引文格式:李得海,吴文坛,马会林,等.室内测距型基站组网定位性能分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):1-10.DOI:10.13203/j.whugis20220513

Citation:LI Dehai,WU Wentan,MA Huilin,et al.Positioning Performance Analysis of Indoor Networks of Range-Based Reference Stations[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(1):1-10.DOI:10.13203/j.whugis20220513

室内测距型基站组网定位性能分析

李得海[1,2] 吴文坛[3] 马会林[4] 秘金钟[1] 赵奕源[1]

1 中国测绘科学研究院,北京,100036

2 北京房山人卫激光国家野外科学观测研究站,北京,100830

3 河北省自然资源档案馆,河北 石家庄,071299

4 河北省第二测绘院,河北 石家庄,071299

摘 要:面向室内定位基站部署需求,针对测距型基站室内组网定位的主要影响因素,全面研究了多种网形在不同条件下的定位特性,率先提供了室内定位基站组网的参考原则和定位性能特征。通过设计不同形状、尺度、高度、规模的基站组网方案,完成了基站定位性能研究。结果表明:(1)圆形基站网位置精度因子优于方形网,直线形基站网不适宜进行三维定位服务。(2)基站网半径增加一倍,位置精度因子均值减小一倍。(3)基站网的高度增大一倍,其垂直和位置精度因子均值减小1/3。(4)圆形网的基站数增大一倍,位置精度因子均值减小1/3。(5)基站网高度约为1/2服务区域半径时,平面和垂直定位精度达到均衡。沿区域边界上空均匀部署6个以上基站时,平面和垂直精度因子优于1。上述基站组网原则和定位性能特征,将为室内定位系统基站部署的形状、高度、数量、半径等设计工作提供有力支撑。

关键词:室内定位;基站部署;定位性能;组网原则

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-05-19

DOI:10.13203/j.whugis20220513 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0001-10

Positioning Performance Analysis of Indoor Networks of Range-Based Reference Stations

LI Dehai[1,2] *WU Wentan*[3] *MA Huilin*[4] *BEI Jinzhong*[1] *ZHAO Yiyuan*[1]

1 Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100036, China

2 Beijing Fangshan Satellite Laser Ranging National Observation and Research Station, Beijing 100830, China

3 Hebei Natural Resources Archives, Shijiazhuang 071299, China

4 Hebei Second Institute of Surveying and Mapping, Shijiazhuang 071299, China

Abstract: **Objectives**: In the indoor positioning, the layout of network comprised of many reference stations with ranging function plays a crucial role to the positioning performance. In order to reveal the particular relationship between the positioning performance and the network layout of reference stations, a variety of layout conditions are investigated in light of the dilution of precision comprehensively. **Methods**: In conditions of different shapes, sizes, heights and scales, a variety of network layout schemes are designed and tests of positioning performance were completed. We design circular network, square network, linear network and solid circular network, and the influences of different shapes on positioning performances are explored. We test the circular networks with radiuses of 5 m, 10 m and 20 m, so the influences of different sizes on positioning performances were revealed. We assess the circular networks with heights of 3 m, 6 m, 9 m and 12 m, and the influences of different heights on positioning performances are investigated. We test the circular networks with 4, 6, 8 and 12 stations, and the influences of different scales on positioning performance are provided. **Results**: The results show that: (1) The position dilution of precision (PDOP) in the cir-

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900803);中央级科研院所基本科研业务费项目(AR2102);河北省自然资源厅科技项目(13000022P00EEC410090F);河北省技术创新引导计划项目科技冬奥专项(21477603D)。

第一作者:李得海,博士,研究员,主要从事室内外协同定位技术研究。lidh@casm.ac.cn

通信作者:赵奕源,硕士。zyy86062@163.com

cle network is better than that of the square network, while the linear network is not suitable for three-dimensional positioning. (2) When the radius of the circular network increases by 2 times, means of PDOP decrease by 2 times. (3) When the height of the network increases by 2 times, and means of the vertical dilution of precision (VDOP) and the horizonal dilution of precision (HDOP) reduce by 1/3 times. (4) When the number of reference stations in the circular network increases by 2 times, and means of PDOP reduce by 1/3 times. (5) When the height of the network is about half the radius of the service area, HDOP and VDOP reach to an equilibrium. (6) When more than 6 reference stations are uniformly deployed over the boundary of service area, the HDOP and VDOP are lower than 1. **Conclusions:** This study provides the principles and characteristics of positioning performances with different indoor network layouts. The results will contribute to identify the optimal positioning areas, and predict the network positioning performance. Thereby, it is beneficial to guiding the design of indoor positioning systems, such as supporting the deployments of the shape, height, number and radius of reference stations.

Key words: indoor positioning; stations layout; positioning performance; networking principle

全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)已在室外提供了连续、可靠、全天候的定位、导航、授时服务。在全球任意开阔区域,皆可观测到4颗以上导航卫星,提供位置精度因子(position dilution of precision,PDOP)优于5的定位服务。然而,卫星导航信号难以进入室内,室内定位导航必须依赖于其他定位方式。随着人们对高精度室内定位导航需求的不断提升和室内定位技术的日趋成熟,目前,室内定位导航正朝着多元化、智能化、大众化的趋势快速发展。其中在基于几何关系的室内定位技术中,可采用伪卫星基站、超宽带基站(ultra wide band,UWB)或Wi-Fi基站等,通过观测距离值进行室内定位和导航服务[1-2]。

为提高室内定位精度,很多学者着重对定位算法进行研究与改进,此外,室内定位基站的布设情况也对定位精度具有很大影响[3]。室内定位基站部署的位置和基站组网的形状决定了室内定位服务的精度和范围[4-7]。如何合理部署室内基站,满足室内定位系统设计的性能指标,成为室内基站部署方案设计的首要问题。根据GNSS定位精度分析方法,可利用精度因子(dilution of precision,DOP)开展定位精度性能分析[8]。针对狭长空间,文献[9]研究了传感器感知半径、空间宽度及传感器布设间距等因素对定位精度的影响。利用到达角定位技术,文献[10]分析了精度因子的变化规律。利用仿真测距值,文献[11]分析了基站布设对精度因子的影响规律。

