

路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法^{*}

张衡阳¹⁺, 王玲¹, 刘云辉², 蔡宣平¹

¹(国防科学技术大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

²(香港中文大学 机械自动化工程学系,香港)

Route-Sign-Based Adaptive Void Handling Geographical Routing Algorithm

ZHANG Heng-Yang¹⁺, WANG Ling¹, LIU Yun-Hui², CAI Xuan-Ping¹

¹(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, China)

+ Corresponding author: E-mail: hareed@163.com

Zhang HY, Wang L, Liu YH, Cai XP. Route-Sign-Based adaptive void handling geographical routing algorithm. *Journal of Software*, 2009,20(10):2744–2751. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3628.htm>

Abstract: To handle routing void of greedy geographical routing in wireless sensor networks, an efficiency adaptive void-handle algorithm is proposed, which is based on route signs that are distributed extracted and eliminated iteratively. Probes are sent by source to extract the route signs on the greedy path to destination. Based on the local planar graph, probes can take a clockwise (anticlockwise) traversal using the right (left) hand rule in perimeter mode, when it reaches the routing void. At the same time, route signs are distributed extracted and eliminated iteratively. The route signs are feedback to source and can guide the data packets delivered from source to destination never meeting routing void. Simulation shows that the algorithm can acquire a suboptimal routing path, with a high QoS performance in delivery delay and a mean throughout, so it can be applied to greedy geographical routing in large scale wireless sensor networks which have routing voids.

Key words: wireless sensor networks; greedy geographical routing; routing void; adaptive void handling; route sign

摘要: 针对无线传感器网络贪婪地理路由协议中的路由空洞问题,提出一种高效的基于路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法.该算法中,当探测包贪婪转发遇到空洞时,在网络拓扑局部平面化的基础上,以左(右)手法则提取空洞边界并沿其逆(顺)时针周边模式双向转发,同时,分布式地进行路标的迭代提取和剔除,直到获取的路标使得后续的数据包依次以它们为中间目标节点进行传输而不再遇到空洞为止.仿真结果表明,该协议能够以较小的控制开销代价获得次最优的传输路径,极大地提高了路由协议的性能,可以应用于无法消除路由空洞的大规模无线传感器网络贪婪地理路由协议.

关键词: 无线传感器网络;贪婪地理路由;路由空洞;自适应空洞处理;路标

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

^{*} Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60675056 (国家自然科学基金); the PLA General Armament Department Pre-Research Foundation of China under Grant No.9140A22050408KG01644 (总装预研基金)

Received 2007-11-05; Accepted 2009-02-24

在无线传感器网络中,贪婪地理路由协议利用本节点、邻居节点及目标节点的地理位置信息,将数据包依次传递给距离目标节点更近的一个邻居节点,直至目标节点.在整个数据传输过程中,不需要泛洪路由探测包进行端到端路由的建立和维护,不需要存储路由表,相对于路由表驱动的先验式路由协议^[1-3],是一种仅需少量存储、控制开销小的路由协议.但是,在网络节点密度低的情况下,会出现路由空洞^[4,5].解决路由空洞问题是贪婪地理路由协议中颇具挑战性的工作,其解决的好坏对整个路由协议的性能具有很大的影响.虽然可以通过提高节点密度来消除路由空洞的出现,但在一些节点随机布撒的野外场景中,由于不可抗拒的地理因素及某些节点的失效仍然会造成路由空洞,如果只采用单一的贪婪转发模式,即使在有路径可达目标节点的情况下,也无法有效地把数据传至目标节点,所以必须采取路由空洞处理算法来配合贪婪转发模式以达到整个路由算法收敛的目的.

本文第1节综述国内外近年来针对空洞问题的相关工作.第2节详细阐述基于路标分布式迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法.第3节利用 NS-2.30 仿真平台对采用该算法的 GVAR 协议进行仿真,并将其与典型的贪婪路由协议 GPSR^[6]和路由表驱动的 DSDV^[4]协议在路由跳数、控制开销、数据包成功传送率和平均吞吐量等几个方面进行性能比较.第4节给出简要结论.

