

文章编号: 1001-0920(2011)02-0196-05

无线传感器网络中分段贪婪地理路由算法

喻嘉¹, 闻英友^{1,2}, 赵宏^{1,2}

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 东软集团股份有限公司研究院, 沈阳 110179)

摘要: 针对基于地理位置的无线传感器网络路由中存在的路由空洞问题, 提出一种新的路由模式: 分段贪婪路由. 在该模式中, 整个路由过程被中间节点序列划分为若干段, 在每一段上仅应用贪婪转发策略. 为确定合适的中间节点, 给出一种基于递归探测的方法, 并以GPSR算法为基础探测路由构造了SGR算法. 仿真实验表明, 在存在不同类型、大小、数量路由空洞的网络环境中, SGR算法均能以较小的探测开销获得接近最优的路由路径, 尤其是凹空洞存在的情况.

关键词: 无线传感器网络; 贪婪地理路由; 路由空洞; 分段贪婪路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Segmented greedy geographic routing in wireless sensor networks

YU Jia¹, WEN Ying-you^{1,2}, ZHAO Hong^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Neusoft Research, Neusoft Corporation, Shenyang 110179, China. Correspondent: YU Jia, E-mail: yujia@neusoft.com)

Abstract: For the routing hole problem existing in wireless sensor networks when performing geographic forwarding, a novel segmented greedy routing(SGR) model is proposed. In the proposed solution, the entire routing procedure is separated into several phases by middle target nodes, and only greedy forwarding is applied in each phase. In order to determine proper middle target nodes, a recursive detecting scheme is given. Taking GPSR as basic detecting algorithm, a SGR algorithm is developed. Simulation studies show that SGR algorithm can find near optimal routing path with relatively low cost in various network environment, especially when concave holes exist.

Key words: wireless sensor networks; greedy geographic routing; routing holes; segmented greedy routing

1 引言

无线传感器网络是一种没有有线基础设施支持的网络, 整个网络由对等的节点构成, 最初应用于军事领域, 但随着无线通信和终端技术的发展, 无线传感器网络得到了越来越广泛的应用.

路由技术是无线传感器网络关键技术之一. 由于节点直接通信范围有限, 当通信对端超出节点直接通信范围时, 就需要借助其他中间节点进行分组转发. 因此, 每个节点都需要同时担当通信实体与路由器的双重角色. 早期的无线传感器网络路由协议^[1-3]继承于有线网络路由协议, 这些协议虽然进行了一定程度的改进, 但并未很好地适应无线传感器网络特点, 只能适用于小规模部署.

随着全球卫星定位系统(GPS)技术以及节点定

位技术^[4-7]的发展与成熟, 一类基于地理位置信息的无线传感器网络路由协议得到迅速发展. 以地理位置信息作为辅助, 贪婪机制被引进路由算法设计中, 并衍生出众多的基于贪婪机制的地理位置路由协议, 极大促进了无线传感器网络路由协议的发展.

贪婪路由转发模式选择一定的标准, 可以是距离、能耗、跳数等, 或者是多种因素的综合, 节点在进行下一跳选择时, 根据既定标准选择最优的邻居节点进行转发. 例如, 以距离为标准时, 转发节点总是选择距离目的节点最近一跳邻居节点作为下一跳. 贪婪模式是一类分布式算法, 只要求节点了解其一跳邻居节点的位置信息, 具有通信、计算、存储开销代价的优点, 非常适应无线传感器网络的特点. 然而, 与任何基于贪婪机制的算法一样, 局部最优问题是贪婪模式不可回避的难题之一. 在路由技术中, 局部最优问

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60602061, 60803131).

作者简介: 喻嘉(1977-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络、网络安全等研究; 赵宏(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 从事分布式多媒体、网络管理等研究.

题又被称为路由空洞问题^[8-9]. 当无节点区域的范围超过节点通信半径时, 就可能出现路由空洞问题, 即某一节点本身优于其所有邻居节点, 这类节点被称为路由空洞节点.

