

无线传感器网络的地理路由算法综述^{*}

罗 坤 王建新 赵湘宁

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘 要 在无线传感器网络体系结构中,网络层的路由技术至关重要。地理路由算法由于其扩展性方面的优势逐渐成为无线传感器网络中的一个研究热点,近年来提出了很多地理路由算法。根据对现有算法的分析,把地理路由算法分为三类:基于平面化的地理路由算法、基于特征节点的地理路由算法和基于拓扑特性的地理路由算法。同时,针对具体的算法进行了探讨,分析了各个算法的优劣和性能、特点等。最后总结了该领域当前研究现状,并指出未来的研究策略与发展趋势。

关键词 无线传感器网络,路由算法,地理路由

Survey on Geographic Routing in Wireless Sensor Networks

LUO Kun WANG Jian-xin ZHAO Xiang-ning

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract In the architecture of Wireless Sensor Networks(WSN), routing technology is a very important issue. Geographic Routing is becoming a hot issue in WSN because of its scalability, and there are many algorithms proposed in recent years. We classified the geographic routing algorithm into three classes according existing algorithms: planarizing based algorithm, characteristic nodes based algorithm and topology based algorithms. We discussed concrete algorithms and analyzed the performance, characters of them. Finally, we summarized the current research work and pointed out the future research direction.

Keywords Wireless sensor network, Routing algorithm, Geographic routing

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)^[1,2]通过大量部署在监测区域内的传感器节点,采集网络覆盖区域内感知对象的信息,通过多跳的无线通信方式,将收集、处理后的信息提供给终端用户。作为一种新的信息获取方式和处理模式,无线传感器网络目前已成为国内外备受关注的研究热点。无线传感器网络与 Ad-Hoc 网络有一些相似之处,但也存在很多差别,比如无线传感器网络节点位置通常固定不动;节点数量庞大;传感器节点具有的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限。因此,传感器网络中的节点只能获取局部拓扑结构信息,路由协议必须在局部网络信息的基础上选择合适的路由。无线传感器网络的上述特点使得现有的固定网络和 Ad-Hoc 网络大部分路由协议都无法应用于无线传感器网络中。应用于无线传感器网络的路由算法逐渐成为一个研究热点,基于地理信息的路由算法(Geographic Routing)就是其中一类适用于无线传感器网络中的路由算法。

在传感器网络中,节点通常需要获取自身的地理位置信息,这样它采集的数据与位置信息结合之后才有意义。节点的地理位置信息可以通过定位算法或 GPS 定位系统获得。地理信息路由协议就利用这个特点,假设网络中每个节点能够获得自己的地理位置信息,同时知道目的节点的地理位置信息。节点利用这些地理位置信息作为路由的依据,按照一

定的策略把数据转发到目的节点。地理信息路由算法开销较小,除了保存自己和邻居节点的位置信息,几乎不需要其他的额外信息。地理信息路由算法的简单高效及低负载等特点,已经使其成为无线传感器网络中重要的一类路由协议。

在地理路由算法中,通过邻居节点之间的信息交换,每个节点可以掌握自己通信范围内一跳邻居节点的位置信息,并以此作为路由选择的依据。在地理路由算法中,贪婪转发(选择距离目的节点最近的邻居节点进行转发)由于其原理简单,计算复杂度很低,并且生成的路径接近最优路径等特点,成为各种转发策略中最常用的算法。

但在实际的传感器网络中,由于网络部署不均匀或是部分传感器节点由于故障或者能量耗尽而失效,还有一些环境如沼泽、水塘,本身就不适合部署传感器网络,会形成天然的“空洞”。在依据贪婪算法转发数据包的过程中,数据包可能会到达没有任何邻居节点比自身更接近目的点的区域,导致数据无法继续传输,影响了数据的成功到达率。

除了路由空洞外,传感器网络中还存在节点位置不精确的问题。在无线传感器网络的某些应用环境中,比如室内环境不能使用 GPS 定位;同时,定位算法并不能得到网络中节点的精确信息,导致一些基于节点精确信息的路由算法无法进行正确的路由。