1 国内外相关工作

为了解决路由空洞问题,文献[7]提出移动节点填补的方法.通过节点的移动来填补路由空洞,建立有效的前向通路.该方法对节点的移动性和区域的可移动性都有要求,其应用范围具有很大的限制.文献[8]认为,在网络拓扑结构不断发生变化时,路由空洞的存在是暂时的,一旦出现路由空洞,就丢弃该数据分组.如果当路由空洞出现频繁或空洞存在的时间比较长时,会导致数据的大量丢失.在文献[9]中,当节点遇到路由空洞时,并不丢弃数据分组,而是进行有限制的区域性泛洪.当路由空洞在数据转发中出现较早时,该算法就演变成类似于 DREAM^[10]的定向泛洪算法,使更多的节点参与了数据的转发,数据量急剧增加,从而造成能量的大量消耗.文献[11]中的方法则在遇到空洞时启动路由发现机制,搜索从空洞节点到目的节点的路由,而不是数据的定向泛洪.当路由空洞在数据转发中出现较早时,该方法就演变成与 AODV^[2]和 DSR^[3]类似的基于链路状态的路由表驱动的协议.文献[12]提出 DUA(距离更新算法),该方法采用反向路由距离更新算法来绕过路由空洞.文献[13]提出一种压力反馈路由算法以绕过路由空洞.基于右手法则的面遍历算法 FACE-2^[14]可以使数据分组在空洞的边界上进行传送,有效地绕过空洞,建立在全网络拓扑平面的基础上,传送的路径效率比较低.文献[6]提出的 GPSR 协议为面遍历算法的改进,结合使用贪婪转发模式与基于右手法则的周边转发模式来有效地处理路由空洞问题,协议简单、可靠,但对空洞的形状不具有感知性,在某些路由空洞的情况下效率很低,如图 1 实线所示.文献[15]提出 GOAFR+算法,一定程度地避免了 GPSR 协议的盲目性,但其数据的传输容易在空洞节点两侧形成振荡式传输.文献[16]使用 TENT 方法来检测节点是否是空洞节点,使用 BOUNDHOLE 算法来检测空洞边界,帮助数据分组有效地绕过空洞.在该算法中,即使没有数据业务,网络中的节点也要周期性地运行 TENT 算法和 BOUNDHOLE 算法,消耗了一些不必要的能量.文献[17]提出的自适应算法与本文研究比较接近,其在探测过程中需要存储两张节点链表,一张为从源节点到目的节点的经历节点链表,另一张为经历节点表中的凸点集,当网络规模较大,经历节点较多时,其存储开销和控制开销将急剧增大.

本文提出一种基于路标分布式迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法,通过探测包获取的最短路径中的路标链表,使得后续数据包的传输以路标链表中的节点作为中间目标节点

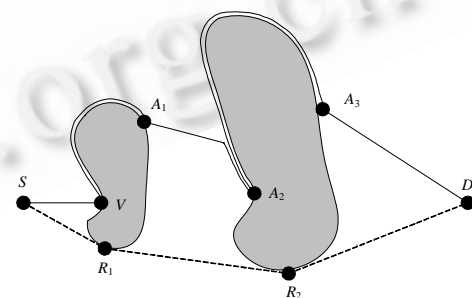


Fig.1 Routing void of greedy geographical routing (GPSR with solid line, GVAR with dashed line)

图1 贪婪地理路由协议中的路由空洞处理 (GPSR 为实线路径,GVAR 为虚线路径)

进行转发时不再进入空洞处理模式,所走的路径如图 1 虚线所示.

2 基于路标分布式迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法设计

2.1 路标定义

在进行算法描述之前,给出路标的定义.

定义 1. 对于空洞边界上 3 个相邻的边界点 v_{j-1}, v_j 和 v_{j+1} , 面向空洞所形成的夹角 $\angle v_{j-1}v_jv_{j+1}$ 如果小于 π , 则 v_j 为该空洞边界上的凸点, 反之则为凹点.

定义 2. 点 s 为空洞外的任意一点, 对于沿空洞边界上的相邻 3 个边界点 v_{j-1}, v_j 和 v_{j+1} , 若 $(v_{j+1}-s) \otimes (v_j-s) \times (v_{j-1}-s) \otimes (v_j-s) > 0$ 时成立, 则点 s 和点 v_j 的连线与空洞在边界点 v_j 局部相切. 若 $(v_{j+1}-s) \otimes (v_j-s) > 0$ 和 $(v_{j-1}-s) \otimes (v_j-s) > 0$ 同时成立, 则点 s 和点 v_j 的连线与空洞在边界点 v_j 处局部左切. 若 $(v_{j+1}-s) \otimes (v_j-s) < 0$ 和 $(v_{j-1}-s) \otimes (v_j-s) < 0$ 同时成立, 则点 s 和点 v_j 的连线与空洞在边界点 v_j 处局部右切. 其中 \otimes 表示叉乘.

