

Research on Virtual-Steiner-Tree Based Multicast Routing of Wireless Sensor Networks *

WANG Jian-ping^{*}, JIA Dong-yao, ZHOU Xian-wei

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract : Tree-based multicast routing protocol usually has a less robust and less expansible multicast-tree, for this reason, we propose a Virtual-steiner-tree-based Multicast Random Routing Protocol (VMRRP), concerning a limited energy, computing and storage power environment in wireless sensor networks. The thought of random routing proposed in this protocol makes the route from source to each destination a dynamic one. When comparing to GMP, it equilibrates the energy consumption and make the network's life span much longer, which is verified by simulation with NS-2.

Key words : wireless sensor network; virtual steiner tree; multicast tree; random routing
EEACC : 6150M

基于虚拟 Steiner 树的无线传感器 网络组播随机路由协议研究 *

王建萍^{*}, 贾东耀, 周贤伟

(北京科技大学信息工程学院通信工程系, 北京 100083)

摘 要 : 针对基于树的组播路由协议中组播树鲁棒性不好, 扩展能力差的特点, 又结合无线传感器网络自身能量、计算、存储能力有限的特点, 提出了基于虚拟 Steiner 树的组播随机路由协议 VMRRP (Virtual-steiner-tree based Multicast Random Routing Protocol)。该协议的随机路由思想, 使得组播树中源节点到各个组成员节点的路径是动态变化的, 与 GMP (Geographic Multicast Routing) 协议相比, 增加了组播树的鲁棒性, 也均衡了网络能量, 增加了网络生命周期, 并通过 NS-2 仿真试验得到了验证。

关键词 : 无线传感器网络; 虚拟 Steiner 树; 组播树; 随机路由

中图分类号 : TP393

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)11-1896-04

无线传感器网络 (WSN) 用于通信的能量开销要远大于用于数据计算的能量开销^[1], 组播通信拥有带宽利用率高、节省终端能量等特点^[2], 这使其在无线传感器网络“一对多”或“多对多”场景中的应用可以大幅减少传感器节点的能量消耗, 这就促进了组播技术在无线传感器网络中的发展。组播路由协议是实现组播的基础, 其功能是形成一定的机制来完成组播路由任务。构造组播分发树机制的路由协议, 也就是基于树的组播路由协议是应用最广泛的组播路由协议。

国内外对基于树的组播路由协议的研究成果很

多, 主要有 Shibo Wu 等^[3]提出的基于地理位置的组播路由协议 GMP, C. W. Wu 等^[4]提出的实用递增标识的组播路由协议 UIIMR (Utilizing Increasing ID Numbers Multicast Routing), M Scott Corson^[5]提出的轻量自适应组播路由协议 LAMR (Lightweight Adaptive Multicast Routing)。基于树的组播路由协议通常依据不同的启发式算法快速建立近似最优组播树, 数据沿着最优路径从源节点传送到各个组成员节点, 其数据包传输效率比较高, 主要缺点是鲁棒性不好, 路由树的任何一段链路有故障将导致路由树的重构, 从而带来大量的控制开

基金项目 : 国家自然科学基金资助 (60573050); 国家 863 项目资助 (2007AA01Z213)

收稿日期 : 2008-01-24 **修改日期 :** 2008-07-03

销^[6]。

针对基于树的组播路由协议中组播树鲁棒性不好,扩展能力差的缺点,本文提出了基于虚拟 Steiner 树的组播随机路由协议 VMRRP(Virtual-Steiner-tree-based Multicast Random Routing Protocol)。该协议通过引入随机路由思想,使得组播树中源节点到各个组成员节点的路径是动态变化的,增加了组播树的鲁棒性,也均衡了网络能量,防止因流量集中导致的节点快速死亡。

1 虚拟 Steiner 树的组播随机路由协议

1.1 网络模型

节点集 S 放置在二维空间 G 中。每个属于集合 S 节点 V_i 的坐标表示为 (X_i, Y_i) , V_i 可以通过 GPS 或其他独立的定位系统准确地知道自己的坐标,即位置信息。这个坐标就是它的网络 ID 和地址,所以该协议中不用另行考虑节点的定位问题。节点可分为源节点,组播节点和中间转发节点,源节点一般位于传感区域外,属于控制节点,具有较强的计算能力,存储能力。网络结构图如图 1 所示:

