

无线网络节点的均匀性度量^①

周 全^② * ** *** 朱红松 * ** 罗海勇 * 徐勇军 * 李晓维 *

(* 中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

(** 中国科学院研究生院 北京 100039)

(*** 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 考虑到无线传感器网络定位精度除受节点密度和覆盖程度影响外,锚节点分布的不均匀性是一个重要影响因素,对基于近似偏差的网络节点分布均匀性度量方法进行了改进,提出了定量描述锚节点均匀程度的 Gabriel 图和 Voronoi 图相结合的均匀性测度 (GVGUM) 方法,GVGUM 方法使用 Gabriel 边表征节点的疏密,使用 Voronoi 单元的面积表征节点控制区域的大小,比基于近似偏差的方法能更好地表征节点的均匀程度。

关键词 无线传感器网络,均匀度,近似偏差,GVGUM

0 引言

以往关于无线传感器网络节点拓扑特性的研究主要集中在节点的密度、节点的覆盖程度等指标上,很少研究节点分布的均匀程度对拓扑控制、通信路由和定位跟踪算法的影响。然而,大家都很直观地感觉到均匀程度和节点密度一样,对网络协议等很多方面有重要影响。显而易见,在平均密度相同的情况下,锚节点均匀分布的网络具有较好的定位效果,反之较差。无法定量地描述均匀度,成为基于均匀程度优化网络的瓶颈。究其本源,均匀程度是一个比密度和覆盖程度都复杂的概念。密度是简单的数量除以体积;覆盖程度由覆盖范围表示。而均匀程度的大小比较难定量表达。本文尝试用 Gabriel 图和 Voronoi 图 (Voronoi diagram, VD) 相结合的均匀性测度 (Gabriel-Voronoi graph based uniformity metric, GVGUM) 对节点的均匀程度进行定量描述。

基于偏差的均匀度描述方法^[1]是笔者能够找到的描述均匀度的唯一方法,它使用稀疏性偏差、密集性偏差和自偏差描述节点的均匀度。该方法的基本思想是使用填充圆的半径表示节点之间的最大空隙。经过研究发现,Gabriel 图内的 Gabriel 边同样是填充圆的直径。因此,本文对基于偏差的均匀度描述方法进行改进和扩充,提出了 GVGUM 方法。

GVGUM 方法主要做了以下三个方面的重要修正和补充:(1)使用 Gabriel 边计算最大、最小空穴半径,避免以暴力搜索的方式计算 f 距离和 g 距离;(2)修正最大空穴半径的计算方法,采用 Gabriel 多边形的最大填充圆直径或者最长的 Gabriel 边作为最大空穴半径 r_{\max} ,从而使稀疏偏差 D_s 更加精确;(3)补充 Voronoi 单元的面积作为偏差的指标,反映每个节点覆盖的范围,更加全面地描述局部的疏密程度。

1 相关研究

本节介绍 GVGUM 相关的基于偏差的均匀性度量 and 邻接图相关背景研究,以及它们在传感器网络技术领域的使用情况。

1.1 近似偏差

胡东红等人^[1]根据王元、方开泰提出的均匀性判定准则,定义了节点间 f 距离、 g 距离和理想布点情况下的标准半径,由此定义了最大空穴半径和最小孔穴半径,并提出了近似偏差 (discrepancy) 的均匀度准则:以密集性偏差 (dense discrepancy)、稀疏性偏差 (sparse discrepancy) 和自偏差 (self discrepancy) 作为均匀度的度量测度。

假定 m 维空间 $C_m = [0, 1]$ 中有 n 个点 x_1, x_2, \dots, x_n , 其中任意一点 $x_i \in \{x_1, \dots, x_m\} \in C^m$, 则 $[0, x]$ 体积 $v(x_i) = x_1 x_2 \dots x_m$ 。假设落入 $[0, x]$ 中的

① 863 计划 (2006AA01Z223, 2006AA01Z225) 和自然科学基金 (60633060) 资助项目。
② 男, 1977 年生, 博士; 研究方向: 无线传感器网络, 嵌入式系统, SoC; 联系人, E-mail: zhouq0725@gmail.com (收稿日期: 2009-03-25)