针对传感器网络的特点和存在的路由空洞、节点位置不精确等问题,地理路由算法不断地从保证分组到达率、减少路

^{*}湖南省杰出青年基金(No. 06JJ10009),国家自然科学基金(No. 60673164),新世纪优秀人才支持计划(No. NECT-05-0683),高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20060533057)。罗 坤 硕士研究生,主要研究领域为无线传感器网络的地理位置路由协议;王建新 博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、网络优化理论、无线传感器网络;赵湘宁 硕士研究生,主要研究领域为无线传感器网络的地理位置路由协议。

径长度、减小算法开销等多个方面进行改进。本文根据算法应用的方法将现有的地理路由算法分为三类：基于平面化拓扑结构的地理路由算法、基于特征节点的路由算法和基于拓扑特性的路由算法。

本文将在第 2 节详细介绍基于平面化的地理路由算法，结合该类具体算法总结它的特点；第 3 节主要介绍基于特征节点的地理路由算法；将在第 4 节介绍基于拓扑结构的地理路由算法；最后总结地理路由算法的特点，并指出地理路由算法现在面临的问题和未来的研究趋势、发展方向。

2 基于平面化的地理路由算法

基于平面化的地理路由算法是一类基于网络平面图进行数据转发的地理路由。此类算法需要网络平面图的支持，即将网络通过平面化算法，形成由网络节点组成的不存在交叉链路的面。

基于平面化拓扑结构的地理路由算法通常具有两种路由转发模式：贪婪转发和边缘转发模式。贪婪转发是基本的转发模式。当贪婪转发遇到路由空洞而失效的时候，就转入边缘转发，遍历临近的平面子图，直到到达比路由空洞节点更接近于目的地的节点为止，然后转换到贪婪路由。这种贪婪-面-贪婪的路由转发模式能够有效地绕过路由空洞，保证数据的可靠传输。不同的基于平面化的地理路由算法采用不同的圆周切换机制。依据网络是否满足 UDG 假设可将其分为基于 UDG 假设的平面化地理路由算法和网络不满足 UDG 的平面化地理路由算法两类。

2.1 基于 UDG 假设的平面化地理路由算法

基于 UDG 假设的平面化地理路由算法的算法有：GFG^[4]，GPSR^[5]，GOAFR+^[6]，GLNFR^[8]等。在满足 UDG 假设的理想网络中，网络的平面化拓扑图可以通过 GG^[9]和 RNG^[10]平面化算法构造，二者都易于用分布式算法构造。在文献[5]提出的 GPSR 协议中，平面化算法就采用了 GG 和 RNG 两个平面化算法。

GPSR 协议是一个典型的基于平面化的地理路由协议。在路由初始阶段，包的转发采用贪婪转发。当在转发过程中遇到路由空洞时，在当前节点开始进行边缘转发。GPSR 按照右手法则进行边缘转发，选择顺时针或逆时针方向沿着面转发数据。若当前节点检测到在当前面中即将要遍历的一条边与空洞点和目的节点之间的边相交时，就进行平面切换，转至当前节点所在的下一个邻接平面中转发数据。由于 GPSR 算法在选择了一个转发方向之后，就持续地沿此方向进行边缘转发，若转发时遇到一个较大的面，一旦选错了转发的方向，就可能比选择正确方向的路径多出较多的跳数。

在 GPSR 算法之后，有很多改进的算法来优化路由长度，比如 AFR^[15]，GOAFR^[16]，GOAFR+^[6]等。文献[6]提出的 GOAFR+ 算法就是其中性能最好的一个算法。在开始阶段，GOAFR+ 随机选择一个方向开始边缘转发数据，但是不同于 GPSR 算法持续地在一个面中沿同一个方向转发。GOAFR+ 算法保持检测是否沿该方向转发后，数据虽然沿着一个面已经绕得很远，但仍然离目的节点没有明显的正向前进距离。此时，该算法就将数据包撤回，并沿另外一个方向进行边缘转发。通过这样的路径选择机制，GOAFR+ 保证数据转发的平均路由跳数不超过最优化平均路径跳数的某一确定常数倍。

