-bottleneck node

图 6 节点成为准瓶颈节点的概率曲线

1.2 “准瓶颈节点”对网络的影响

本节将给出“准瓶颈节点”对网络影响的仿真结果. 仿真器为广泛使用的 ns-2, 对比对象包括“准瓶颈节点”、一般转发节点和基站的邻居节点. 通过仿真我们将看到: “准瓶颈节点”具有比其他节点更快的能量消耗速度.

仿真时, 假设 150 个节点随机均匀地部署在一块 $200 \times 200 \text{m}^2$ 的区域内, 每个节点的传输半径为 30m. 假设基站位于网络的右上角, 而源节点位于网络中心 $20 \times 20 \text{m}^2$ 的区域内. 节点具有与文献[3]中相同的能量消耗模型: 接

收一个字节消耗 400μJ,发送一个字节消耗 720μJ.为了快速得到结果并且不影响仿真的分析,节点的初始能量设置为 5.4J.

选择合适的网络层协议对仿真有着重大的影响.在仿真中,我们选择了一个简化了的定向扩散协议^[4].节点的梯度由节点到基站的跳数来决定.每个中间转发节点维护一个梯度表,存储着梯度比它小的所有邻居节点的信息.通过随机选择上游节点,可以使转发节点尽量在网络中分摊能量消耗,防止一个特定的节点因为不停地转发数据而消耗完它的能量,从而延长网络寿命.基站维护一个定时器,每收到一个数据包,就把这个定时器复位.若定时器期满后还没有收到数据包,基站就重新发送请求,网络中的所有节点重新计算自己的梯度.在我们的仿真中,定时器设为 10s.若基站发送了几次请求后(在仿真中是 4 次)仍没有收到任何信息,我们就认为网络已经死亡.

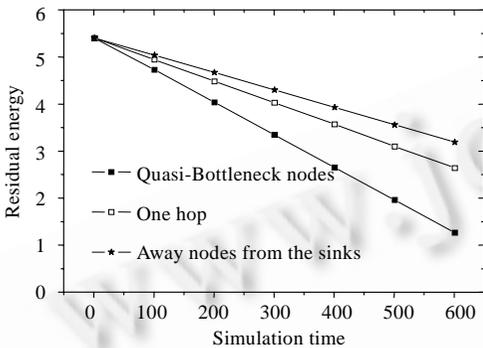


Fig.7 The speed of energy consumption
图 7 节点能量消耗速率

图 7 是得到的能量消耗速率图.从图 7 可以看出,与早期的结论^[5]不同,基站的邻居节点并不是消耗能量最快的节点,“准瓶颈节点”的能量消耗速度是基站的邻居节点的 2 倍左右,是普通转发节点的 3 倍左右.这是因为,在一个随机部署的网络中,位于源区域和基站间的“准瓶颈节点”的数目一般要少于基站的邻居节点,更少于普通的转发节点.因此,单个“准瓶颈节点”需要转发更多的数据包,从而造成了它的能量消耗数据更快.

图 8 同样说明了这个问题.图 8 表示网络死亡后 3 类节点的剩余能量水平.其中 1 代表“准瓶颈节点”;2 代表基站的邻居节点;3 代表普通转发节点.从图 9 中可以看出:当网络死亡时,“准瓶颈节点”的剩余能量为 0;而同时,基站的邻居节点和普通转发节点平均还有 1.04J 和 1.52J 左右的剩余能量.所以,通过图 8 和图 9 我们可以得出:是“准瓶颈节点”决定了网络的寿命.

图 9 是分组丢失的统计图.我们可以看出,当仿真时间 661s 第 1 个“准瓶颈节点”死亡时,有 10 个数据包丢失;然后一直到仿真时间 1 085s 第 2 个“准瓶颈节点”死亡之前,都没有分组的丢失,但是第 2 个“准瓶颈节点”的死亡又造成了另外 10 个分组的丢失.因此,“准瓶颈节点”不仅对网络的寿命有着巨大的影响,它们的生存与否对分组的正确传递也起着巨大的作用.