定义 3. 当源节点 s 发送的探测包在贪婪转发过程中遇到空洞 V_n 而使用右(左)手法则顺(逆)时针绕空洞 V_n 边界进行周边转发时, 空洞边界上经历点 v_j 如果满足两个条件: (1) v_j 为空洞 V_n 的凸点; (2) 源节点 s 和 v_j 的连线与空洞 V_n 在 v_j 处局部左(右)切, 则称 v_j 为路标.

2.2 算法描述

2.2.1 协议包说明

协议中包括信标包(BEACON)、路标探测包(GVAR_PROBE)、路标反馈包(GVAR_REPLY)和数据包(GVAR_DATA)这 4 种类型的包. BEACON 包含节点标识(节点 id 和位置信息 x, y), 每个节点周期地仅向周围一跳邻居节点广播信标包, 用来进行邻居节点表的构建与维护, 为贪婪转发和周边转发寻找下一跳节点提供选择依据. GVAR_PROBE 包含源节点标识、目标节点标识、上一跳节点标识、路标链表、转发模式(贪婪转发或者周边转发)、周边转发模式(右手法则或者左手法则)、记录探测路径的跳数、包序列号、生存时间(TTL)和空洞标志位(VOIDFLAG)等几个字段. GVAR_REPLY 包含源节点标识、上一跳节点标识、目标节点标识、路标链表、转发模式(贪婪转发或者周边转发)和空洞标志位(VOIDFLAG)等几个字段. GVAR_DATA 包含源节点标识、目标节点标识、上一跳节点标识、路标链表、转发模式(贪婪转发或者周边转发)和数据内容等几个字段. 其中, 路标链表中每个元素包含路标的标识和提取该路标时采用的周边转发模式. 探测包序列号包含周期序列号(HighID)和次序序列号(LowID)两个字段, 新的探测周期到来时, HighID 加 1, LowID 重置 0, 在同一周期内发送的各个探测包 HighID 不变, 只是 LowID 按发送的次序加 1.

2.2.2 算法步骤

算法步骤如图 2~图 5 所示.

第 1 步. 在源节点开始发送数据包之前, 先发送一个探测包, 转发模式初始化为贪婪模式, VOIDFLAG 初始化为 0, 路标链表初始化只包含源节点和目标节点两个元素的链表.

第 2 步. 探测过程中遇到空洞节点时将转发模式设定为空洞处理模式, VOIDFLAG 设置为 1, 同时自我复制生成两个探测包, 以该点为中心进行网络拓扑局部平面化处理, 以便得到无交叉边的空洞边界, 并分别逆时针(左手法则)和顺时针(右手法则)沿着空洞边界进行双向周边转发, 在周边转发的过程中进行路标的分布式迭代提取和剔除, 其流程如图 5 所示, 具体描述见第 2.2.3 节. 当转发至比空洞节点距离目标节点更近的节点时, 恢复成贪婪转发模式. 在贪婪转发模式下不进行路标的迭代提取和剔除.

第 3 步. 当探测包以贪婪转发模式进行转发时, 如果再遇到空洞, 则重复第 2 步, 直至目标节点.

第 4 步. 目标节点收到探测包后在本节点上记录其经历路由的跳数、路标链表和包序列号, 并立即向源节点发送一个反馈包. 反馈包中包含探测过程提取的路标链表及记录的 VOIDFLAG 位. 当目标节点收到下一个探测包时, 将其与本节点的记录进行比较, 其流程如图 4 所示, 如果周期序列号(HighID)大于本节点记录的