一类解决路由空洞问题的思路是: 在路由选择碰到空洞节点时, 借助某种非贪婪机制帮助路由选择跳出局部最优, 再选择适当的时机恢复使用贪婪模式. 使用非贪婪机制的转发模式统称为恢复模式. 在不同的恢复模式方案中, 周边转发模式是一类最主要的恢复模式, 其典型代表 GPSR 算法^[10]利用相关临近图 (RNG) 将网络拓扑平面化, 再依据右手原则沿空洞边缘进行转发. 随后的改进算法^[11-13]主要集中于平面图优化及分布式构造. 这一类算法由于无需事先感知空洞的具体信息, 路由中的控制开销相对较低, 但是在碰到空洞节点之后才设法绕过空洞, 在路径上产生了迂回, 路径长度存在较大优化空间.

另一类算法致力于路由空洞的显式检测和标识, 以期提前避免路由选择陷入局部最优. Fang 等人^[14]使用 TENT 算法检测和标识空洞节点, Chou 等人^[15]给出了更为精确的检测算法. 然而, 仅仅避开空洞节点并不能保证贪婪模式不陷入局部最优, 尤其是空洞的形状是凹多边形时. 因此, 广义局部最优节点的概念被提出, 用以描述那些必定引导路由选择进入局部最优的节点. 通过定义节点的转发代价^[16], 或者设定节点的虚拟坐标^[17]等方法, 能够在一定程度上帮助贪婪路由选择更加平滑的绕过路由空洞. 然而, 现有的算法由于不能精确检测和标识全部广义局部最优节点, 不能完全避免局部最优问题, 只能在一定程度上降低路由陷入局部最优的危险. 此外, 此类算法对节点的计算和存储能力要求较高.

在以上两类算法中, 贪婪机制的参照物始终是最终目的节点, 而本文提出的分段贪婪模式借助适当的中间目标节点, 使得贪婪机制得以分段、全程实施. 形象地讲, 分段贪婪模式试图以“折线”方式绕开路由空洞, 到达最终目的节点, 既不要求事先了解空洞信息, 也不需要贪婪与恢复模式之间切换.

分段贪婪模式的核心在于如何确定适当的中间目标节点序列. 本文提出一种基于递归贪婪检测的中间目标节点确定方法, 并藉此构造出一种渐近最优的分段贪婪地理路由算法——SGR.

2 基于贪婪检测的渐近最优分段贪婪地理路由

2.1 算法原理

在介绍路由原理之前, 给出一些必要的定义.

定义 1 如果从节点 S 出发, 以节点 D 为目标

节点, 仅使用贪婪模式可以到达, 则称节点 S 到节点 D 之间是直接贪婪可达的, 记作: $S \rightarrow D$; 否则称节点 S 到 D 之间是非直接贪婪可达的, 记作: $S \infty D$.

定义 2 对于给定的节点序列 $M_0 M_1 M_2 \cdots M_n$, 其中: M_0 为源节点, M_n 为目的节点. 如果对于序列中任意的节点 M_i 和 M_{i+1} ($0 \leq i < n$), 都有 $M_i \rightarrow M_{i+1}$, 则称该序列是以 M_0 为源节点, M_n 为目的节点的分段贪婪节点序列. 其中: $M_1 M_2 \cdots M_{n-1}$ 为满足分段贪婪约束的中间目标节点序列, 用 $M(M_0, M_n)$ 表示.

基于以上定义, 给出构造源节点 S 与目的节点 D 之间中间目标节点序列 $M(S, D)$ 的一种递归方法, 形式化描述如下:

$$\begin{cases} M(S, D) = \emptyset, S \rightarrow D; \\ M(S, D) = M(S, M) + M, S \infty D \text{ 且 } M \rightarrow D. \end{cases} \quad (1)$$

递归公式 (1) 可理解为: 如果源节点与目的节点之间是直接贪婪可达的, 则不需要中间目标节点; 否则, 选取一个与目的节点之间直接贪婪可达的节点作为一个中间目标节点, 将命题转化为寻找源节点与该中间目标节点之间的中间目标节点序列. 重复上述过程, 直到找到某个中间目标节点, 使得源节点到该中间目标节点之间是直接贪婪可达的, 如图 1(a)~图 1(c) 所示. 根据定义 2 容易验证, 上述递归过程得到的中间目标节点序列满足分段贪婪约束, 如图 1(d) 所示.