通过简化基站位置表达参数,利用矩阵特征值构建精度因子数学模型[12-13]。根据精度因子函数模型,得出4颗伪卫星的最佳部署条件。通过计算几何精度因子值,文献[14]研究了不同伪卫星布局对系统定位精度的影响。当m个观测精度相同的传感器分布于正多边形的顶点且目标位于正多边形的中心点时,定位系统的DOP值达到最小值[15]。文献[16]推导获得了最优DOP值及其充要条件。针对多传感器空间布站对目标定位精度的影响,进行多传感器布站空间优化[17]。以PDOP值为指标,文献[18]研究了UWB基站组网定位精度。

然而,上述研究主要聚焦于单点的定位精度优化和对应的基站最优网形分布,缺乏对整个服务区域定位性能的全面统计和深入分析。并且,大部分基站定位性能研究仅限于单一网形的精度因子分布研究,较少涉及不同形状、尺寸、高度、规模的基站网定位性能特征研究。不同基站组网方案将具有哪些区别和特征,如何掌握基站网随着尺寸、高度、规模的变化对室内定位的影响规律,成为室内基站组网定位的研究热点,有待进一步研究。

本文将围绕定位精度因子在整个室内服务区域的统计值和变化特征,研究不同网形、尺寸、高度、基站数条件下的室内基站组网定位特性。通过定量计算基站组网的精度因子统计值,全面分析不同组网形状、网形尺寸、部署高度、部署数量等条件下的定位性能特征。从多维度、多尺度归纳定位性能计算结果,形成基站组网设计的初步原则,为基站部署设计提供丰富、实用的参考。

1 基站组网定位原理

接收机观测基站测距信号,得到距离观测值。若观测值中其他误差已改正,仅保留了钟差和观测噪声。在空间直角坐标系下,第i基站的

距离观测方程为:

$$p_i=\sqrt{(x_r-x_i)^2+(y_r-y_i)^2+(z_r-z_i)^2}+\Delta t_r+\varepsilon_i \tag{1}$$

式中,p_i为距离观测值;(x_i,y_i,z_i)为基站位置坐标;(x_r,y_r,z_r)为接收机位置坐标;Δt_r为接收机钟差,单位为m;ε_i为观测噪声。

由于仅知道接收机近似坐标(x_r^0,y_r^0,z_r^0),需估计接收机坐标改正数$(\mathrm{d}x_r,\mathrm{d}y_r,\mathrm{d}z_r)$,获得精确的接收机位置坐标,完成用户定位。对观测方程进行一阶线性化展开:

$$p_i-p_i^0=\frac{x_r^0-x_i}{p_i^0}\mathrm{d}x_r+\frac{y_r^0-y_i}{p_i^0}\mathrm{d}y_r+\frac{z_r^0-z_i}{p_i^0}\mathrm{d}z_r+\Delta t_r+\varepsilon_i \tag{2}$$

式中,p_i^0为利用基站坐标和接收机近似坐标计算的距离近似值。

对观测方程进行矩阵化表达,得到观测模型:

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{V} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{L}$是观测向量,为观测值与近似计算值之差;$\boldsymbol{B}$为设计矩阵;$\boldsymbol{X}$为待估参数向量,包括3个坐标改正数和1个钟差参数;$\boldsymbol{V}$为噪声向量。若观测向量$\boldsymbol{L}$的权矩阵为$\boldsymbol{P}$,则观测模型的最小二乘解为[19-20]:

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{L} \tag{4}$$

待估参数的协方差矩阵为:

$$\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B})^{-1} \tag{5}$$

平面DOP(horizonal DOP,HDOP)计算公式为:

$$H_{\mathrm{DOP}}=\sqrt{\boldsymbol{Q}(1,1)+\boldsymbol{Q}(2,2)} \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{Q}(1,1)$为$\boldsymbol{Q}$矩阵中第1行第1列的元素值;$\boldsymbol{Q}(2,2)$为$\boldsymbol{Q}$矩阵中第2行第2列的元素值。垂直DOP(vertical DOP,VDOP)计算公式为:

$$V_{\mathrm{DOP}}=\sqrt{\boldsymbol{Q}(3,3)} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{Q}(3,3)$为$\boldsymbol{Q}$矩阵中第3行第3列的元素值。位置DOP(position DOP,PDOP)计算公式为:

$$P_{\mathrm{DOP}}=\sqrt{\boldsymbol{Q}(1,1)+\boldsymbol{Q}(2,2)+\boldsymbol{Q}(3,3)} \tag{8}$$

利用式(4)的最小二乘算法求解观测模型,得到待估参数值。将待估参数值代入观测模型(3),计算得到观测噪声向量。根据观测噪声向量,计算观测值验后中误差δ_0。式(5)~(8)显示,定位结果的平面中误差为HDOP与δ_0之积,垂直中误差为VDOP与δ_0之积,位置中误差为PDOP与δ_0之积。DOP为定位中误差的放大系数,其具体数值由基站网形状和布设位置决定。DOP值越小,该基站网定位中误差越小,定位精度越高,基站网的几何构形越好,定位估计性能越优;DOP值越大,该基站网定位中误差越大,定位精度越低,基站网的几何构形越弱,定位估计性能越差。

HDOP反映了基站网对定位结果平面位置估计中误差的放大影响,VDOP反映了基站网对定位结果垂直方向估计中误差的放大影响,PDOP反映了基站网对定位结果三维位置估计中误差的放大影响。