HighID₋,则更新本节点记录的路标链表、跳数和包序列号,并向源节点发送反馈包,如果小于本节点记录的 HighID₋,则直接丢弃它而不作任何处理;如果 HighID 相等,则比较次序列号 LowID,如果大于本节点记录的 LowID₋,则更新本节点的 LowID₋和路标链表,并向源节点发送一个反馈包;在次序列号相同的情况下,则比较路由跳数 hops,若小于记录的 hops₋,则记录该路由 hops 并更新本节点的路标链表,同时向源节点发送一个反馈包,否则,不作更新,直接丢弃该包。

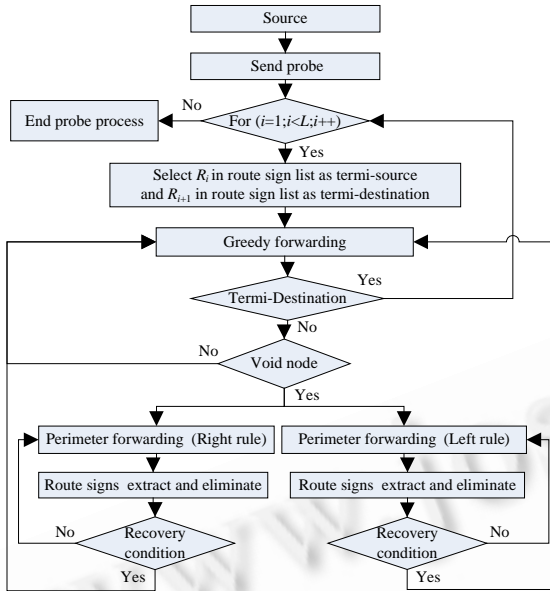


Fig.2 Process of get the key node list by probe
图 2 路标获取的探测过程

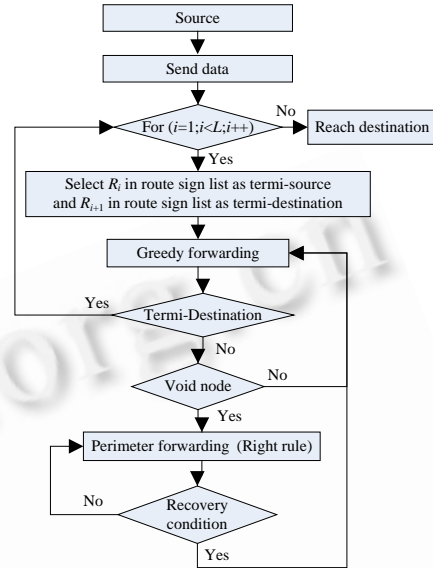


Fig.3 Process of data transfer
图 3 数据包传输过程

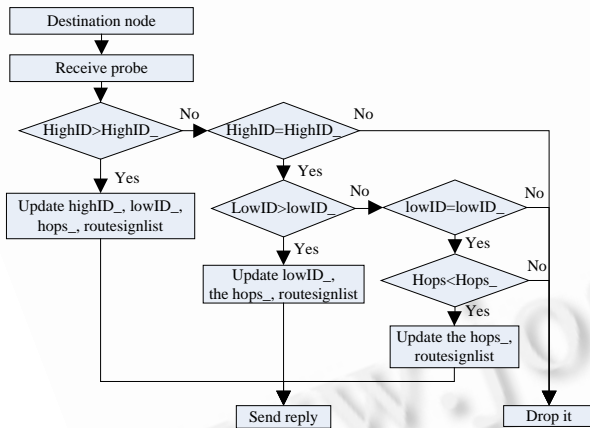


Fig.4 Handling received probe process
图 4 目标节点收到探测包的处理过程

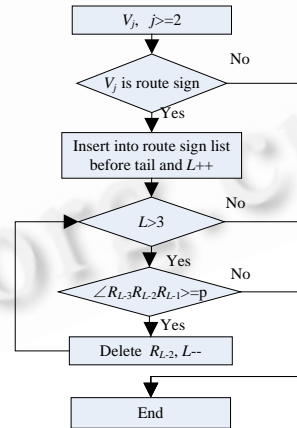


Fig.5 Extracting and eliminating route signs process
图 5 分布式路标迭代提取和剔除过程

第 5 步.源节点收到反馈包后,首先检查 VOIDFLAG,如果 VOIDFLAG 为 1,则说明在探测过程中遇到了空洞,需要再次发送探测包,此时只增加探测包的次序列号,路标链表初始化先前探测提取的路标链表,并依次以链表中的路标作为中间目标节点进行贪婪转发,重复第 1~5 步骤.直至源节点收到的反馈包中 VOIDFLAG 为 0,探测过程结束。

第6步.路标提取完毕后,数据包便依次以路标链表中的路标作为中间目标节点进行贪婪转发,如图3所示,在网络拓扑不发生变化的静态网络中,可以保证数据包传输以贪婪模式进行转发,而不会遇到路由空洞.