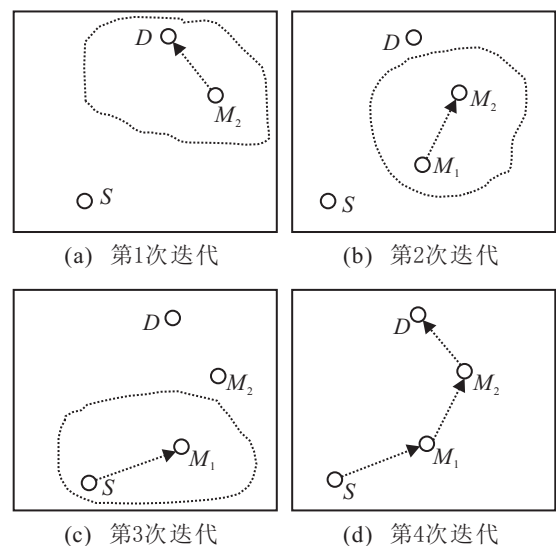


图 1 递归确定中间目标节点

为确定式 (1) 中合适的节点 M , 首先确定一条连接源节点 S 与目的节点 D 的探测路径, 在该探测路径上选取满足如下条件:

$$\begin{cases} M \rightarrow D, \\ d(M, D) > d(N, D), N \rightarrow D \end{cases} \quad (2)$$

的节点 M 作为中间目标节点, 即 M 是距离目的节点最远的一个与目的节点直接贪婪可达的节点. 其中 $d(\cdot)$ 表示节点间距离.

化是同步进行的;第2阶段路径探测结束,数据通过最优路径稳定传输.在第1阶段中,首个数据包是按GPSR算法投递的,在遇到空洞节点时分裂出路由探测包,再遇到空洞节点时继续分裂,形成一条数据传输路径与多条探测路径.源节点通过比较当前传输路径与已完成探测的探测路径长度,始终保持数据在当前最优的路径上传输,直到全部路径探测完毕或终止,得到一条最优传输路径.在第2阶段中,路由在中间目标节点的引导下,全程、分段使用贪婪模式进行数据传输.整个路由过程是渐近优化的,使得协议能够适应实时性要求较高的应用环境.

在路由路径方面协议具有以下特点:

1) 路由路径以GPSR协议路径为基础,总是截取路径上靠近目的节点一侧拟直线的部分,克服了GPSR协议为绕过路由空洞在源节点一侧产生的路径迂回问题,缩短了路径长度.

2) 中间目标节点总是位于空洞边缘,这是因为只有在周边模式才有可能产生中间目标节点,而周边模式是沿着空洞边缘进行转发的.从同一侧绕过路由空洞,中间目标节点越靠近空洞越有利于缩短路径长度.

3) 通过贪婪检测的方法确定的中间目标节点是与探测终点直接贪婪可达节点中距离最远的,有利于减少中间目标节点数量.

4) 在探测过程中遇到空洞节点时,协议同时从顺时针(右手法则)和逆时针(左手法则)两个方向进行探测,有利于发现更优的路径.

上述特点使得协议进入第2阶段后能够获得一条接近最优的路由路径.

在路由开销方面,进入第2阶段后路由采用分段贪婪模式,除进行贪婪下一跳选择外,不产生额外的开销,路由控制与计算开销主要集中在第1阶段.在第1阶段中,协议的路径探测是按需的,不产生路由表类协议的周期性全网广播.同时,路径探测以类GPSR协议为探测路由,不产生泛洪,引入的控制开销较小.而路径探测过程中的计算开销主要是进行拓扑平面化,这一过程只在遇到空洞节点后局部进行,既不需要全网平面化,也不在数据稳定传输的第2阶段进行,这样处理能耗较小.