点数为 n_x , 则定义

$$d(x_1, \dots, x_n) = \sup_{x_i \in C^m} \left| \frac{n_x}{n} - v(x_i) \right| \quad (1)$$

为 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 在 C_m 中的近似偏差。

1.1.1 近似偏差的物理意义

近似偏差的最大和最小半径 r_{\min} 和 r_{\max} 是指节点之间的空间内最大填充圆的直径。填充 $[0, 1]$ 空间的等半径球体之间是刚性点接触, 即使是最密堆积, 球与球之间仍然存在空隙。不同维数的空间具有不同的最紧堆积方式, 对应的最大堆积效率不相同。二维空间的最紧堆积是蜂窝形式的堆积, 堆积效率 K 到达 90.69%。三维空间中, 最紧堆积有两种: A3 型六方紧密堆积和 A1 型面心立方堆积, 堆积效率 K 都是 74.05%。自偏差与堆积效率线性相关。堆积效率越低, 自偏差越大(自偏差值 D 越小)。

1.1.2 近似偏差的定义

为了评估网络中节点的分布情况, 文献[2]给出了密集性偏差、稀疏性偏差、自偏差、最大空穴半径和最小空穴半径等参数的计算方法。通过节点之间的 f 距离和 g 距离, 可以分别计算 f 中心和 g 中心, 再计算出最小空穴半径 r_{\min} 和最大空穴半径 r_{\max} 。由空穴半径, 可以计算偏差和自偏差。

T_f 变换保证节点之间的距离在 m 维度空间的每一个维度上的距离大于 $1/2$, 若不大于 $1/2$ 就将其较小的位置加 1, 延拓到大于 1 的区域。同理 T_g 变换保证节点之间的距离在 m 维度空间的每一个维度上的距离小于 $1/2$, 若不小于 $1/2$ 就将其较小的位置加 1, 延拓到大于 1 的区域。 f 距离和 g 距离通过 T_f 和 T_g 变换后的点集得到, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \{r_f, s_f\} &= T_f\{r, s\} \\ \{r_g, s_g\} &= T_g\{r, s\} \\ f(r, s) &= \|r_f - s_f\|_2 \\ g(r, s) &= \|r_g - s_g\|_2 \end{aligned} \quad (2)$$

密集性偏差定义为

$$D_d = r_{\min}/R \quad (3)$$

稀疏性偏差定义为

$$D_s = R/r_{\max} \quad (4)$$

自偏差定义为

$$D = D_d \cdot D_s \quad (5)$$

1.1.3 近似偏差的使用

从上面的定义可以看出, 密集性偏差 D_d 、 C_d 用于评估稠密的程度; 稀疏性偏差 D_s 、 C_s 用于评估稀疏的程度; 自偏差 D 、 C 用于评估整个区域的疏密差

距。无线传感器网络中节点的均匀程度与定位算法的定位精度高度相关。胡东红等人^[3]根据物理学的势和力的模型, 提出并分析了均匀性度量应满足的基本条件, 提出了均匀性度量的势函数模型。该模型较好地解决了均匀性度量的可计算性、布点的均匀性调整方法等问题, 而且具有均匀性度量所应该具有的所有优良性质, 如旋转对称性、平移对称性、中心对称性等。张玲等人^[4]根据均匀性度量的势函数模型提出了均匀性布点算法, 用于调节节点位置使节点分布更加均匀。张振江^[5]将这种量化的均匀性用于无线传感器网络中的功耗分析。张振江等人在文献^[6]中提出了一种新的提高无线传感器网络生命周期的方法——冗余节点传输代理方法(redundant nodes transmission agents, RNTA)。RNTA 方法根据冗余节点的密集性偏差和稀疏性偏差^[1], 从每个簇内选择一个处在簇内相对“均匀”位置的冗余节点来建立一棵连接各簇的冗余节点树。用无线传感器网络的冗余节点中继树作为网络内信息传输的代理, 实现信息从簇头到基站的传输, 因此, 可以节约正常节点和簇头的能量, 并保证每个冗余节点能够知道自己的上级节点或基站。