平面化算法除了使用 GG 和 RNG 算法之外，还有其它的算法，比如 Delaunay 三角剖分。文献[8]提出的 GLNFR 是

一种新型的用于发现移动节点间通信路径的在线路由算法。它利用局部构造法，构造出局部化的 Delaunay 三角剖分作为网络的基础拓扑。在该网络拓扑中进行的 GLNFR 路由算法可以保证节点间分组顺利传输，对网络变化具有更好的可扩展性和适应性。

2.2 网络不满足 UDG 的平面化地理路由算法

在实际的网络环境下，比如应用于森林中的传感器网络，地理位置信息不精确或者障碍物的出现在很大程度上影响了地理路由算法的性能。此时运用 GG 或 RNG 算法构造平面化算法，会导致平面化的过程中删掉不该删除的链路或者导致不对称链路的产生^[11,12]，从而造成网络的不连通。

CLDP^[13]算法是目前提出唯一能适用于不满足 UDG 条件网络的平面化拓扑结构的地理路由算法。该算法对网络中的每条链路都发送探测包，等待探测包返回之后，确定在去除某条边不影响网络连通性的情况下才将该边删除，从而达到平面化。

CLDP 虽然能够保证边缘恢复机制在实际复杂的网络中能够正确地运行，但是每个节点对每一条链路都需要发探测包，开销相当大，平均每个节点在网络生存时间里大约需要发送几百到上千个数据包来进行和维持平面化过程。

文献[14]针对 CLDP 算法在网络初始化阶段对网络的结构进行平面化，从而导致开销较大的缺陷得到改进。算法在初始化节点并不进行平面化，当在路由过程中遇到路由回路时，才进行局部 CLDP 平面化，来继续数据传输。LCR 算法不仅能在非 UDG 网络中保证数据的可靠传输，并且 LCR 在平面化过程中的开销比 CLDP 算法降低两个数量级。

根据上面介绍的基于平面化拓扑结构的路由算法，我们将该类算法做一比较，如表 1 所示。

表 1 基于平面化拓扑结构算法的比较

路由算法	平面化算法	圆周切换	性能	缺点
GPSR	GG/RNG	当圆周路由中的节点比贪婪路由失败的节点距离目的节点近时，切换到贪婪路由	和 DSR 相比，GPSR 在路由长度和算法代价上占优	依赖 UDG 图
AFR	GG/RNG	在路由过程中，圆周之间的切换是根据源节点和目的节点的连线和圆周的交点	最坏情况下，AFR 的路由长度很小	依赖 UDG 图
GOAFR	GG/RNG	通过一次圆周遍历选择当前圆周中离目的节点最近的点进行切换	保证平均情况和最坏情况下路由的性能	依赖 UDG 图
GOAFR+	GG/RNG	圆周切换是通过遍历圆周时记录的两个参数决定	保证节点转发到离 Local Minimal 很远时切换，路由长度很小	依赖 UDG 图
GLNFR	LDel	路由使用 GLNFR 算法，它结合了贪婪转发和圆周转发	代价相对于 GG 和 RNG 等算法较小	依赖 UDG 图
CLDP	CLDP	当圆周路由中的节点比贪婪路由失败的节点距离目的节点近时，切换到贪婪路由	不需要 UDG 假设，因此可用于实际的网络	代价太高
LCR	CLDP	初始阶段不进行平面化，只有当路由遇到回路时才使用 CLDP 算法局部平面化	算法代价很小，并且代价比 CLDP 小	路由长度变大

基于平面化拓扑结构的路由算法使用图论的最短路径和连通的概念来发现路由，可以高效地解决传感器网络中的路

由空洞问题。然而它也具有一定的局限性,最主要方面在于为了避免在沿边缘转发时产生路由回路,它需要平面化网络拓扑的支持。平面化的拓扑图在网络满足 UDG 条件下易于构造。在无法满足 UDG 网络的条件下,要构造准确的平面化拓扑图相对复杂,而且开销较大。