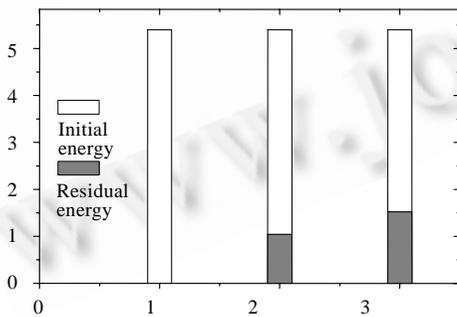


Fig.8 Residual energy
图 8 剩余能量

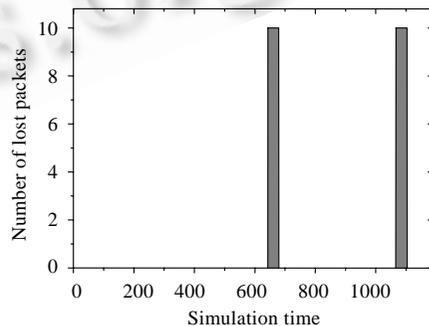


Fig.9 Number of packet lost
图 9 分组丢失数目

2 寻找“准瓶颈节点”并消除它们的不利影响

由于“准瓶颈节点”对网络的巨大影响,在本节中,我们首先提出一种分布式的算法来发现这种节点,然后提出两种思路来消除它们的不利作用.

2.1 算法的提出

现在给出我们的算法来判断某个节点是否为“准瓶颈节点”.这个算法具有分布式、易实现的特点.算法分为3个阶段:邻居发现阶段、连接信息交换阶段和自判断阶段.整个算法的描述如下:

1. 邻居发现阶段:当网络部署完毕后,每个节点通过发送“HELLO”探测包来通知获得邻居信息;
2. 连接信息交换阶段:当节点获得邻居信息后,它和自己的每个邻居交换连接信息;
3. 自判断阶段:获得邻居节点的连接信息后,每个节点现在知道自己两跳距离内的拓扑情况.这时,它就可以运行下面的算法来判断自己是否为“准瓶颈节点”.

```

Put all neighbors into set  $S_2$ ;
Choose a neighbor randomly, remove it from set  $S_2$ , put it into set  $S_1$ ;
For neighbor  $i$  in  $S_2$ 
Begin
  For neighbor  $j$  in  $S_1$ 
  Begin
    If  $i$  is  $j$ 's neighbor, then put  $i$  into set  $S_1$ ; Remove  $i$  from set  $S_2$ ;
    Else nothing happens;
  End
End
End
If ( set  $S_2$  is empty) then
  I am not a “quasi-Bottleneck Node”;
Else
  I am a “quasi-Bottleneck Node”.

```

假设每个节点的平均邻居数为 d ,则该算法的复杂度为 $O(d^3)$.

许多路由协议和分簇协议要求节点在运行路由或分簇算法时,需要知道邻居节点的详细信息^[4,6-8].因此,算法的前两个阶段所需要的“HELLO”包和连接信息包可以在路由或分簇时通过捎带的方式发送,算法的额外能量开销只集中在第3阶段的算法执行上.由于传感器节点执行指令的能耗要大大小于传输数据所需的能耗^[9],因此,算法并不会给节点带来很大的负担.

现在来考虑如何减少“准瓶颈节点”对网络的不利影响,我们提出两种思路来解决这个问题.

2.2 在“准瓶颈节点”之前完成数据聚集

既然“准瓶颈节点”的主要能量消耗是用于数据的转发,那么自然的办法就是减少该种节点转发数据的数量.要达到这个目的,数据聚集是一个可行的选择.在无线传感器网络中,数据聚集已经得到了广泛和深入的研究^[5,10],理论分析和实验都证明了它是一种可以减少网络中数据流量、延长网络寿命的有效技术.

当网络中某一个“准瓶颈节点”发现自己位于一条数据转发路径上时,它可以通过向子节点发送一个“HELLO”包来通知该子节点自己的信息.该子节点认识到它的父节点是一个“准瓶颈节点”以后,就会采用缓冲数据并聚集的方法来减轻父节点的负担,延长父节点的寿命.