本文在文献^[7]、^[8]中用均匀度作为优化定位算法中通信半径的指标, 提高了算法对非理想(不均匀)网络的适应性, 提高了定位精度。近似偏差 D_d 、 D_s 、 D 描述了网络的均匀程度, 增强的 SECL 版本(E-SECL)使用这些参数判断当前目标所处位置的锚节点拓扑情况, 选择合适的锚节点参与定位算法。

1.2 网络的邻接图

无线传感器网络可以表示为无向图 $G = (V, E)$ 。 V 和 E 分布是点和边的集合。邻接图^[9]保持子图连通的条件, 根据预定规则删除 G 中某些边。邻接图降低了节点的连通度和网络管理的复杂度, 是拓扑控制等任务的基础工具。常用的邻接图有最小生成树(minimum spanning tree, MST)、相对邻居图(relative neighbor graph, RNG)、Gabriel 图(GG)、Delaunay 三角剖分(delaunay triangulation, DT)、Yao 图(YG)和单位圆图(unit disk graph, UDG)等。这些邻接图之间的关系是: $MST \leq RNG \leq GG \leq DT \leq YG \leq UDG$ 。本节主要讨论 Delaunay 三角剖分和它的对偶图 Voronoi 图, 以及 Delaunay 三角剖分子集 Gabriel 图。Delaunay 三角剖分具有很多优良特性, 是最常用的三角剖分。Delaunay 三角形产生的基本规则是, 任何一个 Delaunay 三角形的外接圆的内部不能包含其他任何点^[10]。要满足 Delaunay 三角剖分的

定义,必须符合两个重要的准则:

- 空圆特性: Delaunay 三角网是唯一的(任意四点不能共圆),在 Delaunay 三角形网中任何一个三角形的外接圆范围内不会有其它点存在。

- 最大化最小角特性: 在散点集可能形成的三角剖分中, Delaunay 三角剖分所形成的三角形的最小角最大。从这个意义上讲, Delaunay 三角网是“最接近于规则化的”的三角网。具体地说是指在两个相邻的三角形构成凸四边形的对角线,在相互交换后,6个内角的最小角不再增大。

Voronoi 图(VD),又叫 Dirichlet 图或者泰森多边形,是 Delaunay 三角剖分的偶图。VD 是常用的覆盖分析工具。给定空间的一个点集,VD 由一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形组成。平面可以被划分为距离各个点最近的一系列不相交的凸多边形的集合,这些凸多边形分别和点集中的每个点相对应,称之为该点的 Voronoi 区域。基于 Voronoi 的定位算法(VBLS)^[11]对 k 个工作锚节点 j_k 感知的 RSSI _{j_k} 信号强弱进行排序 $RSSI_{j_1} \geq RSSI_{j_2} \geq \dots \geq RSSI_{j_k}$ 。理想情况下,锚节点与目标的距离与 RSSI 呈反比关系,有 $0 \leq L_{j_1} \leq L_{j_2} \leq \dots \leq L_{j_k} \leq R$ 。然后利用 UDG 图依次计算每个 anchor 节点的 Voronoi 区域,最后将所有 Voronoi 区域交集的质心输出作为定位结果。Gabriel 图^[12]是 Delaunay 三角剖分的子图,比 DT 的空圆特性更强的约束,要求任意一条边作为直径确定的圆内不能包含其他节点。Cartigny 等人在文献[13]中使用 RNG 及其子图 LMST(local minimum spanning tree)为 Ad Hoc 网络提供能量高效的广播通信方式。Bose 等人在位置已知的 Ad Hoc 网络中^[14],使用 GG 提供可靠消息投递路由。Wang 等人在文献[15]中将网络邻接图运用到拓扑控制,使用 GG、RNG、YG、DT 等邻接图构造高效蓝牙 scatternet。Johansson 和 Motyčková 使用 GG 的变体降低 Ad Hoc 网络的干扰^[16]。Kuhn 等人^[17]提出了几何路由算法 GOAFR+,该算法使用 GG,并且证明了在最坏情况下是渐进最优化的。