2.2.3 分布式路标迭代提取和剔除过程

探测包中始终维护路标链表和上一跳节点,遇到空洞进入空洞处理模式,如图5所示.当周边转发至空洞的第2个节点时便开始判断自己是否为路标,如果是,则将其插入路标链表的最后元素(目的节点)之前,路标链表长度 L 加1.当新的路标节点插入后,如果路标链表的长度 L 大于3,则需要进行一次迭代剔除过程:路标链表中的 R_{L-1}, R_{L-2} 和 R_{L-3} 在 R_{L-2} 面向所经历的空洞张成的夹角 $\angle R_{L-1} R_{L-2} R_{L-3}$ 大于 180° ,则从路标链表中剔除 R_{L-2} ,路标节点链表长度 L 减1,再重新迭代加以判断,直到 $\angle R_{L-1} R_{L-2} R_{L-3}$ 小于 180° 或路标链表的长度 L 小于等于3时结束剔除过程.

2.2.4 算法特点

(1) 探测包的探测过程并不像传统的基于路由表协议的路由探测过程^[1-3],不需要进行全网性的泛洪,空洞问题的解决所涉及的节点仅限于空洞边缘处的节点,引入的控制开销比较少,节省了能量消耗.

(2) 该算法仅在探测包探测过程遇到空洞时,才在空洞边界上进行拓扑局部平面化以获取空洞边界,而不像面遍历算法那样需要全网拓扑的平面化处理^[6,14,15],数据包的传输过程中不再需要进行局部平面化处理,减少了因运行期间全网拓扑平面化所带来的处理能耗^[16].

(3) 数据包在路标节点的引导下进行传输,一直都采用贪婪转发模式,减少了因网络拓扑平面化所带来的路由跳数增加的影响,如图6和图7所示.

(4) 探测包的双向探测,对空洞边界路标节点的提取,获取了空洞的主要特征,为后续数据包的传输提供了路标,以最优的路径高效地绕过空洞,消除了GPSR具有的盲目性.如图8和图9所示.