3 仿真实验

在 $1000\text{m}\times 1000\text{m}$ 的仿真区域内随机分布2000个传感器节点,节点通信半径为40m.随机分布的场景通常只会产生较小的路由空洞,为了更好地分析路由算法应对空洞的能力,本文向场景中添加两类空洞:凸空洞和凹空洞,以构造复杂的网络环境.凸空洞为圆形空洞,以直径代表其大小.凹空洞为边长

为 a 的正方形,在一条边上向内凹陷一个长为 $a/2$,宽为 $a/3$ 的小长方形,以正方形边长 a 代表其大小.在确定了空洞类型、大小、数量的情况下,随机分布空洞的位置重复5次实验,在所有场景中统计全部节点对之间的路由情况,取平均值作为最终结果.

分段贪婪地理路由是一种贪婪路由与源路由相结合的模式,因此在仿真实验中选取了典型的贪婪地理路由GPSR协议,以及动态源路由DSR协议作为比较对象,从路径长度、通信开销等方面进行对比分析.

将某一路由算法产生的实际路由跳数与理论最优跳数的比值称为路径扩张率,作为衡量路径长度的指标,这一指标与端到端的延迟密切相关.图4~图7显示了在不同仿真场景中DSR, GPSR以及SGR三种算法的路径扩张率情况,其中SGR算法路径取稳定传输时的路径.由此可以看出,SGR算法在所有仿真场景中的路由路径都明显优于GPSR算法.这是因为GPSR算法采用周边模式绕过路由空洞时,会在靠近源节点一端产生迂回,而SGR算法总是截取靠近目的节点一端拟直线的路径.在路由空洞是凹空洞时,这种优势体现的得更加明显,是由于GPSR算法的平面模式是沿着空洞边缘行进的,而SGR算法路由以折线方式行进,得以避开凹陷部位.DSR算法由于采用泛洪方式探测路由,也可以获得较优的路由路径,但是为了减少通信开销,DSR算法采取了缓存机制,在一定程度上增加了路径长度.此外,DSR算法获得的较优路由路径是以大量通信开销为代价的,在下文中将进一步讨论.

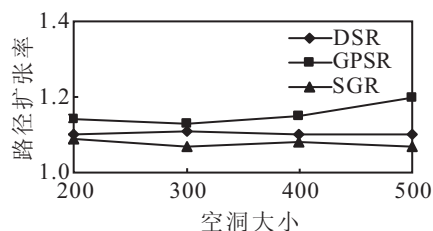


图4 两个凸空洞时的路径扩张率

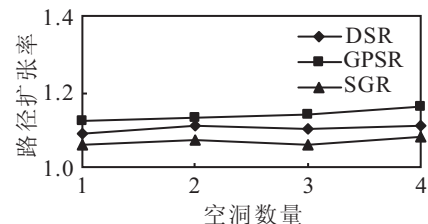


图5 凸空洞大小为300m时的路径扩张率

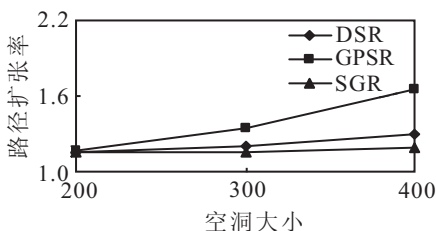


图6 两个凹空洞时的路径扩张率

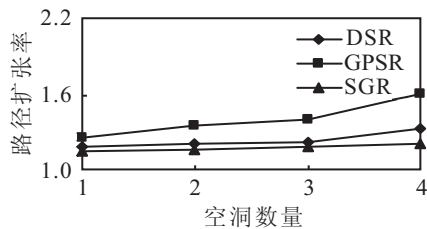


图7 凹空洞大小为 300 m 时的路径扩张率

为了从源节点向目的节点传输数据,不同的路由算法需要发送的报文总数可能是不同的.这除了与传输路径有关以外,主要与路由算法产生的探测报文数量有关.本文将一段传输过程中产生的报文总量与最优路径长度的比值作为衡量通信开销的指标.图8和图9显示了同一节点对之间连续30次通信的路由通信开销情况.对于GPSR算法而言,由于不存在探测开销,整体通信开销较低.而对于DSR算法而言,尽管存在缓存机制,泛洪方式仍然产生大量探测开销.SGR算法只在探测阶段产生探测开销,而且是路径长度的常数级别,当数据量较大时通信开销与GPSR算法基本相当,从图上看两条曲线基本重合.对于GPSR算法以及SGR算法,还存在周期性的信标交换(hello)报文,但由于交换周期较长,不会显著增加通信开销.

