

基于多参数融合的超宽带基站布设优化方法

陈 兆^{1,2}, 王 玫^{1,3}, 周 隰^{1,4}, 杨 帆^{1,4}, 张国立^{1,4}, 仇洪冰^{1,4}

- (1. 桂林电子科技大学认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室, 广西桂林 541004;
2. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 3. 桂林理工大学信息科学与工程学院, 广西桂林 541007;
4. 桂林电子科技大学广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 超宽带室内定位精度受非视距传播(Non-Line Of Sight, NLOS)、多径效应、基站布设等因素影响,而这些因素均与基站的布设阵型有关. 因此,本文提出一种基于位置精度稀释因子(Positioning Dilution Of Precision, PDOP)、到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)测量误差和克拉美劳界的基站布设优化数学模型,可用遗传算法和萤火虫算法等智能算法求解. 理论推导和仿真测试表明优化后的基站布设阵型相较于传统的立方体 8 基站阵型具有更好的平均误差和方差. 14.5 m × 7.6 m × 3 m 展厅的实测实验结果表明,经过优化后的基站布设阵型定位精度提高了 0.713 2 cm,且方差减小了 50.649 6 cm²具有较高的稳定性.

关键词: 超宽带室内定位; 基站布设; 位置精度稀释因子; 克拉美劳界; TDOA 测量误差

基金项目: 国家自然科学基金(No.61771151); 广西重点研发计划项目(No.桂科 AB17292058)

中图分类号: TN828.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)10-2855-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210618

Optimization Method for Ultra-Wideband Base Station Configuration Based on Multi-Parameter Fusion

CHEN Zhao^{1,2}, WANG Mei^{1,3}, ZHOU Zou^{1,4}, YANG Fan^{1,4}, ZHANG Guo-li^{1,4}, QIU Hong-bing^{1,4}

- (1. Provincial Ministry of Education Key Laboratory of Cognitive Radio and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
3. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541007, China;
4. Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Ultra-wideband indoor positioning accuracy is affected by Non-Line of Sight (NLOS), multipath effect, base station configuration and other factors, and these factors are related to the base station configuration. Therefore, this paper proposes a base station configuration optimization mathematical model based on positioning dilution of precision (PDOP), time difference of arrival (TDOA) measurement error and Cramer-Rao bound, which can be solved by intelligent algorithms such as genetic algorithm and firefly algorithm. Theoretical derivation and simulation test show that the optimized base station configuration has better average error and variance than the traditional cuboid 8 base station configuration. The experimental results in 14.5 m × 7.6 m × 3 m exhibition hall show that the positioning accuracy of the optimized base station configuration is improved by 0.713 2 cm, and the variance is reduced by 50.649 6 cm², which has high stability.

Key words: ultra-wideband; base station configuration; positioning dilution of precision; Cramer-Rao bound; TDOA measurement error

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61771151); Guangxi Key Research and Development Plan Project (No.Guikex AB17292058)

1 引言

超宽带(Ultra-wideband, UWB)凭借其极大的带宽和极高的时间分辨率^[1],在室内定位中具有巨大的优势.在UWB室内定位中,多径效应、非视距传播和基站布设等影响定位精度的问题仍待解决,尤其是基站的布设阵型直接影响信号的视距传播(Line Of Sight, LOS)、非视距传播(Non-Line Of Sight, NLOS)、时间测量精度等,进而影响测距精度和定位解算精度.在室内不规则空间中,为了尽可能地减少NLOS,需将基站布设在通视环境下,以提高定位精度.同时,由于电磁波测距误差与测程呈正相关^[2,3],需对基站布设进行几何规划,缩短空间中任意位置到基站的距离.由于基站布设的好坏直接影响定位精度,因此UWB基站布设优化对提高定位精度具有至关重要的作用和意义.