3 基于特征节点的地理路由算法

在无线传感器网络的某些应用环境中,传感器节点无法获得自身的精确地理位置信息,比如在室内环境下或者森林中,GPS 定位系统并不能正常工作,而定位算法并不能满足有些应用的精度要求。当各个节点的位置未知的情况下,上述基于平面化的地理路由不能正常工作。这时,路由工作往往需要一些特征节点的辅助,比如在网络中设置特殊的信标节点,或者找到网络中的中轴节点等信息。基于特征节点的地理路由算法主要包括 GLIDER^[17] 及其改进算法^[18-20]、MAP^[21] 等。

文献^[17]提出的 GLIDER 算法的主要思想是通过信标节点(landmark node)辅助完成路由。信标节点是一些经过选择的特殊节点,和普通的传感器节点不同,信标节点知道自身的地理位置信息,而且信标节点必须均匀地分布在整个网络中。GLIDER 算法就是通过这些分散性较好的信标节点构成网络的全局拓扑,然后根据网络中各个节点相对于最近的信标节点的跳数构建网络的 LVC(Landmark Voronoi Complex)。LVC 会把整个网络划分为不同的小区域,每个小区域都是以信标节点为中心,从而构成了网络的局部拓扑。在每个区域中的节点的命名都包含如下三个部分:系统初始化时唯一的 ID 号、一个距离自己最近的信标节点 ID 号、该节点到其它信标节点的跳数距离信息。在路由选择的时候,首先通过信标节点建立起全局拓扑,寻找本地信标节点区域到目的信标节点区域的路径;当包到达了目的信标节点区域之后,可以根据目的节点的命名通过局部贪婪或泛洪的方法到达目的节点。

GLIDER 算法在负载均衡以及开销等性能方面较好,但是其最大的困难就是信标节点的选择,其中包括信标节点的数量和具体位置。信标很多可以明确地表示网络拓扑,但是开销会很大,而过少又会影响算法的性能。所以,信标节点的选择是一个值得讨论的问题。

在基于 GLIDER 算法的改进中,有些算法专门解决信标节点的选择问题,比如文献^[19]提出的 GLDR 路由算法就采用了 r-sample 算法。r-sample 算法是一个分布式算法,它的基本思想是在网络中随机地选择一个节点作为信标节点,然后把其 r 跳邻居都标记为普通节点,之后按照同样的方法再选择其它信标节点,直到信标节点覆盖整个网络。

文献^[20]提出的 MGGR 算法也是一种基于信标节点的地理路由算法。和 GLIDER 不同,MGGR 在信标节点的数量上要比 GLIDER 多。通过多信标节点,把网络分为很多小块,然后在全局路由中在小块之间进行贪婪路由,而不用记录全局信标节点的信息。它同时结合了 GPSR 的思想来保证路由的性能。

文献^[22]提出的 BVR 算法也是通过特殊的节点来辅助路由。BVR 算法选择的特征节点为 Beacon 节点,它通过普通节点与 Beacon 节点之间的距离建立了一个虚拟坐标系。

除了选择特殊节点之外,地理路由算法还可以使用其它的特征节点。文献^[21]提出的 MAP 算法就是借助二维图形

的中轴(Medial Axis)节点完成路由。中轴的节点到二维图形最短距离的点至少有两个,中轴就相当于网络的轮廓,可以表示全局的拓扑,MAP 算法就是根据中轴的这一特性提出的一种新的地理路由算法,在开始阶段需要它通过泛洪找到所有的边界节点,然后边界节点进行二次泛洪,根据节点到边界节点的跳数确定网络的中轴,从而建立 MAG(Medial Axis Graph)图来表示整个网络的全局拓扑。在路由阶段,节点根据建立的 MAG 图模仿曼哈顿路由算法进行路由,包的转发沿与中轴线平行的路径进行。当转发到目的区域时,再以目的区域的中轴节点为根的生成树中进行本地路由,从而找到目的节点。