不同的数据汇聚比率会不同程度地减轻“准瓶颈节点”的能量消耗,数据汇聚比率主要由传感器节点所产生数据的相关性来决定.图10是采取不同的数据汇聚比率时,“准瓶颈节点”的能量消耗速度,其中1代表不汇聚数据.可以看出:采取数据汇聚措施

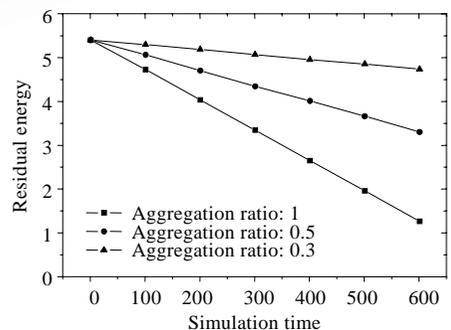


Fig.10 Energy consumption using various aggregation ratio

图10 不同数据汇聚比率时“准瓶颈节点”的能量消耗

后,“准瓶颈节点”的能量消耗速度大为降低.但是,能量消耗的降低是以时延的增加为代价的.在仿真中,我们设“准瓶颈节点”的子节点以 6s 为周期来汇聚数据,平均将会给每个数据包带来 1.5s 的额外时延.

2.3 移动一个节点到“准瓶颈节点”附近作为支援节点

“准瓶颈节点”之所以必须转发大量的数据包,是因为在它的周围没有其他节点可以分担它的负载.因此,一个很自然的想法就是:移动一个节点到它的附近,分担它的一部分工作,就可以延长这个“准瓶颈节点”的寿命.

可移动节点可以解决这个问题.Robomote^[11]就是这么一种节点.Robomote 是由南加州大学开发的一种和加州大学伯克利分校的 Mote^[2]兼容的传感器节点,使用两个直流马达达到可以移动的目的.

Wang 等人^[12]详细讨论了如何在无线传感器网络中移动一个节点的问题.通常节点有两种移动方法:直接移动和梯次移动.直接移动是当可移动节点收到移动命令后,从当前所处位置直接移动到目的区域的过程.这种

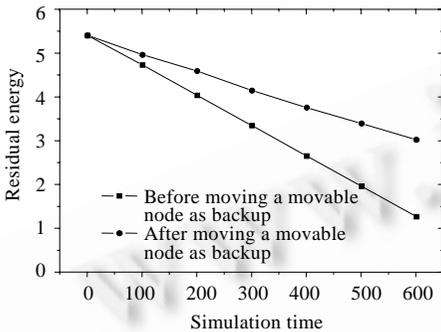


Fig.11 Energy consumption before and after moving a movable node as backup

图 11 移动一个节点前后“准瓶颈节点”的能量消耗

移动方法不需要网络中的每个节点都具有可移动性,但由于单个节点移动距离很长,会非常消耗节点的能量.而梯次移动则是在可移动节点收到移动命令后,首先获得这条移动路径上的节点信息,然后通过一定的算法得出一个最优的移动方案,最后这条路径上被选中的节点全部移动一个较短距离的过程.这种算法需要网络中的每个节点都具有可移动性,增加额外的网络成本,但由于每个节点都移动相对较短的距离,可以降低单个节点移动所需的开销.

当一个“准瓶颈节点”需要一个节点来分担自己的负担时,它可以在全网内广播一个“HELP”信息来寻求可移动节点的帮助.可移动节点的移动策略可以参考上述的两种方法,具体的实施要视网络节点的部署情况而定.某一个没有支援任务的可移动节点接收到“HELP”信息后,就会移动到该“准瓶颈节点”的周围,负担一部分该节点的工作负载.

图 11 是移动一个节点作为“准瓶颈节点”的支援节点后的能量消耗情况.可以看出,“准瓶颈节点”的能量消耗减少了 1 倍左右.理论上,移动过来 n 个支援节点以后,“准瓶颈节点”的能耗会是原来的 $1/(n+1)$.

3 相关工作

瓶颈节点在 Internet 中是一个被广泛研究的内容^[13-15],但 Internet 中的瓶颈节点是从网络带宽和服务质量的角度出发.而在无线传感器网络中,瓶颈节点更多的是指那些能量成为瓶颈的节点.

Kalpakis 等人^[3]讨论了如何延长网络寿命的算法:在一个随机部署的网络中,Kalpakis 定义网络的寿命为基站可以从网络中所有节点接收到数据的时间.但在一个实际应用中,网络中的节点大部分从事转发工作,个别节点的死亡并不能影响到基站和源节点之间数据的传输.