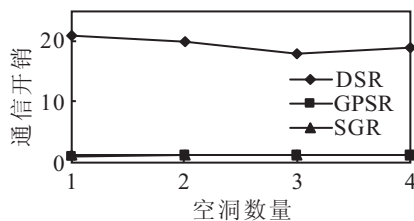


图8 凸空洞时的通信开销

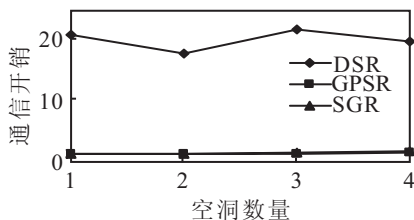


图9 凹空洞时的通信开销

通过以上分析可以看出,DSR算法以增大通信开销为代价获得了较小的路径扩张率,但在通信量较大时,大量的泛洪报文之间会发生冲突引起数据包丢失,造成吞吐量的降低,因此不适合在规模较大的传感器网络中部署.GPSR协议虽然没有引入额外的通信控制开销,但路由在绕过空洞时总是沿着空洞边缘行进,这会在空洞边缘节点处形成热点,形成吞吐量的瓶颈.SGR算法一方面以少量的探测开销获得了渐近最优的路由路径,另一方面避免了路由路径集中引起的热点问题,从而能够保证较高的吞吐量.

4 结 论

在解决无线传感器网络路由空洞问题时,主动探测空洞的具体信息容易导致大量的处理开销,被动地

绕过空洞又会导致路径长度增加,如何平衡路由开销与路径优化是一项挑战.本文采用的分段贪婪路由模式是贪婪路由与源路由相结合的模式,通过递归的贪婪检测过程获取了避开空洞的关键中间目标节点序列,结合源路由的形式,使得贪婪模式得以全程、分段使用.通过仿真实验验证,在存在不同大小、数量、类型空洞的情况下,SGR算法能以较小的控制开销获得接近最优的路由路径,从而较适用于复杂的无线传感器网络环境.

参考文献(References)

- [1] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing(DSDV) for mobile computers[C]. Proc of the ACM Sigcomm. London: ACM Press, 1994: 234-244.
- [2] IETF RFC3561. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[S].
- [3] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks[M]. Kluwer Academic: Mobile Computing, 1996: 153-181.
- [4] He T, Huang C, Blum B. Range-free localization schemes in large scale sensor networks[C]. 9th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. San Diego: ACM Press, 2003: 81-95.
- [5] Hu L, Evans D. Localization for mobile sensor networks[C]. 10th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. Philadelphia: ACM Press, 2004: 45-57.
- [6] Ssu K F, Ou C H, Jiau H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 1187-1197.
- [7] Ou C H, Ssu K F, Jiau H C. Range-free localization with aerial anchors in wireless sensor networks[J]. Int J of Distributed Sensor Networks, 2006, 2(1): 1-21.
- [8] Ahmed N, Kanhere S S, Jha S. The holes problem in wireless sensor networks: A survey[J]. Mobile Computing and Communications Review Archive, 2005, 9(2): 4-18.
- [9] Chen D, Varshney P K. A survey of void handling techniques for geographic routing in wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2007, 9(1): 50-67.
- [10] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]. Proc of the MOBICOM. Boston: ACM Press, 2000: 243-254.
- [11] Kuhn F, Wattenhofer R, Zollinger A. Worst-case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing[C]. Proc of the ACM MobiHoc. Annapolis: ACM Press, 2003: 267-278.