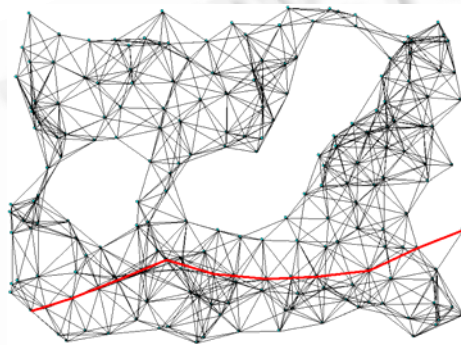


Fig.6 Greedy routing path in ACG
图6 全连通图中贪婪转发路径

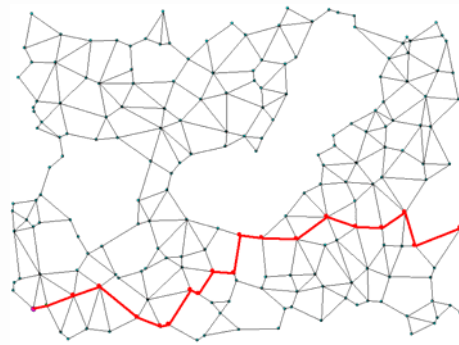


Fig.7 Greedy routing path in GG
图7 GG平面图中的的贪婪转发路径

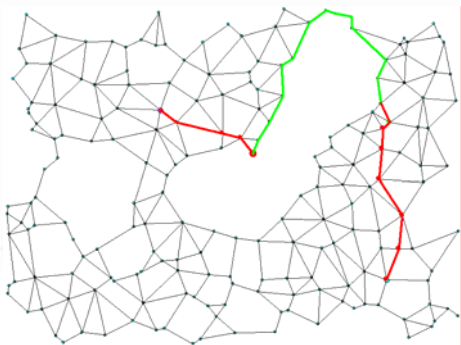


Fig.8 Delivery path of GPSR packets
图8 GPSR协议数据包转发路径

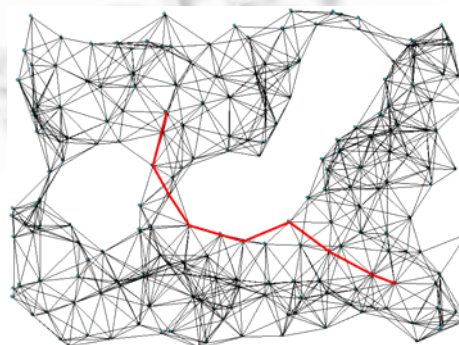


Fig.9 Routing path of GVAR packets
图9 GVAR协议数据包转发路径

3 算法仿真

本文把采用基于路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法的贪婪地理路由协议称为 GVAR,在具有相同路由空洞的拓扑场景和相同数据业务流的条件下,与基于路由表的动态源路距离矢量路由协议 DSDV^[1]和典型的贪婪地理路由协议 GPSR^[6]进行比较,其中静态场景如图 6 所示,动态场景由仿真软件根据 Random waypoint model^[3]产生.采用以下 4 个评价参数:(1) 平均跳数(mean hops);(2) 控制开销(overhead),即仿真时间内网络信标包和探测包总量与成功发送的数据包总量之比;(3) 数据传送成功率(delivery success ratio),即在仿真时间内目标节点接收的数据包个数与源节点发送的数据包个数之比;(4) 平均吞吐量(mean throughput),即平均单位时间(1s)内目标节点接收的数据量(kbit).本文中软件仿真平台使用 NS-2.30^[18].仿真中,GPSR 协议的信标交换周期为 5s,GVAR 协议的信标交换周期为 5s,探测周期为 10s,DSDV 的路由表的维护周期为 5s,数据源使用 CBR 业务流,包大小为 512bit.

路由跳数:结果如图 10 所示,DSDV 中每个节点需要周期性地全网性的 hello 探测包广播,以此来维护各个节点至其他节点的最佳路径.GPSR 结合使用贪婪转发与周边转发两种转发模式,在遇到空洞时一律采用基于右手法则的周边转发模式,对空洞的形状不具有感知性,其数据转发路径为三者之中最大.而 GVAR 采用数据转发之前使用探测包对路径进行了探测,采用基于路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法,对空洞形状进行了有效的检测,其数据转发的跳数接近 DSDV,大大优于 GPSR.

控制开销:结果如图 11 所示,在 DSDV 协议中,由于每个节点需要周期性地全网性 hello 路由包广播,其控制开销最大,GPSR 协议中各个节点只需要周期性地向周围节点发送生命周期(TTL)为 1 的信标来维护本节点的一跳邻居节点表,所以,其控制开销较低.对于 GVAR 协议,采用与 GPSR 相同的方式来维护自己的一跳邻居节点,只是在数据转发之前增加了路标的提取过程,由于其探测包的探测过程类似于 GPSR 数据包的传输过程,而不像 DSDV 协议中 hello 包的全网性广播,因而控制开销得到了很好的控制,在数据量较大的场景中,该探测过程带来的控制开销完全可以忽略.