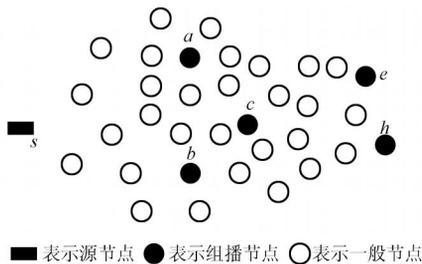


图 1 网络结构图

1.2 基于虚拟 Steiner 树随机路由协议 VMRRP

1.2.1 源节点初始化

源节点首先按照文献[3,7]中所述的虚拟 Steiner 树生成算法建立一虚拟 Steiner 树,过程如下:初始化时所有组播节点均处于活动状态,然后源节点遍历所有处于活动状态的节点,找出缩率值最大的组,把组中节点和 steiner 点的连线加入到组播树中,组节点变灰,即状态为非活动状态,steiner 节点被激活,变为活动状态,依次循环直到所有组播节点都被加入虚拟 steiner 树。以图 1 为例,虚拟 steiner 树的建立过程如图 2 所示。第一次循环中,组 (e, h) 被检测到,所以它的 Steiner 节点和组播节点的连线 $v_1 e$ 和 $v_1 h$ 被连进了虚拟 Steiner 树。 e, h 节点变灰, v_1 被激活,状态变为当前组播节点。第二次检测到 (v_1, c) , Steiner 节点和节点 c 重合,所以 $v_1 c$ 被加入 Steiner 树, c 点被激活。然后依次检测到 (c, a) , (f, b) , af, cf, fg, bg 被分别加到虚拟 Steiner 树。

整个虚拟 Steiner 树就建立起来了。如图 2 所示:

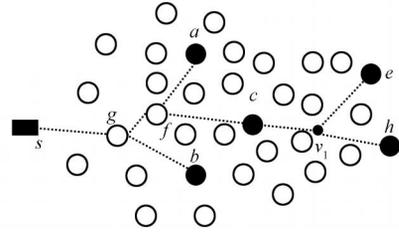


图 2 虚拟 Steiner 树的形成

虚拟 Steiner 树生成后,源节点会把树中的目的节点按照在虚拟 Steiner 树中的生成顺序,生成一个具有二叉树结构的节点序列(destination serial)。最先被检测到的点放在序列的最后。图 2 虚拟 Steiner 树对应的目的节点序列如图 3 所示:

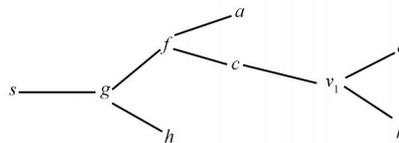


图 3 目的节点序列

节点最直接的后代称为下一代,图 3 中 g 为 s 的下一代。初始时 s 表示源节点,路由建立过程中 s 表示当前节点。

1.2.2 邻居节点信息表的建立

节点的邻居节点信息表中记录的节点符合以下两方面要求: 在节点的发射半径范围内,即到节点的距离小于节点的发射半径。到下一代节点的距离小于当前节点到下一代的距离。

1.2.3 随机策略

随机路由策略是指节点首先计算出邻居节点信息表中的各邻居节点的概率值,然后选择概率值最大的节点作为下一跳。计算概率的时候综合考虑能量,与当前节点距离及夹角有关系。

节点距离 根据我们采用的网络模型,可以得到整个网络中每个节点的位置坐标 (x, y) 。因此任意两节点 $i(x_i, y_i), j(x_j, y_j)$ 之间的距离:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

我们用下式作为选择下一跳节点的概率: $P_d = \frac{d_i}{d}$, $j \in N_i$ 为节点 i 的邻居节点信息表中的节点集, d 为节点的发射半径。

偏移角度 节点 j 是节点 i 的邻居节点,节点 d 是目的节点序列中的下一代节点,偏移角可以定义为两条线 (i, j) 和 (i, d) 之间的夹角,如图 4 所示。我们根据夹角公式,可以计算出夹角 θ_{ij} 为

$$\theta_{ij} = \left| \arctan\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) - \arctan\left(\frac{y_d - y_i}{x_d - x_i}\right) \right| \quad (2)$$

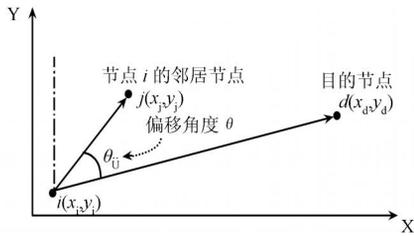


图4 偏移角度的定义

下一跳节点应该选择 值比较小的节点,换句话说就是 值比较小的节点应该承担更多的数据包转发任务。为了更好的比较,本文建立以下公式:

$$P = 1 - \frac{ij}{/2} \tag{3}$$

如果 $ij = 0$,表示节点 i 存在最大可能性选择节点 j 作为下一跳节点。网络中,因为邻居节点信息表中可能的下一跳满足两个条件,所以 $ij < /2$ 。