1.3 近似偏差与 Gabriel 图的关系

近似偏差定义的 f 距离和 g 距离是节点与节点在不同方向上的最大距离。这些距离构成的图和 Gabriel 图的完全一致。因此,可以用 Gabriel 图来计算近似偏差。

2 GVGUM

本节介绍基于 Gabriel-Voronoi 图的均匀性测度

(GVGUM)。GVGUM 使用 Gabriel 图和 Voronoi 图描述节点分布的均匀程度。GVGUM 中的 Gabriel 图不但保留了近似偏差方法的所有信息,而且提供了标记位置的局部近似偏差信息。GVGUM 中的 Voronoi 图提供了每个节点控制区域的面积信息。

2.1 GVGUM 测度的计算流程

GVGUM 本质上提供 2 个重要信息:(1)节点-节点之间的距离信息,由 Gabriel 图提供;(2)节点-节点之间的领地面积信息,由 Voronoi 图提供。

如图 1 所示,GVGUM 的计算包括两部分。计算流程如下:

(1)根据节点集合 V 计算 Delaunay 三角剖分 $DT(V)$ 。

(2)使用 $DT(V)$ 计算 Gabriel 边 $GG(V)$ 和 Gabriel 组合区域 $GU(V)$ 。Gabriel 组合区域是 $DT(V)$ 中删除不满足 Gabriel 图定义条件的边后的三角形组合成的多边形。

(3)使用 Gabriel 组合区域 $GU(V)$ 后,计算每个区域的最大填充圆 $MPCD(GC(V))$ 。

(4)使用 $GG(V)$ 、 $GU(V)$ 和 $MPCD(GC(V))$ 计算密集性偏差 D_d 、稀疏性偏差 D_s 、自偏差 D 。

(5)使用节点集合 V 和 Delaunay 三角剖分 $DT(V)$ 计算 Voronoi 图 $VD(V)$ 。

(6)计算每个节点对应的 Voronoi 单元面积 $VCA(V)$ 。

(7)计算每个节点的覆盖率 $CR(V)$,以及密集覆盖偏差 C_d 、稀疏覆盖偏差 C_s 、覆盖自偏差 C 。

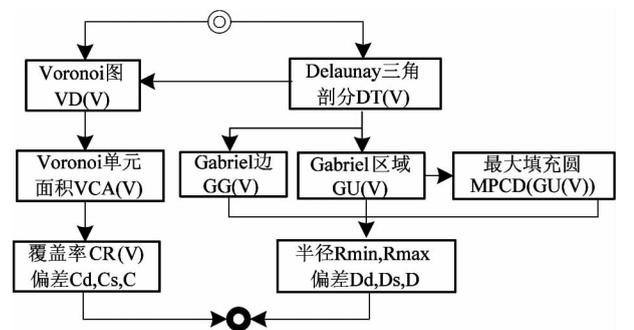


图 1 GVGUM 测度的计算流程图

Delaunay 剖分是有多种实现算法,新的算法不断涌现,其中最主要的有 4 种算法:(1)Lawson 在 1972 年提出的基于最大化最小角原则的对角线交换算法^[18];(2)Lawson 在 1977 年提出的逐点插入算法^[19];(3)Watson 在 1981 年提出的增量三角化 Watson 算法^[20];(4)Fortune 在 1986 年提出的扫描线算法^[21]。计算 Delaunay 三角剖分 $DT(V)$ 和 Voronoi 图

VD(V)有成熟参考实现,例如著名的 Qhull^[22]。

在 Delaunay 三角剖分 DT(V)的基础上,计算 Gabriel 图 GG(V)和 Gabriel 组合区域 GU(V)。从所有的 Delaunay 三角形 DT(V)得到所有不重复的边 GG(V)。对每个 Delaunay 三角形 $TRI_i \in DT(V)$,如果最大的边的平方大于另外两边的平方和,则该最大边对应的角是钝角,不满足 Gabriel 的条件,从 GG(V)中剔除该边。如果有其他 Delaunay 三角形 TRI_j 共享这一条边,则将这两个三角形归于同一个 Gabriel 组合区域 $POLY_v \in GU(V)$ 。遍历所有三角形后的 GG(V)和 GU(V)就是 Gabriel 图和 Gabriel 组合区域。对于 Gabriel 组合区域中每个区域 $POLY_v \in GU(V)$,计算区域的最大填充圆(maximum packing circle diameter, MPCD),得到该区域最大填充圆半径 MPCD(GU(V))。计算密集性偏差 D_d 、稀疏性偏差 D_s 、自偏差 D 的公式如下:

$$\begin{aligned} D_d &= \frac{\min\{VCA(V)\}}{2 \times Rst} \\ D_s &= \frac{2 \times Rst}{\max\{GG(V), MPCD(GU(V))\}} \\ D &= \frac{\min\{VCA(V)\}}{\max\{GG(V), MPCD(GU(V))\}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, MPCD(GU(V))是 Gabriel 组合区域最大填充圆直径。使用 Gabriel 图计算近似偏差,不但考虑了节点与节点之间的关系,而且可以计算多个 Gabriel 边围成的大区域内的最大填充圆直径作为 r_{max} ,修正稀疏偏差 D_s 。如图 2 所示, Gabriel 边把在没有节点空洞包围成不规则多边形,多边形定点确定的填充圆的直径大于最大 Gabriel 边,符合近似偏差的基本思想,应该用这个最大直径作为 r_{max} 。GVGUM 方法使用最大填充圆直径和 Gabriel 边的最大者作为最大空穴半径,弥补了 f 距离和 g 距离无法计算最大填充圆的不足,修正了最大空穴半径 r_{max} 稀疏偏差 D_s 。

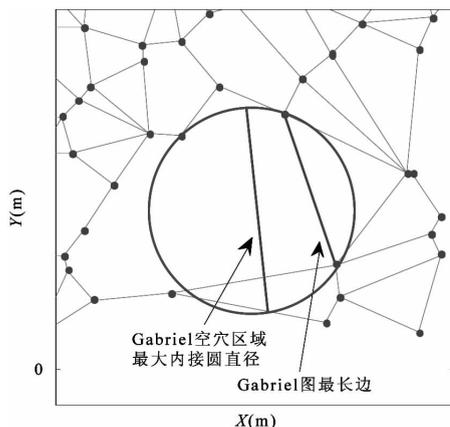


图 2 Gabriel 最大填充圆直径

计算密集覆盖偏差 C_d 、稀疏覆盖偏差 C_s 、覆盖自偏差 C 的公式如下:

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{\min\{VCA(V)\}}{Ast} \\ C_s &= \frac{Ast}{\max\{VCA(V)\}} \\ C &= \frac{\min\{VCA(V)\}}{\max\{VCA(V)\}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $Ast = \pi(Rst)^2$ 是标准半径对应的面积。

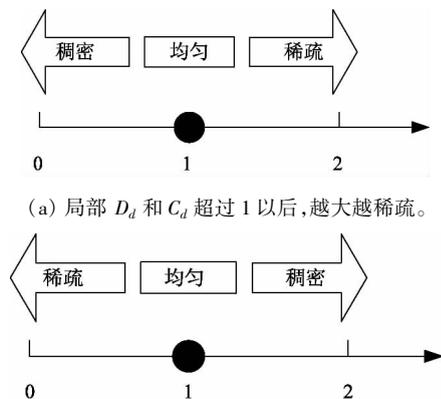
2.2 GVGUM 方法的计算复杂度

文献[1]中提供的计算 f 距离和 g 距离的方法需要计算任意两点之间的距离,二维空间算法复杂度是 $O(n^2)$ 。计算 Delaunay 三角剖分的 DT(V)算法复杂度可以达到 $O(n \log n)$ 。从 DT(V)到 Gabriel 图 GG(V)和 Voronoi 图 DT(V)的算法复杂度是 $O(n)$,因此 GVGUM 方法总体计算复杂度是 $O(n \log n)$ 。

2.3 局部近似偏差图

近似偏差计算归一化空间 $[0, 1]$ 的均匀度, D_d 、 D_s 和 D 表示整个空间中最稠密和最稀疏的程度。对于有成千上万个传感器的大规模网络,这三个指标不能给出无线传感器网络局部疏密程度的细节。因此,本文提出局部近似偏差图(local discrepancy map, LDM)。局部近似偏差是近似偏差的局部版本,在通信范围内计算近似偏差。例如,当通信半径是 150m 时,在直径为 300m 圆内计算相应本地版本的 D_d 、 D_s 、 D 、 C_d 、 C_s 和 C 。