表 2 基于特征节点的地理路由算法

路由算法	特征节点	特征节点的选择	算法性能
GLIDER	Landmark node	为了保证算法性能,手动选择信标节点的数量以及放置的位置	保证数据包成功传输、负载均衡和路由长度,而且开销不大,仅为 $O(n \log n)$ (n 为节点数量)
MAP	Medial Axis	中轴节点是通过两次泛洪得到的,第一次泛洪可以确定边界节点,第二次泛洪获得中轴节点	MAP 的路由模仿曼哈顿路由,在路由长度和负载均衡等方面具有很好的性能;但是在中轴节点的选择上使用两次泛洪,开销过大
BVC	beacon	beacon 节点通过在网络中随机选择	结合了贪婪路由的思想,能够保证路由长度和数据包的成功传输,且能动态适应网络的变化;但 beacon 的选择仍然是一个问题。
GLDR	Landmark node	使用分布式的算法 r-sample 选择信标节点	除了采用分布式的信标选择算法,GLDR 还结合贪婪路由,减小了路由长度
MGGR	Landmark node	和 GLIDER 选择信标节点的标准不同,MGGR 要求尽量多的选择信标节点	MGGR 结合了 GPSR 的思想,信标节点之间的路由使用贪婪路由和圆周围路由结合的方法

基于特殊节点的地理路由算法都会从网络中寻找特殊节点,比如信标节点、中轴节点等。这类算法不需要每个节点的具体地理位置信息,也不需要 UDG 假设,可以适用于任何的网络环境,比如室内或者室外等。同时,该类算法负载均衡较好,能避免出现负载过重的区域影响整个网络的性能。信标的思想也用到了无线传感器网络的信息存储和提取上^[18]。但是该类算法一般都没有考虑网络拓扑发生变化时的情况,比如新的传感器节点的加入或者某些节点由于能量耗尽而失效等情况。

4 基于拓扑特性的地理路由算法

针对传感器网络中节点地理位置不太精确的情况,地理路由算法研究除了使用特征节点以外,还有另外一个研究方向,就是基于拓扑特性的路由算法。这类算法一般通过构造生成树、亏格嵌入、定位边界等方法,建立具有拓扑特征的结构来辅助地理路由。最近,基于拓扑特征的地理路由的研究越来越多,其中提出的算法包括 GEM^[23],RTS^[24],BOUND-HOLE^[25],NEAR^[27]等。

文献^[23]提出了一种基于拓扑特征的地理路由算法:GEM 算法。GEM 路由是一种适用于数据中心存储方式的地理路由,它的基本思想是建立一个虚拟极坐标系(Virtual Polar Coordinate System)。这样,网络中的每个节点形成一个以汇聚节点为根的带环树(ringed tree),每个节点用到树根的跳数距离和角度范围来表示,节点间的数据路由通过这个带环树实现。

在路由过程中, GEM 使用 VPCR (Virtual Polar Coordinate Routing) 路由算法。节点在发送消息时, 如果目的节点的角度不在自己的角度范围内, 就将消息传送给父节点。父节点按照同样的规则处理, 直到该消息到达源节点和目的节点的共同祖先。消息再从这个节点向下传送, 直到到达目的节点。

GEM 算法依赖于生成树的建立, 之后也有很多通过构造生成树辅助路由的算法, 比如文献[26]提出的 GDSTR 算法, 它是通过建立 hull tree 的方法来辅助路由。但是这类算法都存在开销大的缺点, 而且当网络发生变化时, 树的调整开销很大。

文献[24]提出的 RTS 算法引入了亏格的概念, 亏格是闭合曲面上的空洞。RTS 的主要思想是选择含有亏格(可以含有一个亏格, 也可以含有多个亏格)的闭合曲面作为基础图, 然后把整个网络嵌入到这个闭合曲面拓扑中。嵌入之后的拓扑图可以消除交叉链路, 在路由过程中也不会产生回路。RTS 算法在路由长度和代价方面都有很好的性能, 而且不仅可以用于二维的拓扑, 也适用于三维的网络中。但是当节点密度很大时, 每个节点相连的链路也比较多, 这时即使亏格很多也无法消除所有的交叉链路。