剩余能量 $E(t)$ 能量是无线传感器的一个致命问题。因此,即使当节点 j 的位置比节点 i 更好,如果节点 j 的 RE 远少于节点 i ,则转发数据包的优先权也将交由节点 i 。剩余能量多的邻居节点被选为下一跳节点的概率应该比较大,则:

$$P_{E(i)} = \frac{E_i(t)}{E(0)} \tag{4}$$

j N_i, N_i 为节点 i 的邻居节点集。

结合三方面考虑,下一跳节点的选择概率为

$$P_{ij} = P_d \times P \times \frac{E_i(t)}{E(0)} = \frac{d_{ii}}{d} \times (1 - \frac{ij}{/2}) \times \frac{E_i(t)}{E(0)} \tag{5}$$

1.2.4 路由算法流程

如图5所示,首先初始化目的节点序列值。源节点会把树中的目的节点按照在虚拟 Steiner 树中的生成顺序,生成一个具有二叉树结构的目的节点序列。最先被检测到的点放在序列的最后。当前节点最直接的后代称为下一代。

节点收到数据包后,从包信息中得到目的节点序列值,首先检测其下一代是否为虚拟节点,如果是,则把数据包转发到该虚拟节点发射半径范围内的节点即可,这时可以把该虚拟节点从目的节点序列中删除,刷新目的节点序列值,进入下一轮循环。如果下一代不是虚拟节点,则检测是否在邻居节点信息表中,若不在则按随机策略转发数据包。若检测到下一代在邻居节点信息表中,则检测当前能量是否大于最低门限值,即判断节点是否有能力转发数据包,如果没有,就把节点当作虚拟节点看待。

以图1网络为例整个选路过程可描述如图6所示。图6示出的是随机路由建立的过程。其中虚线表示虚拟 Steiner 树,实线表示实际路由,即信息传输的路径。

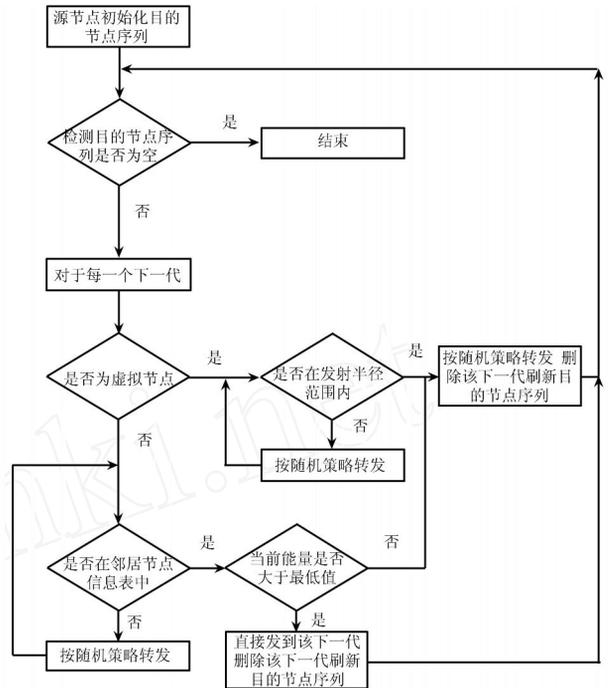


图5 路由算法流程图

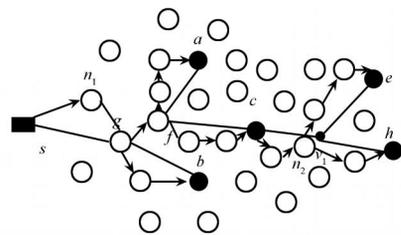


图6 随机路由的形成

在图中,s创建一虚拟 Steiner 树,目的节点序列如图3所示。

首先 s 检测到下一代 g 不在其邻居节点信息表中,则 s 把数据包按照随机策略转发到邻居节点信息表中某一节点,比如图中举例是 m 。随着时间的推移,网络拓扑的变化,邻居节点信息表中各节点的概率是动态变化的,即 s 下一跳的选择不是唯一的。

假定 m 是节点收到数据包以后,从其中提取目的节点序列信息,再把 g 与自己邻居节点信息表中的信息进行比较,发现 g 在其中,则直接转发给 g ,然后把 g 从目的节点序列中删除。因为 g 为 Steiner 节点,所以要检测节点 g 的能量,如果能量低于最低门限值(可理解为不具备发送数据的能力,能量接近于0),则将其状态变为虚拟 Steiner 点。

节点 g 收到数据包后发现有两个下一代,则按照与第2步同样的方式转发数据包,一路到 f 方向,一路到 b 方向。有些情况下可能需要经过转发2次,3次才能到达目的节点。