全局范围 D_d 、 D_s 、 D 、 C_d 、 C_s 和 C 都是在 $0 \sim 1$ 范围,越大(越接近 1)越均匀。局部稀疏性偏差 D_s 越小节点越稀疏在局部范围的 LDM,由于局部的原因,在稠密的局部区域,最大填充圆的 $\max\{GG(V), MPCD(GU(V))\}$ 可能小于 Rst ,导致稀疏性偏差 D_s 大于 1。如图 3 所示, D_s 和 C_s 从 $0 \sim 1$,越大越均匀,



(a) 局部 D_d 和 C_d 超过 1 以后,越大越稀疏。

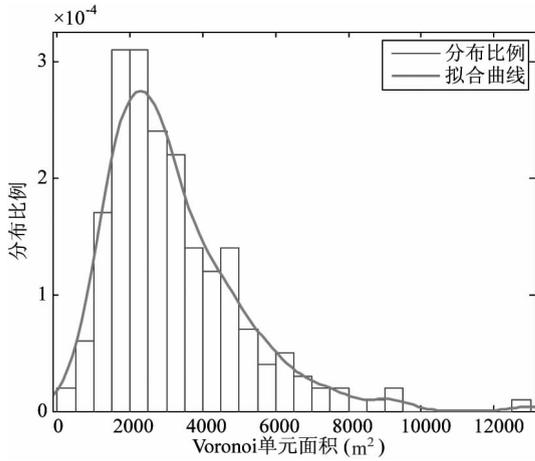
(b) 局部 D_s 和 C_s 超过 1 以后,越大越稠密。

图 3 局部稀疏性偏差和局部密集性偏差的意义

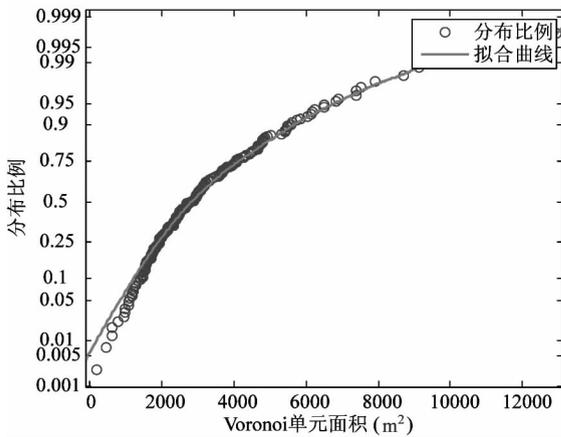
越小越稀疏。超过1以后,越大越稠密。同理,对于局部密集性偏差 D_d 和 C_d , 从0~1, 越大越均匀, 越小越稠密。超过1以后, 越大越稀疏。

2.4 GVGUM方法举例

在 $800\text{m} \times 800\text{m}$ 的区域、随机部署的200个传感器节点的 Voronoi 图。拟合的概率密度函数如图4(a)所示。图显示了 Voronoi 单元面积的概率密度分布, 在平均面积 2000m^2 达到最大。从图4(b)显示 $2000 \sim 4000\text{m}^2$ 之间的单元占到50%。



(a) Voronoi 单元面积分布直方图



(b) Voronoi 单元面积分布概率

图4 Voronoi 单元面积分布

图5显示了按照不同面积着色的 Voronoi 单元, 并且叠加了 Gabriel 图的效果。图上面积较大的 Gabriel 区域用黑线突出显示。可以发现, Gabriel 组合区域 $GU(V)$ 围成的区域与 Voronoi 单元最大(颜色最深)区域很相近。这一事实说明最大空穴的地方出现在 Gabriel 组合区域面积最大处。同样出现在 Voronoi 单元面积最大处概率较高。

