

无线传感器网络洪泛路由研究^{*}

李 炯 汪文勇 潘家根

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

摘 要 无线传感器网络的路由问题是无线传感器网络研究中待解决的重要问题之一,洪泛(Flooding)路由算法是其中基本的一种算法,也是其他路由算法的基础。本文讨论了洪泛路由的性能和稳定性,并得出在使用洪泛路由时,无线传感器网络稳定性和节点的分布的关系。

关键词 无线传感器网络,路由,洪泛,蜂巢

Research of Flooding Route of Wireless Sensor Network

LI Jiong WANG Wen-Yong Pan Jia-Gen

(School of Computer, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract Flooding is the basic routing algorithm for Wireless Sensor Network. Its performance, stability and node distribution characters are analyzed. A conclusion is drawn as 4-neighbor network is the best choice.

Keywords WSN, Routing, Flooding

1 背景

无线传感器网络是由一定数量的传感器节点通过某种无线通信协议联结而成的信息感知系统。无线传感器网络的数据在节点间通过多跳路径传输,其路由问题不同于普通网络。本文讨论无线传感器网络最基本的一种路由算法——洪泛路由算法。

2 洪泛效率分析

从规则的节点分布开始考虑,我们首先考虑无线传感器节点分布为三角形情况。如图 1 所示,这种情况下,任意一个节点周围都分布有 6 个邻接节点,我们把这种情况命名为 6 邻点网络。我们的问题是中心点 O 要将自己 ID 编号发送到周围所有节点。

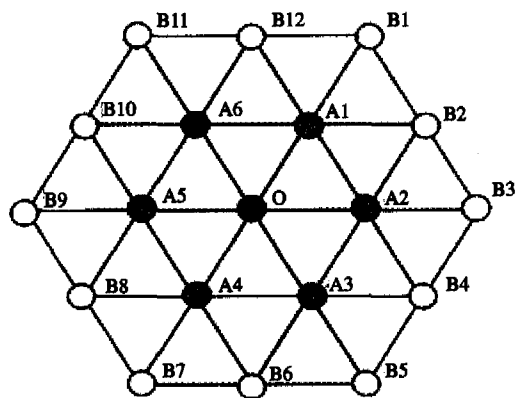


图 1 6 邻点网络

在第 1 个单元时间内进行第 1 次洪泛时,中心点 O 周围的 6 个节点 $A_1 \sim A_6$ 收到 O 点的 ID 编号,由于这 6 个点之前均没有 O 点的 ID 编号信息,第 1 次洪泛的效率为 100%。在第 2 个单元内进行第 2 次洪泛, $A_1 \sim A_6$ 点周围共 36 个节点·次收到 O 点的 ID 编号信息,但只有 $B_1 \sim B_{12}$ 点为有效,

第 2 次洪泛的效率为 33.3%。

我们用 a_k 表示第 k 次洪泛以后收到 O 点 ID 编号信息的节点次数,用 b_k 表示第 k 次洪泛以后,以上过程可以写为:

$$\begin{cases} a_1=6 & \begin{cases} a_2=36 \\ b_1=6 \end{cases} & \begin{cases} a_3=72 \\ b_2=12 \\ b_3=18 \end{cases} & \dots \end{cases}$$

因此可以得到:

$$\begin{cases} a_k=6b_{k-1} \\ b_k=6+b_{k-1} \end{cases} \quad (1)$$

由(1)式和初始值可以解得:

$$\begin{cases} a_k=36k-36(k>1) \\ b_k=6k \end{cases} \quad (2)$$

那可以得出 6 邻点网络的效率为:

$$\delta_6 = \frac{b_k}{a_k} = \frac{6k}{36k-36} = \frac{k}{6(k-1)} \quad (3)$$

当经过多次洪泛以后 $k \rightarrow \infty$, 得到:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \delta_6 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{6(k-1)} = \frac{1}{6} \approx 16.7\% \quad (4)$$