Lee 等人^[5]研究了不同节点在网络中不同的能量消耗速率,并且发现在一个以基站为根的数据采集树中,层次越高的节点能量消耗速率越高.但在我们的研究中,这个结论并不总是正确的,那些连接多个区域的瓶颈节点,即使在树中的层次较低,它的能量消耗速率也会很高.

4 结 论

无线传感器网络的首要考虑因素就是网络的寿命.在先期的研究工作中^[5],人们得出越靠近基站的节点能量消耗速度越快的结论.但在本文的研究中我们发现:由于网络部署的随机性,这个结论并不总是正确的.有一种节点,由于它们在部署的时候地理位置的特殊性,它们需要转发大量的数据包,具有更快、更多的能量消耗,对网络寿命有着更大的影响,它们被称为“准瓶颈节点”.本文详细分析了这种节点存在的概率,并且通过大量的仿真验证了它们对网络的影响.最后,本文给出了一种分布式的算法来找出“准瓶颈节点”,并给出了两种思路来减轻这种节点的负担,以延长网络的寿命.在后期工作中,我们将详细讨论这两种方法的实现.

References:

- [1] Shih E, Cho S, Ickes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Christopher R, Mahmoud N, Michele Z, eds. Proc. of the MobiCom 2001, TOC. New York: ACM Press, 2001. 272–287.
- [2] Hill J, Szewczyk R, Woo A, Hollar S, Culler D, Pister K. System architecture directions for networked sensors. In: DeGroot D, ed. Proc. of the SIGARCH 2000, ACM SIGARCH Computer Architecture News. New York: ACM Press, 2000. 93–104.
- [3] Kalpakis K, Dasgupta K, Namjoshi P. Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks. ACM Computer Networks, 2003,42(6):697–716.
- [4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J, Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):2–16.
- [5] Lee JJ, Krishnamachari B, Kuo CCJ. Impact of energy depletion and reliability on wireless sensor network connectivity. In: Raghuvveer MR, Sohail AD, Michael DZ, eds. Proc. of the SPIE DSS 2004, SPIE 5440. 2004. 169–180.
- [6] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Ralph HSJ, Sandra L, Barbara E, eds. Proc. of the HICSS 2000, HICSS. New York: IEEE Computer Society, 2000. 8020–8029.
- [7] Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):366–379.
- [8] Bandyopadhyay S, Coyle EJ. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In: Bauer F, Roberts J, Shroff N, eds. Proc. of the Infocom 2003, INFOCOM. New York: IEEE Press, 2003. 1713–1723.
- [9] Pottie GJ, Kaiser WJ. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, 2000,43(5):551–558.
- [10] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. In: Jean B, Lodger F, Rachid G, Arno J, Gero M, eds. Proc. of the DEBS 2002, DEBS. New York: IEEE Press, 2002.
- [11] Sibley GT, Rahimi MH, Sukhatme GS. Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks. In: Hamel WR, Anthony AM, eds. Proc. of the ICRA 2002, ICRA. New York: IEEE Press, 2002. 1143–1148.
- [12] Wang GL, Cao GH, Porta TA, Zhang WS. Sensor relocation in mobile sensor networks. In: Znati T, Knightly E, Makki K, eds. Proc. of the IEEE Infocom 2005, INFOCOM. New York: IEEE Press, 2005. 2302–2312.
- [13] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1993,1(4):397–413.
- [14] Massoulié L, Roberts J. Bandwidth sharing: Objectives and algorithms. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002,10(3):320–328.
- [15] Hu NN, Li L, Mao ZQM, Steenkiste P, Wang J. A measurement study of Internet bottlenecks. In: Znati T, Knightly E, Makki K, eds. Proc. of the IEEE Infocom 2005, INFOCOM. New York: IEEE Press, 2005. 1689–1700.



田乐(1974 -),男,山东济宁人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络。



张雷(1971 -),男,博士,副教授,主要研究领域为光网络,宽带网路,无线传感器网络。



谢东亮(1974 -),男,博士,副教授,主要研究领域为移动互联网服务质量控制工程,无线分组网络性能。



程时端(1940 -),女,教授,博士生导师,主要研究领域为IP网络服务质量,移动互联网性能分析,无线网络新技术,新一代互联网服务理论。



韩冰(1977 -),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络。