显然,基站网定位中误差不仅受到DOP所代表的基站网形影响,也受到了观测中误差的影响。观测中误差为观测值的精度,主要受基站设备、用户终端、传输环境等影响。对于UWB基站,若其测距中误差为5 cm,HDOP低于2的基站网用户定位平面位置中误差约为10 cm,HDOP低于1的基站网用户定位平面位置中误差约为5 cm。对于蓝牙基站,若其测距中误差为1.5 m,HDOP低于2的基站网用户定位平面位置中误差约为3 m,HDOP低于1的基站网用户定位平面位置中误差约为1.5 m。对于Wi-Fi精确时间测量(fine time measurement, FTM)基站,若其测距中误差为1 m,HDOP低于2的基站网用户定位平面位置中误差约为2 m,HDOP低于1的基站网用户定位平面位置中误差约为1 m。观测误差的改正和处理较为复杂,需按照不同基站设备、观测环境和用户终端开展进一步建模研究。本文主要研究基站网形对定位结果在平面、垂直和位置精度估计中的影响和特征,提供相应的基站组网参考。

2　基站组网方案设计

对比体育馆和室内开阔大厅的设计参数,选取了具有典型性和代表性的室内大厅尺寸:边长约为50 m,高度约为12 m。通常,室内大厅为正方形,空间开阔。支柱位于大厅四周,室内区域视线开阔无遮挡。设置基站网的边长为50 m,高度为12 m。若室内大厅地面中心位置为(0,0,0),则地面左下角为(−25, −25,0),地面右上角为(25,25,0)。

由于测距型伪卫星基站的信号发射功率可调,基站可根据服务空间尺寸提供满足覆盖范围的测距定位信号。同样地,测距型窄脉冲基站的脉冲信号强度也可依据服务空间尺寸进行设置。因此,在室内开阔区域,本文不再关注有效测距

范围,所有基站在满足截止高度角的情况下皆为可观测基站。

基站组网实验中,重点对观测区域与可观测基站构成的定位精度特性进行网格化计算和可视化分析。定位精度特性主要选取了HDOP和VDOP表征基站网定位性能。首先,将室内大厅地面作为观测区域进行网格化划分,得到边长为0.5 m×0.5 m的网格。其次,在每个网格中心,计算观测所有基站的高度角。根据高度角判断基站可见性,计算得到可观测基站的DOP。最后,对所有网格中心的DOP进行插值,得到DOP分布图。计算所有网格中心DOP均值,得到整个定位服务区的DOP统计值。

基站组网数据处理中,利用移动工作站生成DOP分布图及其统计结果。移动工作站中央处理器为Intel Core i7-9750H,主频2.6 GHz,内存32 GB,硬盘1 TB。生成DOP所需信息包括基站坐标、用户坐标、基站与用户间距离、高度角等。基站坐标由基站组网方案提供,用户坐标由观测区域网格化后提取获得,基站与用户间距离可用基站和用户坐标计算得到,高度角由基站和用户坐标计算得到。基站组网性能分析中,设计了不同形状、尺寸、高度和基站数量等实验条件,对比分析基站组网的DOP特征。分别按照圆形、方形、直线进行基站部署,对基站部署的最优图形进行了验证和分析;从不同尺度,按照基站网半径逐渐增加的方式,对基站部署的最佳尺寸进行了实验分析;从高程维度,按照基站位置的高度逐渐增加的方式,对基站部署的合适高度进行了实验分析;从不同数量的角度,按照基站个数逐渐增加的方式,对部署基站的最佳个数进行了实验分析。通过多维度、多尺度分析组网定位性能,归纳得到了基站组网的参考原则,总结了基站网定位性能的特点和变化特征。

3 基站组网定位性能分析与结果

3.1 不同形状基站网定位性能

多个室内基站部署在室内大厅顶层,可组成圆形、方形、直线、实心圆形等网形。4种典型基站网形分布见图1。基站网顶层高度都为12 m,圆形半径为25 m,方形边长为50 m。另外,可在圆形网中心加设基站,组成实心圆形网。针对不同形状的网形,计算每个网形在室内地面的DOP分布特征。