当节点 c 收到数据包后,发现其下一代 v_1 是虚拟 Steiner 节点,且不在其发射半径范围内,则按

随机策略转发,假设转发到了 m_2 , m_2 发现 v_1 在其发射半径范围内,此时可以把 v_1 从目的节点序列中删除,刷新目的节点序列, m_2 检测到下一代为 e 和 h , 分别把数据包发往 e 方向和 h 方向,最终发到 e 点和 h 点。

2 基于虚拟 Steiner 树的组播随机路由分析

本文提出的这种随机路由协议是一个源发起的、按需驱动的组播路由。当源节点有数据需要发送给它的组成员时才会建立一个组播树,直到数据发送完毕。下一轮数据发送时就重新启动路由由建立机制,建立路由,一直持续到数据发送完毕,这样就减少了 GMP 中周期性发送“hello”数据包维护组播树路由所需要的费用。另外,每次重新建立路由,节点的概率会被重新评估,所以低能量节点有很小的概率发送数据包,这就保证了链路的可靠性,这会极大地改善数据包的传送率,降低数据包的丢失率。

在仿真环境中,我们使用 150 个无线传感器节点,其中包含 30 个组播节点,MAC 层采用 802.11 协议,节点队列长度为 50 个最大包长,节点随机分布在 200 m × 200 m 的平面区域,节点的传输半径 20 m,传输功率不可变,在传输距离内的任意两个节点可以互相直接通信,控制包大小 128 byte。

试验中源节点每时间 t 发送一次数据包,分别取 $t=0.1$ s 和 $t=0.5$ s,仿真结果用能收到数据包的组播节点数度量网络生命周期,网络中没有组播节点收到数据包即判定网络死亡。试验得出的数据图如图 7 所示。

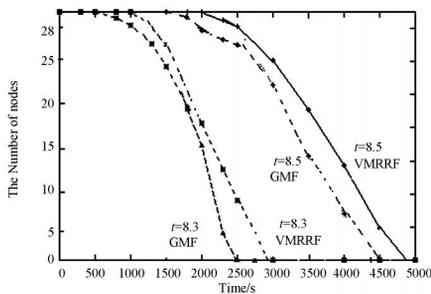


图 7 网络生命周期比较

结果表明 VMRRF 比 GMF 开始出现死亡节点的时间要晚,存活节点数下降比较急剧总的网络生命周期要比 GMF 长,而且随着 t 的增大,即发送数据包越不频繁,网络生命周期增长的幅度会越大。

3 小结

本文提出的基于虚拟 Steiner 树的组播随机路由协议 VMRRP 是源发起路由协议,当有数据发送的时候才启动路由建立机制,这样减少了 GMP 协议中维护路由的开销;VMRRP 引入了随机路由策略思想,根据邻居节点的距离、角度、能量等信息按照一定的概率策略选择下一跳,这样使得能量小的节点有很小的概率被选到,提高了链路的可靠性。可见 VMRRP 是一种高性能路由协议,尤其适用在数据发送比较不频繁的网络应用中。未来我们将在现有的基础上,研究具有最小能量消耗的组播转发结构,并利用随机路由的思想,设计无线传感器网络基于能量优化的组播随机路由协议。

参考文献:

- [1] Ettus. M System Capacity, Latency, and Power Consumption in Multihop-Routed SS-CDMA Wireless Networks[C]// Radio and Wireless Conference. Colorado, 1998, 55-58.
- [2] Ahmed D T, Shirmohammadi S. Architectural Analysis of Multicast Routing Protocols for Wireless Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Networking (ICN07), 2007.
- [3] Shibo Wu, Selcuk. K. Distributed Geographic Multicast Routing in Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS '06) 0-7695-2540-7/06 C 2006 IEEE.
- [4] Wu C, Tay Y. Ad Hoc Multicast Routing Protocol Utilizing Increasing Id-Numbers (AMRIS) Functional Specification[M]. Internet drift, 1998.
- [5] Ji L, Scott M. A Lightweight Adaptive Multicast Algorithm [R]. GLOBECOM 1998, 1998: 10361042.
- [6] Xiong X, Nguyen U T, Nguyen H L. Preemptive Multicast Routing in Mobile Ad Hoc Networks[C]// Proceedings of IC-NICONSMCL '06, 2006.
- [7] Hwang R, Richards D. The Steiner Tree Problem[J]. Annals of Discrete Mathematics, 53, 1992.



王建萍(1974-),女,博士,副教授,研究方向为无线传感器网络、光纤通信等, jpwang@tsinghua.org.cn