除了以上几种算法, 基于拓扑特性的地理路由算法还包括 BOUNDHOLE^[25], NEAR^[27] 等, 这两种算法都要定位网络中的空洞信息, 然后根据这些信息绕开空洞或者对含有空洞的拓扑进行整形。表 3 给出了基于特征节点的地理路由算法的比较。

基于拓扑特征的地理路由算法一般在开销、路由长度等性能方面占据优势, 但是这类算法还不成熟, 仍然存在很多问题。比如基于生成树的地理路由算法在适应网络拓扑变化方面很差。而 RTS 算法在网络节点密度很大的情况下就不能很好地完成路由工作; 而 NEAR 算法仍然需要 UDG 假设等。这些局限性使得该类算法无法应用到实际的无线传感器网络中。

表 3 基于拓扑特征的地理路由算法

路由算法	拓扑特征	方法	算法性能
GEM	Tree	根据生成树建立虚拟极坐标系统	当网络拓扑发生变化时, 树的调整非常复杂
GDSTR	Hull tree	使用分布式算法建立生成树, 在路由过程中结合贪婪路由	开销小于 CLDP, 同样, 当网络拓扑发生变化时, 树的调整也非常复杂
RTS	亏格	把网络中的链路, 通过图旋转方法嵌入到含有亏格的拓扑上, 消除交叉链路	开销、路由长度以及适应拓扑变化等性能较好, 当链路很多时, 不能消除所有的交叉链路
BOUND HOLE	边界	使用 TENT 法则判断阻塞节点, 提出了绕开阻塞节点的算法 BOUNDHOLE	路由长度得到改善, 节点的通信距离对算法的影响不大
NEAR	边界	NEAR 算法对边界节点进行维数转化, “消除”凸起节点, 减小路由长度	NEAR 算法优化了路由长度, 但它依赖于 UDG 假设, 当障碍物出现时, 影响算法的性能

结束语 地理路由算法是无线传感器网络中一个重要的路由算法。通过对当前的各种地理位置路由算法的分析和总结, 把地理路由算法分为三类: 基于平面化的地理路由算法、基于特征节点的地理路由算法和基于拓扑特征的地理路由算

法。这三类算法使用的方法各不相同, 而且在具体性能上有不同的侧重点。基于平面化的地理位置路由主要工作放在减少路由长度, 减小路由开销等方面; 基于特征节点和基于拓扑特征的地理路由主要改善其扩展性以及负载均衡等性能。从上述的分析可以看出, 地理路由算法在路由长度、开销、负载均衡、扩展性等方面做了大量的工作, 但目前的研究中有些存在着模型过于理想化、对网络性能的综合考虑较少等问题。虽然地理路由方面的研究已经开展多年, 但还很少有算法可以应用到真实的网络环境中。所以, 在近阶段地理路由仍然是无线传感器网络领域中的一个研究热点。

通过对地理路由算法的深入研究, 我们认为如下几个方面将成为地理路由算法研究热点。

(1) 基于平面化的地理路由算法是最早提出的一类地理路由算法, 在该类算法的研究中主要包括平面化和圆周切换两方面的工作, 而圆周切换的研究已经非常成熟而且性能很好。那么在该类中的研究主要是改进平面化算法, 比如非 UDG 假设的平面化算法、按需平面化(在出现路由回路时才进行局部平面化)等。另外, 如何减少数据包在路由过程中遇到空洞的次数, 尽量保证使用贪婪路由, 也是一个很好的研究方向。

(2) 基于特征节点的地理路由和基于拓扑特征的地理路由算法在扩展性、网络动态变化时的调整等方面占据优势, 而且不需要 UDG 假设, 非常适合无线传感器网络。在这种非平面化的地理路由上有很多值得研究的地方, 比如在每个节点中保存一定的拓扑信息。这样, 在当前节点就可以判定是否会发生阻塞现象, 从而提前绕开空洞, 减小路由长度。另外, 自适应的地理路由算法也是一个很好的研究方向, 比如如何使节点根据自己的需求自适应地选择一条较好的路径进行数据包的转发。