这个结论表明,6 邻点网络的效率稳定在 16.7% 左右。

接下来我们考虑 4 邻点网络和 3 邻点网络的情况,如图 2 和图 3 所示。

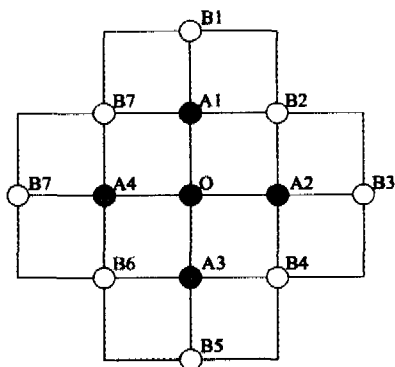


图 2 4 邻点网络

^{*} 本文受思科大学资助项目支持。

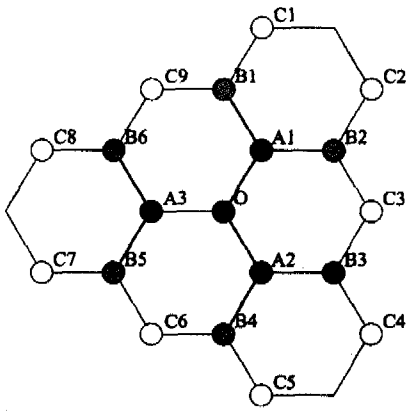


图3 3邻点网络

类似上面的推导,可以得到4邻点网络和3邻点网络的效率。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \delta_4 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{4(k-1)} = \frac{1}{4} \quad (5)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \delta_3 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{3(k-1)} = \frac{1}{3} \quad (6)$$

比较上述3种网络,可以得到 $\delta_3 > \delta_4 > \delta_6$,其中3邻点网络效率为33.3%,是洪泛路由在理论上的最高效率。任何路由算法不能超过这个效率,只尽可能地逼近。

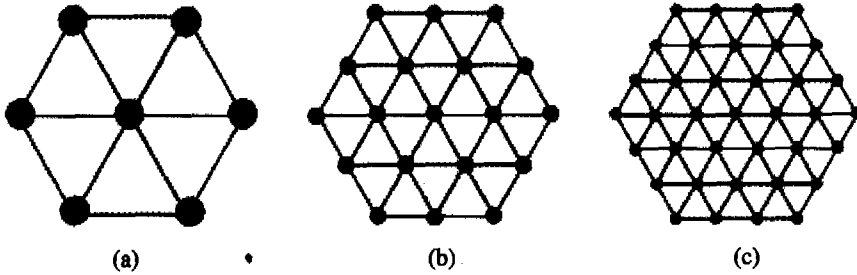


图4 6邻点网络的分布

如图4(a)所示。此时节点数为 $e_1 = 7$, 面积为 $s_1 = 6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} r^2$ 。由图4(b)和(c)分别得到:

$$\begin{cases} e_2 = 19 \\ s_2 = 24 \times \frac{\sqrt{3}}{4} r^2 \end{cases} \quad \begin{cases} e_3 = 37 \\ s_3 = 54 \times \frac{\sqrt{3}}{4} r^2 \end{cases}$$

可以归纳得到

$$\begin{cases} e_k = 3k^2 + 3k + 1 \\ s_k = 6k^2 \times \frac{\sqrt{3}}{4} r^2 \end{cases}$$

定义 $\varphi_{n=6}$ 为6邻点情况下,当无线传感器网络面积足够大时,单位节点可管理的面积,则有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_{n=6} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{s_k}{e_k} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{6k^2 \times \frac{\sqrt{3}}{4} r^2}{3k^2 + 3k + 1} = \frac{\sqrt{3}}{2} r^2 \quad (8)$$

(8)式说明,对于6邻点网络,每个节点平均可以管理 $\frac{\sqrt{3}}{2} r^2$ 的面积,即

$$\varphi_{n=6} = \frac{M}{N} = \frac{\sqrt{3}}{2} r^2 \quad (9)$$

对应4邻点网络和3邻点网络,可以得到:

$$\varphi_{n=4} = \frac{M}{N} = r^2 \quad (10)$$

我们再考虑 n 邻点网络的情况。在几何学上,只有前面的3邻点、4邻点和6邻点网络可以排列为规则的几何图形。但是,在统计学意义上,可以得出

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \delta_n = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{n(k-1)} = \frac{1}{n} \quad (7)$$