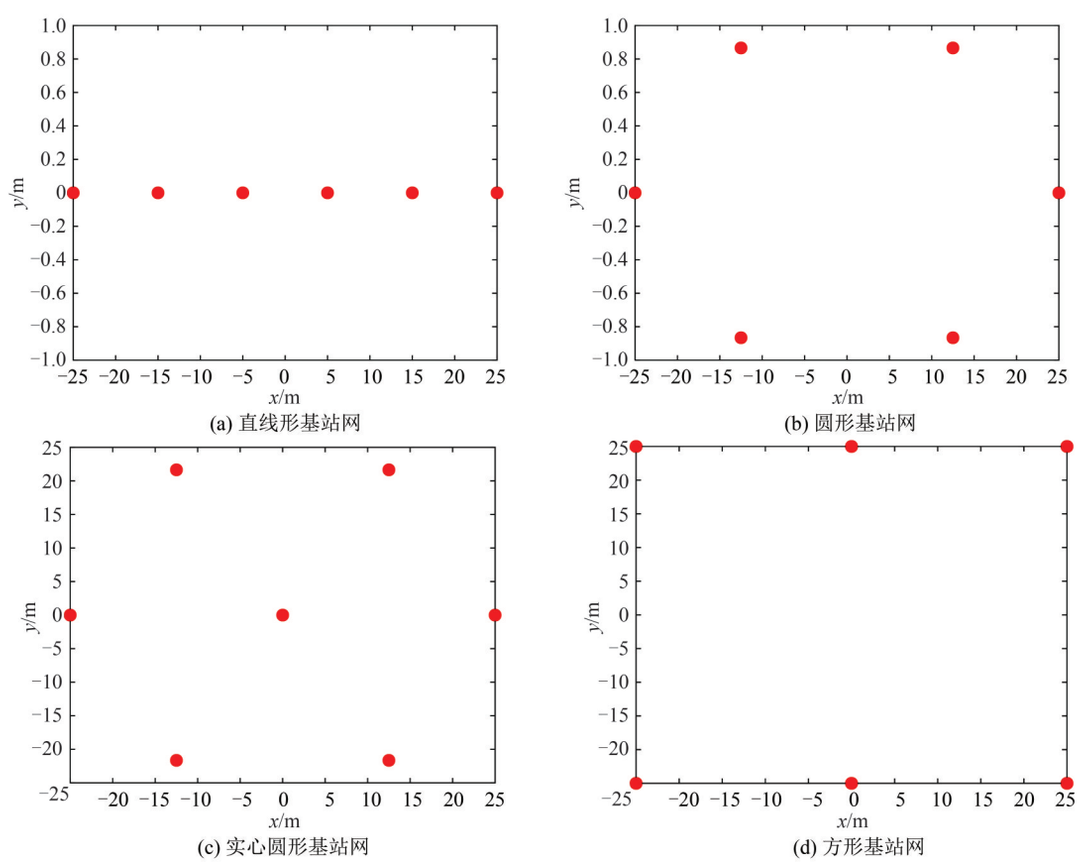


图1 直线形、圆形、实心圆形、方形基站网在大厅顶部平面分布图

Fig. 1 Distributions of Reference Networks with Straight Line, Circle, Solid Circle Shapes, Square at the Top of the Hall

6个基站可沿大厅轴线均匀部署,形成直线型基站网。直线网基站部署情况见图1(a)。计算直线网在室内地面定位的DOP,发现三维定位的DOP计算失败。直线分布基站的三维定位观测方程组成法方程后存在病态性,直接求逆失败,DOP无法计算。这说明直线分布的基站不适宜进行三维定位。

6个基站可沿大厅平面均匀部署,形成圆形基站网。圆形网直径为50 m。圆形网基站部署情况见图1(b)。计算圆形网对室内地面定位的HDOP和VDOP,并绘制其分布情况(图2)。在圆形网的中心加设1个基站,利用7个基站组成实心圆形基站网。实心圆形网基站部署情况见图1(c)。计算实心圆形网对室内地面定位的HDOP和VDOP,并绘制其分布情况(图2)。

6个基站可沿大厅边沿均匀部署,形成方形基站网。方形网边长为50 m。方形网基站部署情况见图1(d)。计算方形网对室内地面定位的HDOP和VDOP,并绘制其分布情况(图2(c))。利用HDOP和VDOP计算得到PDOP,统计所有格网点的HDOP、VDOP、PDOP,计算得到整个定位服务区的DOP均值,如表1所示。

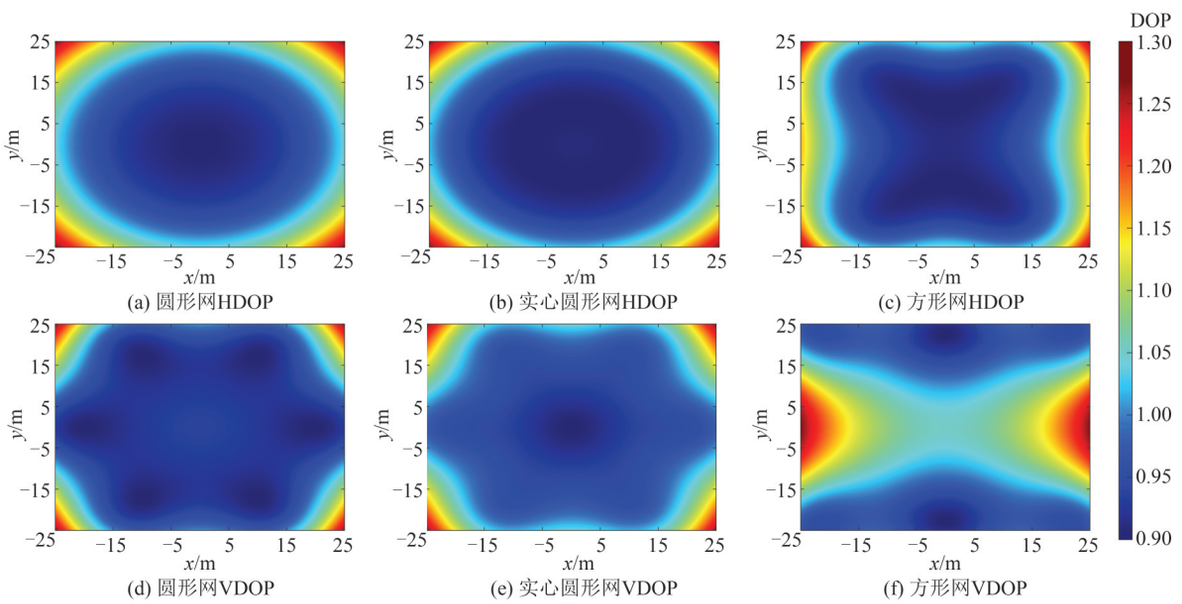


图2　圆形网、实心圆形网、方形网大厅地面定位的HDOP和VDOP分布图

Fig. 2　HDOP and VDOP Distribution of Positioning on the Ground of Whole Hall with Circle Network, Solid Circle Network and Square Network

表1　不同网形下整个室内大厅地面定位的DOP均值

Table 1　Mean Values of DOP for Positioning on the Ground of Whole Hall Using Networks with Different Shapes

形状	HDOP	VDOP	PDOP
直线	失败	失败	失败
方形	0.947	1.092	1.449
圆形	0.994	0.996	1.410
实心圆形	0.967	0.949	1.358