基站布设通常采用设计、验证的方法.根据场景结构粗略选取规则阵型,采用相关准则分析定位精度.常用的精度分析准则包括克拉美劳界(Cramer-Rao Bound, CRB)和精度稀释因子(Dilution Of Precision, DOP)等.CRB是评估任何无偏估计量基准韧性的一般方法^[4],已被广泛用于优化锚点布局.文献[5]针对单个目标点使用CRB推导出基站在多面体顶点的最佳布局,但未对定位区域内多个目标点的基站布设进行整体研究.文献[6]对固定锚点定位的CRB进行了研究,确定了仅由锚点构成的局部几何体的CRB上下界,表明可以运用局部几何来预测估计位置的精度.但是在大多数情况下,使用CRB进行基站布设优化的方法都是通过穷举法搜索最小的平均CRB,得到一个最佳的锚点布局.文献[7]将整个定位区域划分为若干个网格,使用排列组合的方式获得基站位置,并对全平面进行评估.这类方法计算复杂度高,且计算量很大.

由于几何精度稀释因子(Geometric Dilution Of Precision, GDOP)将几何位置造成的误差和信号传播造成的误差分离^[8],近几年国内外将卫星导航领域中的GDOP引入室内定位中.GDOP代表全球定位系统(Globe Positioning System, GPS)测距误差的放大倍数^[9].卫星的几何分布、数量等参数均会对GDOP产生影响^[10].文献[11~13]比较了立方体、Y-4型、L-3型和镜像阵型4种基站配置的定位精度,并首次引入GDOP用于评价超宽带基站配置.文献[14,15]在上述4种基站配置的基础上增加一种双层8基站配置,并就这几种基站配置进行仿真对比实验,最后使用GDOP均值来评价基站阵型.文献[16]使用4种基站配置对DOP的分布和DOP与基站配置的关系进行研究.在对定位精度要求不高的情况下,使用少量的基站具有节省空间资源和成本的优势,但这类研究仅仅是针对几种典型的基

站配置进行研究,未提出基站配置优化的方法.

文献[17]提出用位置精度稀释因子(Positioning Dilution Of Precision, PDOP)建立最优几何基站布局的数学模型,然后使用遗传算法对该模型求解.文献[18]对多种DOP进行加权求和后作为优化目标,采用基于最大凸包优化(Optimization Searching based on Maximum Convex-hull, OSMC)的方法求得最佳基站布局.与前面的文献采用设计、验证的方法不同的是,文献[17,18]提出了最优基站布设阵型的求解方法,但均采用DOP作为优化模型的性能评价指标.

笔者团队已对PDOP在超宽带室内定位基站布设优化中的适用性进行了分析^[19],结果表明PDOP仅从基站与标签的角度对基站布局的好坏进行评价,忽略了各个基站与标签之间的距离差异性.因此,PDOP在室内定位中具有一定的局限性.虽然PDOP客观的评价角度对定位结果的影响具有参考价值,但是其在室内定位中的局限性使其无法作为一种基站布设优化的决定性度量标准.因此如何合理地评价基站布设性能是目前亟待解决的问题.

基站布设优化的目标是提高精度和稳定性,即减小误差和方差.本文基于这一考虑,做出如下贡献:

- (1)提出多目标联合优化框架;
- (2)根据优化框架中的目标,提出使用PDOP、到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)测量误差和CRB建立基站布设优化数学模型;
- (3)针对该数学模型,分别使用遗传算法和萤火虫算法进行求解,并对两种算法的性能进行对比;
- (4)在 $14.5\text{ m} \times 7.6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 展厅中将求解得到的基站阵型与立方体8基站阵型进行实测数据对比.

2 超宽带基站布设优化方法

2.1 多目标联合优化框架

本文针对提高精度和稳定性两个目标,既减小误差和减小方差,提出超宽带基站布设的多目标联合优化框架.该框架仅需输入场景大小和约束条件,便可以在基站布设的可行解区域内不断搜索基站的布设位置,直至基站布设阵型的性能满足设定的终止条件,最后输出当前最优的基站坐标.多目标联合优化框架如图1所示.