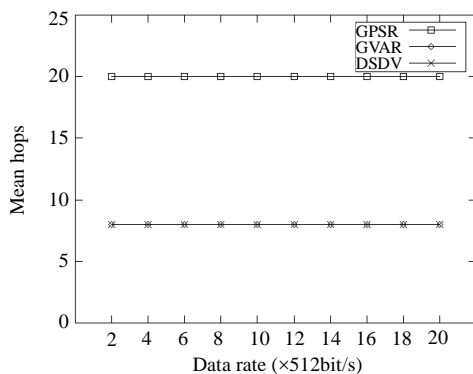


Fig.10 Mean hops in static scenery

图 10 静止场景中的平均跳数

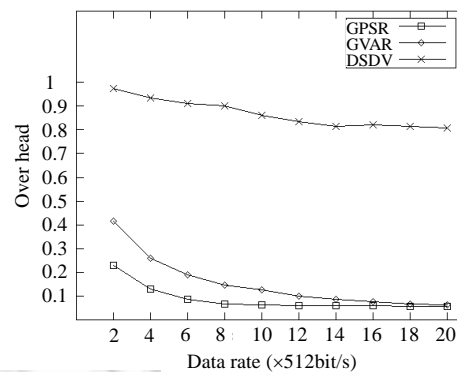


Fig.11 Overhead in static scenery

图 11 静止场景中的控制开销

数据传送成功率:结果如图 12 所示,DSDV 协议初始化过程比较长,造成了数据包的丢失.当数据发送速率增大时,GPSR 的数据传送成功率下降得比较快,这是由于 GPSR 在周边转发过程中需要进行网络平面化的处理过程,处理时延造成了大量数据包排队,当排队超过了设定的队列长度就丢弃新到的数据包,而 GVAR 协议中通过探测包获取的路标引导数据包的传输只使用贪婪转发模式,降低了处理时延,极大地减少了由于数据拥塞引起数据包丢弃的现象.

平均吞吐量:如图 13 所示,GPSR 的平均吞吐量一开始随数据源发送速率的增大而增大,当数据发送速度为 8 个/s 时,其吞吐量接近最大值,而 GVAR 在数据发送速率为 18 个/s 时才接近最大值,说明 GVAR 协议的数据处理传输能力要大于 GPSR.由于 DSDV 大量的控制包的广播,带来了数据包的碰撞丢弃,其数据吞吐量相比前两

者都要低.

在数据发送速率为 10 个/s 时,3 种协议随着场景中运动程度的增加,其控制开销也逐渐增大,如图 14 所示,数据传送成功率逐渐降低,如图 15 所示.通过比较可以看出,GVAR 性能要优于 GPSR 和 DSDV.在运动场景中出现了丢包现象,且随着运动速度的增大而更为严重,这是因为贪婪地理路由协议中周期性构建和维护的邻居节点的地理位置信息与实际地理位置不同步而引起的,有待于下一步深入研究的工作来解决这个问题.