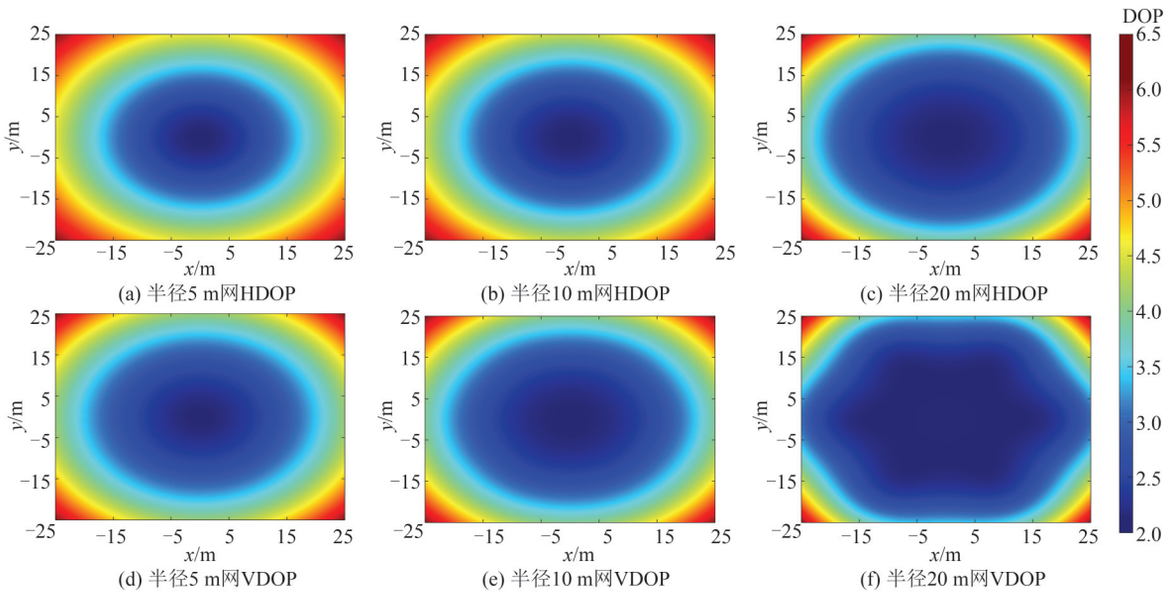
分析不同网形下室内地面定位的DOP分布结果,直线形基站网无法进行三维定位服务,其三维定位法方程存在病态。图2显示,方形网HDOP小于0.95的区域面积较大,圆形网HDOP小于0.95的区域面积较小。尤其是在靠近室内4个拐角区域,方形网HDOP低于圆形网,这说明方形网HDOP略优于圆形网。方形网VDOP在中间大部分区域明显变大,且VDOP较差区域面积较大。然而,圆形基站网的VDOP在中间区域分布均匀,且VDOP大部分为0.95左右。这说明圆形网VDOP明显优于方形网。在圆形网中心加站后,中心区域及周边VDOP大部分降低为0.95,VDOP进一步得到控制。

表1显示,方形网HDOP最小,均值仅为0.947,VDOP最大,综合后的方形网PDOP最大。圆形网VDOP均值仅为0.996,显著优于方形网VDOP均值1.092;圆形网HDOP略高于方形网;综合后的圆形网PDOP均值为1.410,优于方形网PDOP均值1.449。区域中心加站后的实心圆形网综合后的PDOP最优。

3.2　不同尺度基站网定位性能

将6个室内基站按照圆形部署在室内大厅顶

层,圆形网半径从5 m开始,递增至20 m。分别计算半径5、10、20 m的圆形网对室内地面定位的HDOP和VDOP,并绘制其分布情况(见图3)。



(a) 半径5 m网HDOP (b) 半径10 m网HDOP (c) 半径20 m网HDOP

(d) 半径5 m网VDOP (e) 半径10 m网VDOP (f) 半径20 m网VDOP

图3 半径5 m、10 m、20 m圆形网室内地面定位的HDOP和VDOP分布图

Fig. 3 HDOP and VDOP Distribution of Positioning on the Ground of Whole Hall Using Circular Networks with Radiuses of 5 m, 10 m, 20 m

值(见表2)。

表2 不同半径圆形网下整个室内大厅地面定位的DOP均值

Table 2 Mean Values of DOP for Positioning on the Ground of Whole Hall Using Circular Networks with Different Radiuses

半径/m	HDOP	VDOP	PDOP
5	3.817	4.619	6.081
10	1.968	2.214	3.004
20	1.125	1.096	1.579

图3显示,随着圆形基站网半径增加,HDOP大幅度减小。图3中20 m半径圆形网HDOP最低。圆形网的半径增大一倍,HDOP小于2.5的区域半径增大约一倍。HDOP最优区域为基站网正下方区域。随着圆形基站网半径增加,VDOP同步变小。5 m半径圆形网VDOP最高。圆形网的半径增大一倍,VDOP小于3的区域半径增大约一倍。VDOP最优区域仍为基站网正下方区域。

表2显示,半径为5、10、20 m的圆形网HDOP均值分别为3.817、1.968、1.125,这说明圆形基站网半径增加一倍,HDOP变小约一半。半径为5、10、20 m的圆形网VDOP均值分别为4.619、2.214、1.096,这说明圆形基站网半径增加一倍,VDOP变小约一半。20 m半径圆形网HDOP、VDOP、PDOP最低。圆形网的半径增大一倍,服务区域内PDOP均值变小一倍。该结果与室内大厅地面定位的DOP分布图结果一致。

3.3 不同高度基站网定位性能

将6个室内基站按照圆形部署在室内大厅不同高度,圆形直径为50 m。圆形网高度从3 m开始,递增至12 m。针对不同高度的圆形网,计算每个高度圆形网在室内地面的DOP值。分别计算高度为3、6、9、12 m圆形网对室内地面定位的HDOP和VDOP,并绘制其分布情况(见图4)。利用HDOP和VDOP计算得到PDOP,统计地面所有格网点的DOP,计算得到不同高度圆形网在整个定位服务区的DOP均值(见表3)。

图4显示,随着圆形基站网高度增加,HDOP小幅度增大。高度为3、6、9、12 m的圆形网HDOP小于0.9的区域半径分别约为20、15、13、10 m。圆形基站网高度越低,相同等级HDOP的覆盖范围和面积越大,这说明随着圆形基站网高度增加,HDOP略有增大,VDOP大幅减小。高度为3、6、9、12 m的圆形网下方中心区域VDOP分别约为1、0.95、0.9、0.85,这说明随着圆形基站