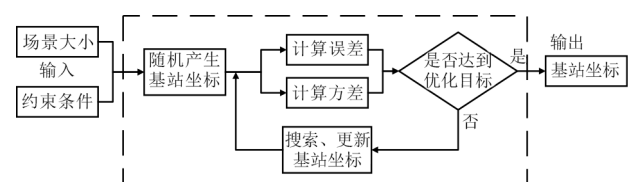


图1 多目标联合优化框架

2.2 基站布设优化数学模型

2.2.1 基站布设评价指标

基站布设评价指标通常有 CRB、GDOP、误差等,本文根据优化框架中提出的目标选取 CRB、PDOP 和 TDOA 测量误差作为评价指标,其中 CRB 作为方差的评价指标,PDOP 和 TDOA 测量误差作为定位误差的评价指标,PDOP 用于评价基站与标签之间的角度造成的误差,TDOA 测量误差用于评价基站与标签之间的距离造成的误差.

2.2.1.1 克拉美劳界

克拉美劳界定义为任意无偏估计量的方差确定了一个下限,即

$$CRB = \left[\frac{1}{I(\theta)} \right]_{ii} \leq \text{var}(\hat{\theta}_i) \quad (1)$$

$$I(\theta) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} & -\sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)(z-z_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} \\ -\sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(y-y_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} & -\sum_{i=1}^N \frac{(y-y_i)(z-z_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)(z-z_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} & -\sum_{i=1}^N \frac{(y-y_i)(z-z_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(z-z_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, (x, y, z) 为标签坐标, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个基站的坐标, d_i 为第 i 个基站到标签的距离,随机误差视为独立加性高斯噪声 $\sim N(0, \sigma_i^2)$,可得估计方差之和:

$$E[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2] \geq \frac{1}{[I(\theta)]_{11}} + \frac{1}{[I(\theta)]_{22}} + \frac{1}{[I(\theta)]_{33}} \quad (5)$$

CRB 为误差的方差设定了下限,而方差则是度量误差的离散程度.因此,在全局误差尽可能小的同时,为了保证误差的波动性较小,也需要平均 CRB 尽可能小.

2.2.1.2 位置精度稀释因子

在定位系统中, GDOP 是目前最受欢迎的用来确定什么是良好的锚节点几何形状的度量标准.在不包括对时间偏移误差的估计的定位应用中, GDOP 应被替换为 PDOP^[9]. PDOP 表示定位误差与测距误差的比值,与定位误差呈正比.

PDOP 在求解过程中,将各个基站到标签的距离进行了归一化处理,所有基站被视为位于以标签为球心的单位球体上,仅根据基站与标签之间的角度对基站的布局进行评价,而忽略了各个基站到标签距离的差异性.在室内定位中,锚点与标签之间的角度对定位精度的影响固然重要,但测距误差(即时间测量误差)对定位精度的影响同样重要.因此, PDOP 在基站布设优化中不能作为一个决定性的评价指标,但可以作为一个参考指标^[19].

PDOP 由水平精度稀释因子(Horizontal Dilution Of

其中, $\hat{\theta}$ 是估计估计参数 θ 的无偏估计, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T$ 是要估计的矢量参数, $I(\theta)$ 是 $p \times p$ 费雪信息矩阵(Fisher Information Matrix, FIM), 定义为

$$[I(\theta)]_{ij} = -E \left[\frac{\partial^2 \ln p(x, \theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] \quad (2)$$

其中, $i \in \{1, 2, \dots, p\}, j \in \{1, 2, \dots, p\}, p(x, \theta)$ 为似然函数, $E\{\cdot\}$ 为期望值,则噪声模型的 FIM 为

$$I(\theta) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{\sigma_i^2 d_i^2} & \sum_{i=1}^N \frac{(y-y_i)^2}{\sigma_i^2 d_i^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

推广到三维的 FIM 为

Precision, HDOP) 和垂直精度稀释因子(Vertical Dilution Of Precision, VDOP)求得,即

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (6)$$

而 HDOP 和 VDOP 则由观测矩阵 H 和权系数矩阵 Q 求得,观测矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} x_1 - x & y_1 - y & z_1 - z \\ r_1 & r_1 & r_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x & y_n - y & z_n - z \\ r_n & r_n & r_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, (x, y, z) 为标签坐标, (x_n, y_n, z_n) 为第 n 个基站的坐标, r_n 为标签到第 n 个基站的距离. 而权系数矩阵 Q 为

$$Q = (H^T H)^{-1} \quad (8)$$

其中, Q 为 3×3 矩阵, q_{ii} 为 Q 的对角线元素.