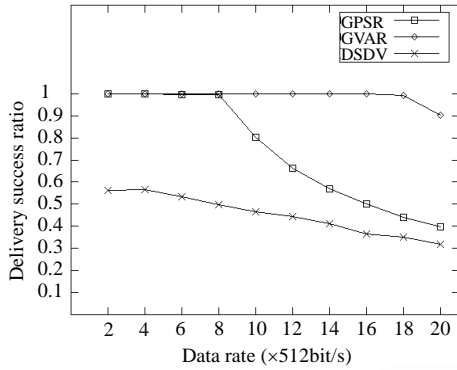


Fig.12 Delivery success ratio in static scenery

图 12 静止场景中的数据传送成功率

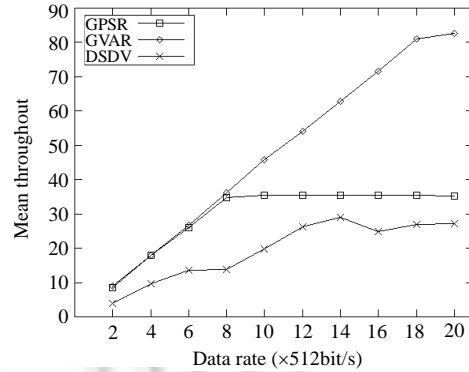


Fig.13 Overhead in static scenery

图 13 静止场景中的平均吞吐量

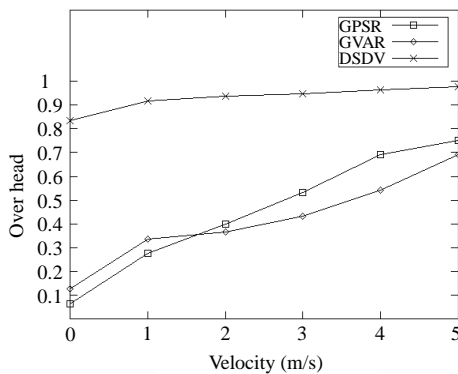


Fig.14 Overhead in dynamic scenery

图 14 动态网络中的控制开销

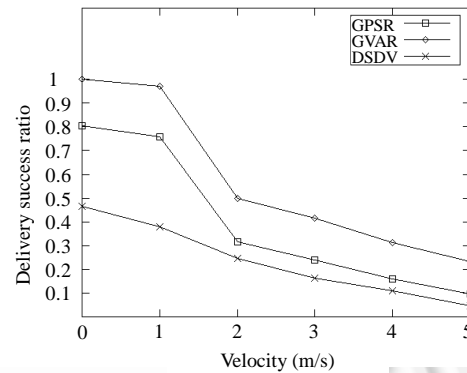


Fig.15 Delivery success ratio in dynamic scenery

图 15 动态网络中的数据传送成功率

4 结论

现在的空洞处理算法大多是数据包传输过程中遇到空洞然后想办法绕过空洞,没有充分利用空洞的几何特征,传输效率相对较低.本文在分析总结国内、外针对空洞问题所做相关工作的优缺点的基础上,提出了一种路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法,数据包依次以路标节点为中间目标节点进行贪婪传输,通过路标的导引来有效而高效地绕过空洞,能够以较小的控制开销代价和少量的空洞特征信息获得接近于 DSDV 的传输路径,仿真结果表明其获得了较优的数据传送成功率和吞吐量,具有良好的 QoS 性能.

References:

- [1] Perkins CE, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. London: ACM, 1994. 234-244.

- [2] Perkins CE, Belding-Royer EM, Chakeres I. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing. IETF Internet Draft, draft-perkins-manet-aodvbis-00.txt, Oct 2003 (Work in Progress).
- [3] Johnson DB, Maltz DA. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: Imielinski T, Korth H, eds. Mobile Computing. Kluwer Academic Publishers, 1996. 153–181.
- [4] Ahmed N, Kanhere SS, Jha S. The holes problem in wireless sensor networks: A survey. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review Archive, 2005,9(2):4–18.
- [5] Chen D, Varshney PK. A survey of void handling techniques for geographic routing in wireless networks. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2007,9(1):50–67.
- [6] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. of the MOBICOM. Boston: ACM, 2000. 243–254.
- [7] Li Q, Rus D. Sending messages to mobile users in disconnected ad-hoc wireless networks. In: Proc. of the ACM Mobicom 2000. Orlando: Academic Press, 2000. 44–45.
- [8] Stojmenovic I, Lin X. GEDIR: Loop free location based routing in wireless networks. In: Proc. of the Int'l Conf Parallel and Distributed Computing and System. Boston: ACM, 1999. 1025–1028.
- [9] Stojmenovic I, Lin X. Loop-Free hybrid single-path/flooding routing algorithms with guaranteed delivery for wireless networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed System, 2001,12(10):1023–1032.
- [10] Basagni S, Chlamtac I, Syroitiuk V, Woodward BA. A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM). In: Proc. of the 5th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom'98). Dallas: ACM, 1998. 76–84.
- [11] Jain R, Puri A, Sengupta R. Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks. IEEE Personal Communication, 2001,8(1):48–57.
- [12] Chen SG, Fan GB, Cui JH. Avoid “Void” in geographic routing for data aggregation in sensor networks. Int'l Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing (Special Issue on Wireless Sensor Networks), 2006,2(1):169–178
- [13] He T, Stankovic JA, Lu C, Abdelzaher T. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2003). Providence: IEEE, 2003. 46–55.
- [14] Bose P, Morin P, Stojmenovic I, Urrutia J. Routing with guaranteed delivery in ad hoc networks. Wireless Networks, 2001,7(6):609–616.
- [15] Kuhn F, Wattenhofer R, Zhong Y, Zollinger A. Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice. In: Proc. of the 23rd ACM Symp. on Principles of Distributed Computing (PODC 2003). Boston: ACM, 2003. 63–67.
- [16] Fang Q, Gao J, Guibas LJ. Locating and bypassing routing holes in sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2004. IEEE Press, 2004. 2458–2468.
- [17] Huang H. Adaptive algorithm to mitigate inefficiency in greedy geographical routing. IEEE Communication Letters, 2006,10(3):150–152.
- [18] The NS manual. 2008. http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc-stable/ns_doc.pdf



张衡阳(1978—),男,博士,讲师,主要研究领域为无线自组织网络,智能信号处理,网络通信.



刘云辉(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能,无线传感器网络.



王玲(1965—),女,博士,副研究员,主要研究领域为智能信号处理与网络通信,无线传感器网络.



蔡宣平(1962—),男,教授,主要研究领域为机器视觉,图像处理.