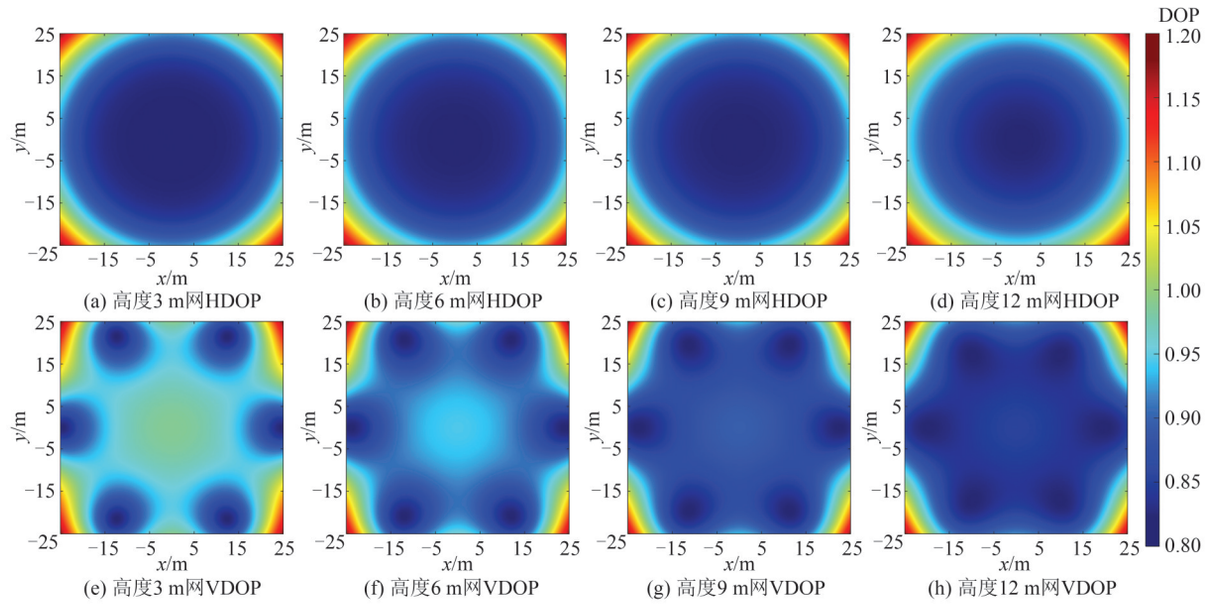


图 4　高度 3 m、6 m、9 m、12 m 圆形网室内地面定位的 HDOP 和 VDOP 分布图

Fig. 4　HDOP and VDOP Distribution of Positioning on the Ground of Whole Hall Using Circular Networks with Heights of 3 m, 6 m, 9 m and 12 m

表 3　不同高度圆形网对整个室内大厅地面定位的 DOP 均值

Table 3　Mean Values of DOP for Positioning on the Ground of Whole Hall Using Circular Networks with Different Heights

高度/m	HDOP	VDOP	PDOP
3	0.883	2.815	2.961
6	0.908	1.559	1.811
9	0.946	1.174	1.511
12	0.994	0.996	1.410

网高度增加,服务中心区域 VDOP 明显减小。

表 3 显示,高度为 3、6、9、12 m 的圆形网 VDOP 均值分别为 2.815、1.559、1.174、0.996。这说明圆形网的高度增大一倍,服务区域内 VDOP 均值减小约 1/3。当圆形网高度接近 1/2 半径时,HDOP 和 VDOP 均值比较接近,平面和垂直定位精度达到均匀分配条件。并且,服务区域内 HDOP 均值受圆形网高度变化的影响最显著,PDOP 均值随圆形网高度增加而变小。同样地,圆形网的高度增大一倍,服务区域内 PDOP 均值减小约 1/3。12 m 高度圆形网 VDOP 和 PDOP 最低。该结果与室内大厅地面定位的 DOP 分布图结果一致。

3.4　不同规模基站网定位性能

基站网按照圆形部署在室内大厅顶部,圆形直径为 50 m。圆形网基站数从 4 个开始,递增至 12 个。针对不同基站数的圆形网,计算不同规模基站网在室内地面定位的 DOP。分别计算 4、6、8、12 个基站的圆形网对室内地面定位的 HDOP 和 VDOP,并绘制其分布情况(见图 5)。根据 HDOP 和 VDOP,计算得到 PDOP。统计地面所有格网点的 HDOP、VDOP、PDOP,计算得到不同基站数圆形网在整个定位服务区的 DOP 均值(见表 4)。

图 5 显示,随着圆形网基站数增加,HDOP 大幅减小。4、6、8、12 基站圆形网 HDOP 小于 1.2 的区域半径分别约为 10、12、15、16 m。这说明圆形网基站数越多,相同等级 HDOP 的覆盖范围和面积越大。随着圆形网基站数增加,VDOP 大幅度减小。4 基站圆形网 VDOP 较小区域主要集中在 4 个基站正下方。6 基站圆形网 VDOP 较小区域相对于 4 基站圆形网增加 2 片,但中心区域 VDOP 依然较大;8 基站圆形网 VDOP 较小区域相对于 4 基站圆形网增加 4 片,中心区域 VDOP 同步减小;12 基站圆形网 VDOP 较小区域相对于 4 基站圆形网增加 6 片,大部分区域内 VDOP 分布已接近均匀。这说明随着圆形网基站数增加,相同等级 VDOP 的覆盖范围和面积越大。

表 4 显示,4 基站圆形网 HDOP 均值为 1.255,8 基站圆形网 HDOP 均值为 0.858,变小了 1/3;6 基站圆形网 HDOP 均值为 0.994,12 基站圆形网 HDOP 均值也相对于 6 基站减小约 1/3。这说明圆形网基站数增加一倍,HDOP 减小约 1/3。4 基站圆形网 VDOP 均值为 1.342,8 基站圆形网