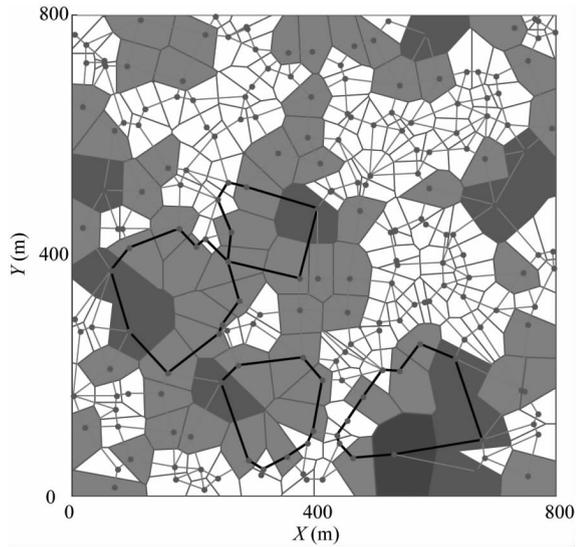
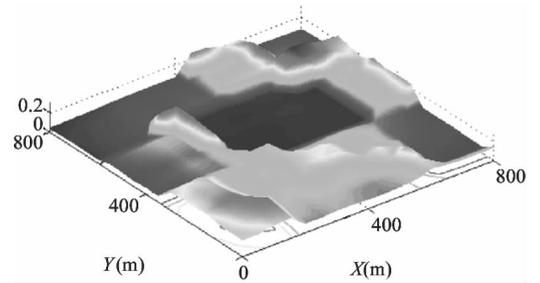
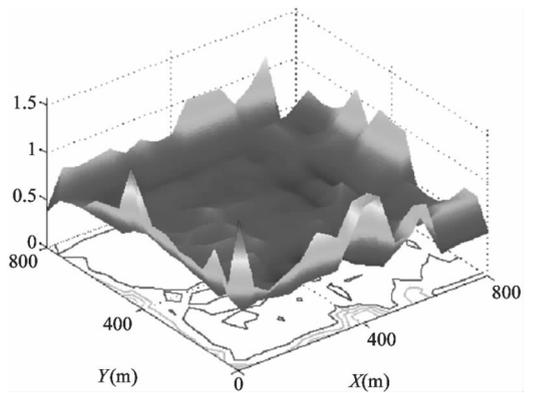


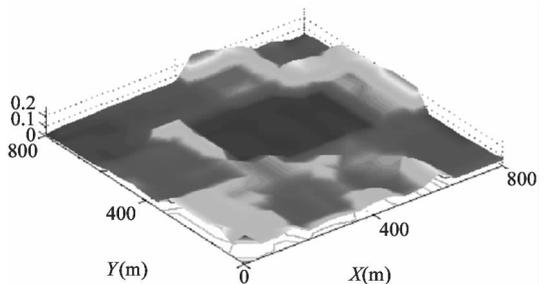
图5 Voronoi 图与 Gabriel 图的叠加



(a) 局部稠密偏差图 D_d



(b) 局部稀疏偏差图 D_s



(c) 局部自偏差图 D

图6 局部近似偏差图(LDM)

通过公式(6)可以计算近似偏差:

$$D_d = 0.0365, \quad D_s = 0.3302, \quad D = 0.0121$$

通过公式(7)可以计算面积近似偏差:

$$C_d = 0.0538, \quad C_s = 0.2473, \quad C = 0.0133$$

在 $800\text{m} \times 800\text{m}$ 的环境中,在 50m 的网格点上计算半径为 150m 范围内的近似偏差 D_d 、 D_s 和 D 。再进行插值,得到局部近似偏差图(LDM)。三维局部近似偏差图(LDM)参见图 6。

3 结 论

定位精度受到锚节点的密度、拓扑结构等因素综合影响。除了锚节点密度,锚节点分布的均匀程度对定位的精度有重要影响。本文使用锚节点之间的空隙大小和锚节点控制区域的面积大小表征锚节点分布的稀疏程度,进而定量地描述锚节点的均匀程度。均匀性度量可用于评估定位算法的精度和鲁棒性,优化定位算法的参数等相关。