$$\begin{cases} HDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22}} \\ VDOP = \sqrt{q_{33}} \\ PDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \end{cases} \quad (9)$$

2.2.1.3 TDOA 测量误差

在室内定位中,定位误差的主要来源是时间测量误差(即测距误差).这种测距误差是由物理测量、NLOS 和多径效应等原因造成的, UWB 测距误差主要是 NLOS 引起的.在通视环境下,可以排除 NLOS 的干扰,但多径效应无法避免,只有在微波暗室中通过墙壁的

特殊材质吸附电磁波,才能消除多径效应造成的影响,然而实际工程应用中不可能具有微波暗室的条件.即使 UWB 信号被至少一个脉冲宽度持续时间隔开,使信号不会产生重叠,也仅仅是相对于窄带信号具有较好的抗多径效应,但仍然无法完全避免多径效应的干扰^[20].

在测距过程中会存在物理测量引起的误差,即使是处于 LOS 环境,且不受多径干扰的情况下,这种误差仍然存在.误差方程经线性拟合后,可表示为

$$\gamma_{P,i} = a + br_i + \varepsilon_i$$

其中, $\gamma_{P,i}$ 为物理测量引起的误差, a 为系统自身误差, b 为测距影响因子, r_i 为测程, $a + br_i$ 构成系统误差, ε_i 为随机误差.

文献[3]提出对多径误差进行建模,得到

$$\gamma_{M,i} = G \log(1 + r_i)$$

其中, $\gamma_{M,i}$ 为多径效应引起的误差, G 为归一化误差的参数,使误差归一化之后服从高斯分布,因此误差方程应为

$$\gamma_i = \gamma_{P,i} + \gamma_{M,i} = a + br_i + \varepsilon_i + G \log(1 + r_i) \quad (10)$$

由于 TDOA 使用到达时间差,即使用标签到达各个基站的距离差解算标签的坐标,则各个基站间的观测距离差 \hat{r}_{ij} 为

$$\begin{aligned} \hat{r}_{ij} &= \hat{r}_i - \hat{r}_j \\ &= (r_i + \gamma_i) - (r_j + \gamma_j) \\ &= (r_i - r_j) + b(r_i - r_j) + (\varepsilon_i - \varepsilon_j) + G \log \frac{1 + r_i}{1 + r_j} \quad (11) \\ &\approx (r_i - r_j) + b(r_i - r_j) + G \log \frac{1 + r_i}{1 + r_j} \end{aligned}$$

其中, $b(r_i - r_j) + G \log[(1 + r_i)/(1 + r_j)]$ 为观测误差, $(r_i - r_j)$ 为真实距离差,随机误差 $(\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ 足够小故可忽略不计, TDOA 的计算公式为

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & r_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 & r_{n1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ r_1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_{21} - r_{21}^2 \\ K_{31} - r_{31}^2 \\ \vdots \\ K_{n1} - r_{n1}^2 \end{bmatrix} \quad (12) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & r_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 & r_{n1} \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ r_1 \end{bmatrix}, \\ b &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_{21} - r_{21}^2 \\ K_{31} - r_{31}^2 \\ \vdots \\ K_{n1} - r_{n1}^2 \end{bmatrix}, \theta = A^+ b = (A^T A)^{-1} A^T b, \end{aligned}$$

(x, y, z) 为标签坐标, (x_n, y_n, z_n) 为第 n 个基站的坐标, r_1 为标签到第 1 个基站的距离, r_{n1} 为标签到第 n 个基站的距离与标签到第 1 个基站的距离差, $K_{n1} = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2$. 利用观测值进行 TDOA 计算的公式则应改为