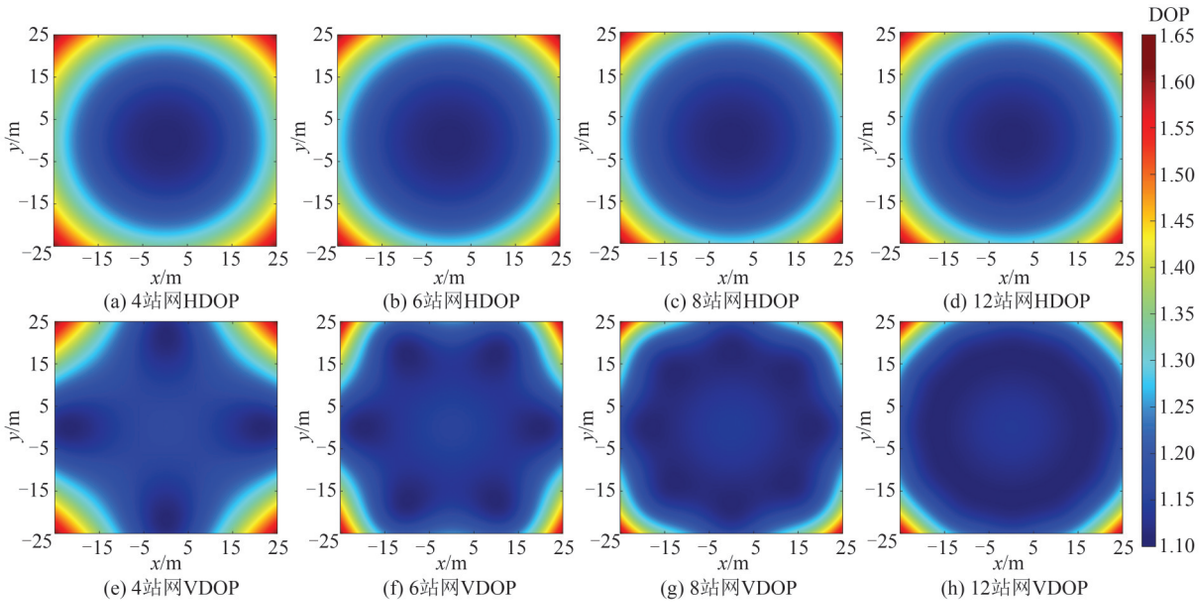


图5 4个、6个、8个、12个基站的圆形网下室内地面定位的HDOP和VDOP分布图

Fig. 5 HDOP and VDOP Distribution of Positioning on the Ground of Whole Hall Using Circular Networks with 4, 6, 8, 12 Reference Stations

表4 不同基站规模的圆形网下整个室内大厅地面定位的DOP均值

Table 4 Mean Values of DOP for Positioning on the Ground of Whole Hall Using Circular Networks with Different Scales of Station Numbers

基站数/个	HDOP	VDOP	PDOP
4	1.255	1.342	1.846
6	0.994	0.996	1.410
8	0.858	0.855	1.213
12	0.700	0.700	0.991

VDOP均值为0.855，VDOP均值减小1/3。6基站圆形网VDOP均值为0.996，12基站圆形网VDOP均值为0.700。这说明圆形网基站数增加一倍，VDOP减小约1/3。对比不同基站数圆形网对整个室内大厅地面定位的DOP均值，12基站圆形网HDOP、VDOP、PDOP最低。圆形网的基站数增大一倍，服务区域内的DOP均值变小1/3。

4 基站组网原则分析

室内基站部署的位置和组网形状将对整个基站网的定位性能产生关键影响。按照不同形状、尺度、高度、规模组建基站网，计算得到室内地面定位的HDOP、VDOP、PDOP。统计多种典型室内基站网的地面定位的HDOP、VDOP、PDOP均值。根据定量化的室内基站组网定位性能特征统计结果，分析得到下列基站组网原则：

1)从网形方面考虑，直线形基站网三维定位估计将出现法方程矩阵直接求逆失败，难以适用于三维定位服务。方形网定位精度分布不均匀，VDOP在服务区中间地带显著变大。圆形网定位精度分布较为均匀，PDOP优于方形网。圆形基站网中心加站后，VDOP显著减小。

2)从基站分布方面考虑，基站应围绕服务区域边界上空均匀分布，并尽可能地覆盖定位服务区域。

3)从尺度大小方面考虑，基站网半径越大，PDOP越小。

4)从DOP分布方面考虑，基站网中心区域HDOP最低，基站正下方区域VDOP最低。

5)从基站个数与规模方面考虑，基站数建议大于4个，基站数越多PDOP越小。

6)从基站网高度方面考虑，VDOP受基站网高度和基站数量变化的影响最显著。基站网高度约为其半径的1/2时，平面和垂直定位精度达到均衡。

5 结 语

在室外开阔区域，GNSS提供了成熟稳定的定位、导航、授时等服务。但是，室内难以接收到导航卫星信号。室内定位将采用其他测距型基站定位系统。如何部署室内基站以满足室内定位性能指标要求，并系统掌握各类基站网的定位性能、存在的问题和影响特征，成为室内基站组

网定位的研究热点。为此,本文围绕室内定位服务区DOP分布及统计值,定量计算和深入分析了各类基站组网的定位性能,得到了不同组网形状、网形尺寸、部署高度、数量规模等条件下的定位性能特征,形成了基站组网方案设计的初步参考原则。

通过设计不同形状、尺度、高度、规模的基站组网方案,开展了基站定位性能计算实验。从多维度、多尺度分析定位性能计算和实验结果,归纳得到下列结论:(1)圆形基站网PDOP优于方形网,直线形基站网不适宜进行三维定位服务。(2)基站网半径增加一倍,PDOP减小一倍。(3)基站网的高度增大一倍,HDOP和PDOP减小1/3。(4)圆形网的基站数增大一倍,PDOP减小1/3。(5)基站网高度约为其1/2半径时,HDOP和VDOP比较接近。(6)沿区域边界上空均匀部署6个以上基站时,HDOP和VDOP优于1。