(3) 在应用场景上, 地理路由也在不断地发展。在以前的路由算法中, 一般考虑的都是二维平面网络。在实际中, 需要考虑三维的地理位置信息, 比如在山岭等海拔起伏较大的地区散布传感器节点以探测环境信息等。可以看出, 无线传感器网络的应用不仅仅限于二维, 大部分的应用都是三维环境, 所以研究适用于三维网络的路由协议将成为当务之急。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102-114
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [3] Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass routing on geometric networks // Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry. Vancouver, Canada, August 1999
- [4] Bose P, Morin P, Stojmenovic I, et al. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. Wireless Networks, 2001, 7(6):609-616
- [5] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks // Proceedings of the 6th ACM International on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Boston, MA, 2000:243-254
- [6] Kuhn F, Wattenhofer R, Zhang Yan, et al. Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice // Proceedings of PODC 2003. Boston: ACM Press, 2003: 63-72
- [7] Leong B, Mitra S, Liskov B. Path vector face routing: Geographic routing with local face information // Proceedings of ICNP.

- Boston; IEEE Press, 2005; 147-158
- [8] 贺鹏, 李建东, 陈彦辉, 等. 基于Delaunay三角剖分的Ad Hoc网络路由算法. 软件学报, 2006; 49-54
- [9] Gabriel K R, Sokal R R. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology*, 1969; 259-278
- [10] Toussaint G. The relative neighborhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 1980; 261-268
- [11] Seada K, Helmy A, Govindan R. On the effect of localization errors on geographic face routing in sensor networks // Proceedings of the Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). ACM Press, 2004; 71-80
- [12] Kim Y J, Govindan R, Karp B, et al. On the pitfalls of geographic face routing // Proceedings of DIAL-M-POMC. ACM Press, 2005; 34-43
- [13] Kim Y J, Govindan R, Karp B, et al. Geographic routing made practical // Proceedings of NSDI 2005. CA; ACM Press, 2005; 217-230
- [14] Kim Y J, Govindan R, Karp B, et al. Lazy Cross-Link Removal for Geographic Routing // Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder: ACM Press, 2006; 112-124
- [15] Kuhn F, Wattenhofer R, Zollinger A. Asymptotically optimal geometric mobile ad-hoc routing // Proceedings of the of the 6th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (Dial-M). ACM Press, September 2002; 24-33
- [16] Kuhn F, Wattenhofer R, Zollinger A. Worst-Case Optimal and Average-case Efficient Geometric Ad-Hoc Routing // Proceedings of the 4th ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2003
- [17] Fang Q, Gao J, Guibas L, et al. GLIDER: Gradient landmark-based distributed routing for sensor networks // Proc. of the 24th Conference of the IEEE Communication Society (INFOCOM). volume 1, March 2005; 339-350
- [18] Fang Qing, Gao Jie, Guibas L J. Landmark-based Information Storage and Retrieval in Sensor Networks // Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). 2006
- [19] Nguyen A, Milosavljevic N, Fang Qing, et al. Guibas. Landmark Selection and Greedy Landmark_descent Routing for sensor Networks // Proceedings of the 26th Conference of the IEEE Communication Society (INFOCOM). 2007
- [20] Funke S, Milosavljevi'c N. Guaranteed-delivery Geographic Routing Under Uncertain Node Locations // Proceedings of the 26th Conference of the IEEE Communication Society (INFOCOM). 2007
- [21] Bruck J, Gao J, Jiang A. MAP; Medial axis based geometric routing in sensor networks // Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCOM). 2006; 88-102
- [22] Fonseca R, Ratnasamy S, Culler D, et al. Beacon vector routing: Scalable point-to-point in wireless sensor networks. IRB-TR-04-012. Berkeley: Intel Research, 2004; 1-14
- [23] Newsome J, Song D. GEM; graph EMBEDding for routing and data-centric storage in sensor networks without geographic information // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, California, USA, November 2003
- [24] Zhang Fenghui, Li Hao, Jiang Anxiao A, et al. Face Tracing-based Geographic Routing in Nonplanar Wireless Networks // Proceedings of the 26th Conference of the IEEE Communication Society (INFOCOM). 2007
- [25] Fang Q, Gao J, Guibas L. Locating and Bypassing Routing Holes in Sensor Networks // Proceedings of the 23th Conference of the IEEE Communication Society (INFOCOM). 2004
- [26] Leong Ben, Liskov B, Morris R. Geographic Routing without Planarization // Proceedings of the 3rd Symposium on Network Systems Design and Implementation (NSDI 2006). San Jose, CA, May 2006
- [27] Arad N, Shavitt Y. Minimizing Recovery State in Geographic Ad-Hoc Routing // Proceedings of the 7th ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2006