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & \hat{r}_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & \hat{r}_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 & \hat{r}_{n1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ \hat{r}_1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_{21} - \hat{r}_{21}^2 \\ K_{31} - \hat{r}_{31}^2 \\ \vdots \\ K_{n1} - \hat{r}_{n1}^2 \end{bmatrix} \quad (13) \end{aligned}$$

对式(13)求解得到 $\hat{\theta} = \hat{A}^+ \hat{b}$, 则定位误差为

$$\Delta = \hat{\theta} - \theta = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta r_1]^T \quad (14)$$

进而得到 TDOA 测量误差为

$$\varphi = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (15)$$

可知, TDOA 时差测量误差与距离差 r_{ij} 的平方和呈正相关,即误差随着 r_{ij} 的平方和增大而增大. CRB 为误差的方差设定了下限. 虽然方差能够很好地描述数据与均值之间的偏离程度,但方差与本文处理得到的误差的量纲不一致,不符合我们的直观思维. 因此,需要引入均方误差 (Mean-Square Error, MSE). 均方误差是各个数据偏离真实值的距离平方和的平均数,即误差平方和的平均数,计算公式形式上接近方差,即

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2)}{N} \quad (16)$$

其中, Δx_i , Δy_i 和 Δz_i 分别为 X , Y 和 Z 方向上的误差, N 为样本点的个数.

2.2.2 优化目标函数

本文提出使用 TDOA 测量误差、PDOP 均值和平均 CRB 评估整个目标空间的基站性能,因此目标函数为

$$\begin{aligned} \min f_1(X, Y, Z) &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{CRB}_{ij}}{M \times N} \\ \min f_2(X, Y, Z) &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{PDOP}_{ij}}{M \times N} \quad (17) \\ \min f_3(X, Y, Z) &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2)}{M \times N} \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } x_{\min} < x_k < x_{\max}, y_{\min} < y_k < y_{\max},$$

$$z_{\min} < z_k < z_{\max}, k = 1, 2, \dots, n$$

其中, $X \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $Y \in \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, $Z \in$

$\{z_1, z_2, \dots, z_n\}; (x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ 和 $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ 表示在可行解区域中, 基站在 X, Y, Z 方向的上下界; 场景被剖分成 $M \times N$ 个微小区域, 每个微小区域可视为一个样本点, CRB_{ij} , $PDOP_{ij}$ 和 $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij}$ 分别为第 i 行第 j 列的样本点的 CRB、PDOP 和 X, Y, Z 方向的误差. 使用时可以根据场景的实际需求添加相应的约束条件.

由于 3 个目标函数的自变量一致, 可以根据目标之间的相对重要程度, 将多目标优化问题转变为单目标优化问题, 即基于加权的多参数融合模型, 其目标函数为

$$\begin{aligned} \min f(X, Y, Z) &= w_1 \times f_1(X, Y, Z) + w_2 \times f_2(X, Y, Z) \\ &\quad + w_3 \times f_3(X, Y, Z) \\ &= w_1 \times \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N CRB_{ij}}{M \times N} + w_2 \times \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N PDOP_{ij}}{M \times N} \\ &\quad + w_3 \times MSE \end{aligned} \quad (18)$$

s.t. $x_{\min} < X < x_{\max}, y_{\min} < Y < y_{\max}, z_{\min} < Z < z_{\max}$

根据不同场景需求, 调整 CRB, PDOP 和 TDOA 四方误差的权重系数 w_1, w_2 和 w_3 , 其中 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$. 本文采用平均权重原理, 即 $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$.

2.3 优化目标函数求解方法

由于室内空间的建筑结构, 超宽带基站的布设位置处于一个密闭区域内, 因此存在无数种布设方法, 通常其最优解的求解方法有穷举法、遗传算法、粒子群算法、爬山法、萤火虫算法等. 本文在使用遗传算法求解过程中, 发现遗传算法虽然收敛速度很快, 但计算过程极为复杂, 且难跳出局部最优. 萤火虫算法虽收敛速度相对较慢, 但计算过程较为简单, 且能跳出局部最优, 找到更优解, 因此改用萤火虫算法进行求解.