上述基站组网定位性能的特征将为广大室内定位系统设计提供参考原则和有益引导。计算和归纳得到各类基站网的定位特征,有助于精细化研究室内定位特性,并深刻理解定位规律。特别地,研究结果可为基站部署的形状、高度、数量、半径等疑难设计工作提供有力支撑,并在组网定位性能预报和最优定位区域辨识等方面作出重要贡献。后续将继续针对室内遮挡和多路径效应等室内定位分析的其他领域开展系统性分析和定量化研究,进一步扩展室内基站组网性能分析研究领域。

参　考　文　献

[1] 柳景斌, 赵智博, 胡宁松, 等. 室内高精度定位技术总结与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(7): 997-1008.
LIU Jingbin, ZHAO Zhibo, HU Ningsong, et al. Summary and Prospect of Indoor High-Precision Positioning Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 997-1008.

[2] 陈锐志, 叶锋. 基于Wi-Fi信道状态信息的室内定位技术现状综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2064-2070.
CHEN Ruizhi, YE Feng. An Overview of Indoor Positioning Technology Based on Wi-Fi Channel State Information[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2064-2070.

[3] 姚海云, 舒红, 孙红星, 等. Wi-Fi室内定位测站布设优化的DOP数值分析[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(2): 34-38.
YAO Haiyun, SHU Hong, SUN Hongxing, et al. DOP Numerical Analysis of Wi-Fi Indoor Positioning Station Setting Optimization[J]. *Journal of Geomatics*, 2022,47(2):34-38.

[4] 周恭谦, 杨露菁, 刘忠, 等. 基于TDOA定位的基站布设对模糊区分布及定位精度的影响分析[J]. 海军工程大学学报,2017, 29(1): 96-101.
ZHOU Gongqian, YANG Lujing, LIU Zhong, et al. Influence of Base Station Deployment on Location Precision and Fuzzy Area Distribution Based on TDOA Location[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2017, 29(1): 96-101.

[5] 张书雨, 姚铮, 陆明泉. 地基伪卫星区域导航系统快速布设算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(9): 1355-1361.
ZHANG Shuyu, YAO Zheng, LU Mingquan. Rapid Configuration Algorithm for Ground-Based Pseudolite Navigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1355-1361.

[6] 王川阳, 王坚. 超宽带应急定位基站布设研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(8):174-181.
WANG Chuanyang, WANG Jian. Study of Base Station Layout of Ultra Wideband Emergency Positioning[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(8): 174-181.

[7] 张晖, 秦基伟. 高密度小基站网络关键技术及部署策略研究[J]. 智能建筑与城市信息, 2015, 229(12):94-98.
ZHANG Hui, QIN Jiwei. Research on Key Technologies and Deployment Strategies of High Density Small Base Station Network[J]. *Intelligent Building & City Information*, 2015, 229(12):94-98.

[8] LANGLEY R B. Dilution of Precision[J]. *GPS World*, 1999, 10(5):52-59.

[9] 侯全武, 王坚, 胡洪, 等. 传感器位置对狭长空间定位精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(1): 117-122.
HOU Quanwu, WANG Jian, HU Hong, et al. Analysis of Effects on Location Accuracy of Sensors in Narrow Space[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(1):117-122.

[10] DEMPSTER A G. Dilution of Precision in Angle-of-Arrival Positioning Systems[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(5):291-292.

[11] LI B, DEMPSTER A G, JIAN W. 3D DOPs for Positioning Applications Using Range Measurements[J]. *Wireless Sensor Network*, 2011, 3(10):

343-349.

[12] 宋倩,张波,李署坚. 地面伪卫星组网布设技术研究[J]. 计算机测量与控制,2013,21(3):743-746.
SONG Qian, ZHANG Bo, LI Shujian. Study of Configuration Technology of Ground Pseudolite[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(3): 743-746.

[13] 刘超,高井祥,于子晏,等. GPS/伪卫星相对定位中伪卫星优化布设模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(1):120-126.
LIU Chao, GAO Jingxiang, YU Ziyan, et al. An Optimal Pseudolites Location Model of GPS/Pesudolites Integrated Relative Positioning[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(1):120-126.

[14] 王玮,刘宗玉,谢荣荣. 伪卫星辅助的北斗定位系统的GDOP研究[J]. 空间科学学报,2005(1):57-62.
WANG Wei, LIU Zongyu, XIE Rongrong. The Research on GDOP of PL-Aided Beidou Positioning System[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2005(1):57-62.

[15] Levanon N. Lowest GDOP in 2-D Scenarios[J]. *IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2000,147(3):149-155.

[16] 何小峰. 二维TOA定位中的最小GDOP问题[J]. 指挥控制与仿真,2014,36(6):52-55.
HE Xiaofeng. Lowest GDOP of 2-D TOA-Positioning Systems[J]. *Command Control & Simulation*, 2014,36(6):52-55.

[17] 童俊,单甘霖. 基于目标定位精度Cramér-Rao下限的多传感器空间布站研究[J]. 计算机测量与控制,2013,21(3):738-742.
TONG Jun, SHAN Ganlin. A Study of Multi-sensor Space Configuration Optimization Based on Target Position Precision Cramér-Rao Low Bound[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(3): 738-742.

[18] FENG G, SHEN C, LONG C, et al. GDOP Index in UWB Indoor Location System Experiment[C]//IEEE International Conference on Sensors, Busan, Korea, 2015.

[19] 何琦敏,王坚,敖佳敏,等. IAGA模型支持下的灾区基站组网优化[J]. 测绘通报,2017(8):7-12.
HE Qimin, WANG Jian, AO Jiamin, et al. Optimization of Disaster Base Station Network Based on IAGA Model[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(8):7-12.

[20] 王雪延. 基于UWB基站配置的室内定位研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
WANG Xueyan. A Study of Indoor Positioning Based on UWB Base-Station Configurations[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.