(上接第5页)

- [34] Vitter J S, Wang M, Iyer B. Data Cube Approximation and Histograms via Wavelets // Proc. of the 7th ACM Intl Conf. on Information and Knowledge Management. Bethesda MD USA, 1998
- [35] Vitter J S, Wang M. Approximate Computation of Multidimensional Aggregates of Sparse Data Using Wavelets // Proc. of the ACM SIGMOD Intl Conf. on Management of Data. Philadelphia, Pennsylvania, US, 1999
- [36] Matias Y, Vitter J S, Wang M. Dynamic Maintenance of Wavelet-based Histograms // Proc. of the 26th Intl Conf. on Very Large Data Bases. Cairo, Egypt, 2000
- [37] Wu Yi-Leh, Agrawal D, Abbadi A E. Using Wavelet Decomposition to Support Progressive and Approximate Range-Sum Queries over Data Cubes // Proc. of 2000 ACM Intl Conf. on Information and Knowledge Management. McLean, VA, USA, 2000
- [38] Barbara D, Wu Xintao. Loglinear-based quasi cubes. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2001, 13(3); 255-276
- [39] Shanmugasundaram J, Fayyad U, Bradley P S. Compressed Data Cubes for OLA PAggregate Query Approximation on Continuous Dimensions // Proc. of the 5th ACM SIGKDD Intl Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. San Diego, CA, USA, 1999
- [40] Cuzzocrea A. Improving range-sum query evaluation on data cubes via polynomial approximation. *Data & Knowledge Engineering*, 2006, 56(2); 85-121
- [41] Cuzzocrea A. Overcoming Limitations of Approximate Query Answering in OLAP // Proc. of the 9th Intl Database Engineering & Application Symposium. 2005
- [42] Cuzzocrea A, Wang Wei. Approximate range-sum query answering on data cubes with probabilistic guarantees. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2007, 28(2); 161-197
- [43] Chen Yixin, Dong Guozhu, Han Jiawei, et al. Multi-dimensional regression analysis of time-series data streams // Proc. of the 28th Intl Conf. on Very Large Data Bases. Hong Kong, China, 2002; 323-334
- [44] Chen Yixin, Dong Guozhu, Han Jiawei, et al. Online Analytical Processing Stream Data: Is It Feasible? // ACM SIGMOD Workshop on Research Issue in Data Mining and Knowledge Discovery. Madison, Wisconsin, USA, 2002
- [45] Han Jiawei, et al. Stream Cube: An Architecture for Multi-dimensional Analysis of Data Streams. *Distributed and Parallel Databases*, 2005, 18(2); 173-197
- [46] Liu Chao, Zhang Ming, Zheng Minrui, et al. Step-by-Step Regression: A More Efficient Alternative for Polynomial Multiple Linear Regression in Stream Cube // Proc. of the 7th Pacific-Asia Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. Seoul, Korea, 2003
- [47] Orlando S, Orsini R, Raffaeta A, et al. Spatio-Temporal Aggregations in Trajectory Data Warehouses // Proc. of the 9th Intl Conf. on Data Warehousing and Knowledge Discovery. Regensburg, Germany, 2007
- [48] Hershberger J, Shrivastava N, Suri S, et al. Adaptive Spatial Partitioning for Multidimensional Data Streams. *Algorithmica*, 2006, 46(1); 97-117
- [49] Hu Kong-fa, Ling Chen, Jie Shen, et al. Computing High Dimensional Mola Pwith Parallel Shell Mini-cubes // Proc. of the 2nd Intl Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Changsha, China, 2005