上式表明: n 邻点网络的洪泛效率稳定在 $\frac{1}{n}$,这是一个重要的结论。

3 节点分布分析

节点分布问题是要分析在无线传感器节点的传输最大距离一定的情况下,在一定面积的区域,节点如何分布可以使得节点个数最少。转化为数学问题,我们可以描述为:在面积为 M 的区域内,有 N 个节点,每个节点在半径为 r 的圆周范围内(在统计学意义上)存在 n 个邻接节点。在实际的情况中,无线传感器网络的范围大大超过节点的最大传输距离,可以认为 $M \gg \pi r^2$ 。

根据现有的研究,蜂巢结构是大自然中最佳的几何结构,在一定面积的区域,使用3邻点网络,需要的节点个数最少。

下面首先推导6邻点的情况,然后给出4邻点和3邻点的结论,最后推广到 n 邻点的情况。6邻点的情况如图4所示。

$$\varphi_{n=3} = \frac{M}{N} = \frac{3}{4} \sqrt{3} r^2 \quad (11)$$

而对于任意分布的情况,我们采用逐步逼近的办法来计算。如图5所示。

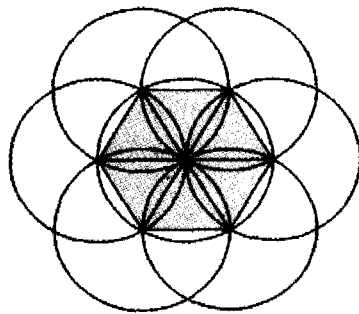


图5 n 邻点网络的分布

得到的结论是, n 邻点网络当面积足够大时:

$$\varphi_n = \frac{M}{N} = \frac{\pi}{n} r^2 \quad (12)$$

4 网络整体稳定性分析

我们用2个指标来描述网络的整体稳定性,第一个指标是某节点成为孤点的概率;第二个指标是从节点A到节点B

跳数的数学期望。

首先分析第一个指标,孤点是指某一个无线传感器节点在其最大传输范围内的所有节点均损坏,此时该节点虽然没有损坏,但信息无法通过周围节点传出去,成为事实上的坏点。我们假设节点损坏的概率为 p 。显然, n 邻点网络中某节点成为孤点的概率为 p^n 。

其次分析第二个指标,为了简化问题,我们用 2 跳的情况来考虑。我们要解决的问题是:节点 O 和节点 B₁ 间隔 2 跳,在节点损坏的概率为 p 的情况下,分析节点 O 到节点 B₁ 跳数的数学期望值。

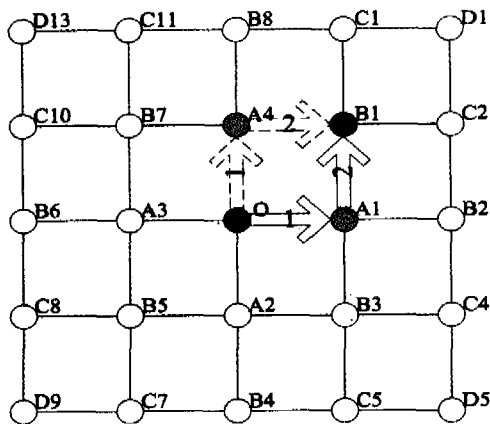


图 6 2 跳到达目标

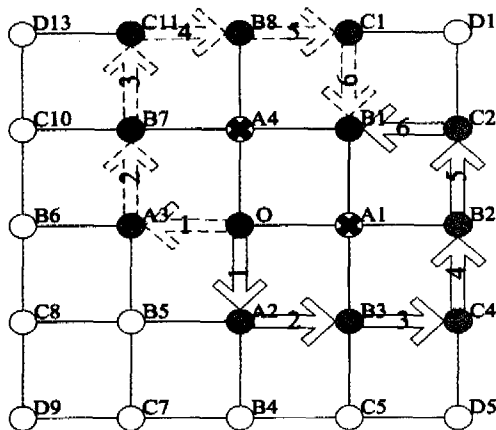


图 7 6 跳到达目标

如图 6 所示,在节点 A₁ 或 A₄ 未损坏时,节点 O 经过 2 跳到达节点 B₁,流程是 O→A₁→B₁ 或 O→A₄→B₁。2 个节点的损坏是独立事件,这种情况的概率为:

$$P_1 = 1 - p^2 \quad (13)$$

如图 7 所示,在节点 A₁ 和 A₄ 均损坏时,节点 O 经过 6 跳到达节点 B₁,流程是 O→A₂→B₃→C₄→B₂→C₂→B₁ 或 O→A₃→B₇→C₁₁→B₈→C₁→B₁。这种情况的概率为:

$$P_2 = p^2 \quad (14)$$

这样可以得到节点 O 到节点 B₁ 跳数的数学期望为:

$$E_4(p) = 2(1 - p^2) + 6p^2 = 2 + 4p^2 \quad (15)$$

同理,可以计算 3 邻点网络和 6 邻点网络的 2 跳节点间跳数的数学期望。

$$E_3(p) = 2(1 - p) + 4p(1 - p) + 8p^2(1 - p) = 2 + 2p + 4p^2 - 8p^3 \quad (16)$$

$$E_6(p) = 2(1 - p^2) + 4p^2(1 - p^2) + 6p^4(1 - p^2) = 2 + 2p^2 + 2p^4 - 6p^6 \quad (17)$$

在 p 较小的情况下,可以得到 $E_3 > E_4 > E_6$,这说明了 3 邻点网络可靠性最差,6 邻点网络可靠性最好。对于 n 邻点网络的情况,虽然难以在数学上证明,但显然 n 越大,网络可能性越好。

5 综合分析

根据第一节分析,3 邻点网络是洪泛效率最高的网络,4 邻点次之,6 邻点较差。根据第二节分析,3 邻点网络是分布效率最高的网络,即在节点最大传输距离一定和部署区域的面积一定的情况下,3 邻点网络的节点个数最少,节点分布最稀疏,整个网络的成本最低。而根据第三节分析,3 邻点网络是可靠性较差的网络,6 邻点的可靠性最强。

综合这些因素,从洪泛和分布的效率来看,邻点越少越好;而从网络的可靠性来看,邻点越多越好。那么,就需要从洪泛效率和网络可靠性中优选出合适方案,并且还要根据实际应用对性能和功能的不同要求。我们初步认为 4 邻点网络是较好的选择,其在可靠性、效率、成本几个因素上达到一个较好的平衡。

未来的工作 本文对无线传感器网络的洪泛路由算法进行了定量理论的分析,未来的一个工作是使用仿真程序对实际的洪泛进行试验,特别是针对异型区域的洪泛路由的特别情况。

洪泛路由算法是其他路由算法的基础,另外一个未来的工作是在洪泛路由算法的基础上,对其他路由算法进行定量分析。

参考文献

- 1 Curtis S. Dynamic Programming a different perspective[M]. In: Proc. of the IFIP TC2 Working Conf. on Algorithmic Languages and Calculi, 1997
- 2 Shenoy P P. Axioms for dynamic programming [J]. Computational Learning and Probabilistic Reasoning, 1996. 259~275
- 3 王春. 无线传感器网络路由协议的设计与仿真:[中国优秀博士学位论文]. 电子科技大学, 2004
- 4 王魏, 李平, 韩波. 无线传感器网络路由协议研究. 工业控制计算机, 2005(1)
- 5 梁英, 于海斌, 曾鹏. 无线传感器路由协议. 信息与控制, 2005
- 6 苗付友, 熊焰, 卫国. 一种无线传感器网络简单按需路由协议. 中兴通讯技术, 2005
- 7 朱黎明, 周乐青, 邓灿烽. 传感器网络路由协议分类研究. 科学与技术, 2005
- 8 韩鸿泉, 朱红松, 孟军. 无线传感器网络技术. 计算机系统应用, 2005