参考文献

- [1] 胡东红,李德华,王祖喜.均匀性度量中的密集性偏差与稀疏性偏差.数学物理学报,2002,22(1):128-134
- [2] 方开泰.均匀设计——数论方法在试验设计中的应用.应用数学学报,1980,3(4):363-372
- [3] 胡东红,李德华,王祖喜.均匀性度量的势函数模型.数学物理学报,2003,23(5):607-612
- [4] 张玲,张胜兰,艾君等.均基于势函数的均匀性度量与均匀性布点方法.湖北大学学报(自然科学版),2007,29(2):144-146
- [5] Zhang Z J. Analysis of distribution uniformity of nodes in wireless sensor networks. *High Technology Letters*, 2007, 13(1): 65-68
- [6] 张振江,刘云.一种新的无线传感器网络传输机制 RN-TA 算法的研究与仿真.电子与信息学报,2007,29(5):190-193
- [7] Zhou Q, Xu Y J, Li X W. Smallest enclosing circle based localization approach for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, Kunming, China, 2009. 61-65
- [8] 周全,朱红松,徐勇军等.基于最小包含圆的无线传感

- 器网络定位算法.通信学报,2008,29(11):68-92
- [9] Li X Y. Algorithmic, geometric and graphs issues in wireless networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003, 3(2): 119-140
- [10] Delaunay B. Sur la sphère vide, *Izvestia Akademii Nauk SSSR. Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk*, 1934, 7: 793-800
- [11] 王继春,黄刘生,徐宏力等.基于 voronoi 图的无需测距的无线传感器网络节点定位算法.计算机研究与发展,2008,45(1):199-125
- [12] Gabriel K R, Sokal R R. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology*, 1969, 18: 259-278
- [13] Cartigny J, Ingelrest F, Simplot-Ryl D, et al. Localized LMST and RNG based minimum-energy broadcast protocols in ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(1): 1-16
- [14] Bose P, Morin P, Stojmenovi'c I, et al. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. *ACM/Kluwer Wireless Networks*, 2001, 7(6): 609-616
- [15] Wang Y, Stojmenovi'c I, Li X Y. Bluetooth scatternet formation for single-hop ad hoc networks based on virtual positions. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Computers and Communications, 2004, Taormina, Sicily, Italia, 2004, 170-175
- [16] Johansson T, Carr-Motyčková L. Reducing interference in ad hoc networks through topology control. In: Proceedings of the 2005 Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing. New York, NY, USA, 2005, 17-23
- [17] Kuhn F, Wattenhofer R, Zhang Y, et al. Geometric ad-hoc routing: of theory and practice. In: Proceedings of the 22nd Annual Symposium on Principles of Distributed Computing. New York, NY, USA, 2003, 63-72
- [18] Lawson C L. Generation of a triangular grid with applications to contour plotting. *Jet Propulsion Laboratory*, California Institute Technology, Pasadena, CA, Technical Memorandum 299.
- [19] Lawson C L. Software for C1 surface interpolation. In: *Mathematical Software III*, New York: Academic Press, 1977. 161-194
- [20] Watson D F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. *The Computer Journal*, 1981, 24(2): 167-172
- [21] Fortune S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. In: Proceedings of the 2nd Annual Symposium on Computational Geometry, New York, NY, USA, 1986, 313-22
- [22] Barber C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H T. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1996, 22(4): 69-483

A uniformity metric for wireless network nodes

Zhou Quan^{* ** ***}, Zhu Hongsong^{* **}, Luo Haiyong^{*}, Xu Yongjun^{*}, Li Xiaowei^{*}

(* Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(** Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(*** Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055)

Abstract

Considering that the nonuniformity of anchor nodes distribution in a wireless sensor network has a great impact on the positioning accuracy of the network except the factors of the node density and node coverage, this paper improves the discrepancy-based method for measurement of the uniformity of network node distribution, and presents a Gabriel-Voronoi Graph based Uniformity Metric (GVGUM) to describe the uniformity of wireless network nodes quantitatively. The GVGUM method uses Gabriel edges to represent the nodes density, and uses Voronoi cell areas to represent node control regions, giving a better presentation of the node uniformity.

Key words: wireless sensor networks, uniformity, discrepancy, GVGUM