萤火虫算法 (Firefly Algorithm, FA) 模仿萤火虫之间信息交流, 相互吸引集合, 将目标函数值作为萤火虫的亮度, 亮度越大表明位置越好. 在解空间内, 其他萤火虫会被亮度大的萤火虫吸引, 并不断向它靠近来搜寻更优的位置. 在超宽带基站布设优化中, 本文将第 2.2.2 节中的目标函数值作为萤火虫的亮度, 目标函数值越低的点, 亮度越高. 其基本算法流程如算法 1 所示.

3 实验分析

3.1 计算机仿真

3.1.1 基站优化仿真实验

本文的仿真实验从实际应用出发, 将场景大小设置为 $14.5 \text{ m} \times 7.6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 为了不影响日常的生产生活, 基站仅能沿四周墙壁布设. 将房间大小和约束条件输入到超宽带基站布设优化程序中, 得到优化后的基站布设阵型, 超宽带基站布设优化程序界面如图 2 所示. 分别用

算法 1 基于萤火虫算法的基站布设优化算法

输入: 场景大小 $[X, Y, Z]$, 控制参数 $[N, \gamma, \beta_0, \alpha, M, f(D)]$ /* 种群大小 N , 光强吸收系数 γ , 最大吸引度 β_0 , 迭代步长 α , 最大迭代次数 M , 目标函数 $f(D)$ */

输出: 全局最优基站布设阵型 D_{opt} /* 最优个体 */

初始化: 迭代次数 $m = 0$, 当前最优基站布设阵型 $D_{\text{opt}}^{(0)} = \mathbf{0}$, 全局最优基站布设阵型 $D_{\text{opt}} = \mathbf{0}$, 随机生成 N 种初始基站布设阵型

$[D_1^{(0)}, D_2^{(0)}, \dots, D_N^{(0)}]$ /* 一种基站布设阵型几位一个个体 */

1. 计算当前所有基站布设阵型的目标函数值

$f(D_1^{(0)}), f(D_2^{(0)}), \dots, f(D_N^{(0)})$

2. 计算当前最优基站布设阵型 $D_{\text{opt}}^{(0)} = \arg \min_{D \in \{D_1^{(0)}, D_2^{(0)}, \dots, D_N^{(0)}\}} f(D)$, 并令全局最优基站布设阵型 $D_{\text{opt}} = D_{\text{opt}}^{(0)}$, 记最优基站布设阵型的索引为 n_{\min}

WHILE ($m < M$) DO

3. 以向最优基站布设阵型靠近的策略, 更新部分基站布设阵型

$D_n^{(m+1)} = D_n^{(m)} + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (D_{\text{opt}}^{(m)} - D_n^{(m)}) + \alpha e^{\frac{m}{n_{\min}}} \frac{D_{\text{opt}}^{(m)} - D_n^{(m)}}{|D_{\text{opt}}^{(m)} - D_n^{(m)}|}$ 其中

$n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 且 $n \neq n_{\min}$

4. 随机移动 $D_{n_{\min}}^{(m)}$, 得到 $D_{n_{\min}}^{(m+1)}$, 完成对所有基站布设阵型的更新

5. 计算所有基站布设阵型的目标函数值

$f(D_1^{(m+1)}), f(D_2^{(m+1)}), \dots, f(D_N^{(m+1)})$

6. 计算当前最优基站布设阵型 $D_{\text{opt}}^{(m+1)} = \arg \min_{D \in \{D_1^{(m+1)}, D_2^{(m+1)}, \dots, D_N^{(m+1)}\}} f(D)$

并更新最优基站布设阵型索引 n_{\min}

IF ($f(D_{\text{opt}}^{(m+1)}) < f(D_{\text{opt}}^{(m)})$) THEN

7. 更新全局最优基站布设阵型 $D_{\text{opt}} = D_{\text{opt}}^{(m+1)}$

END IF

8. $m = m + 1$

END WHILE

立方体 8 基站阵型与优化后的基站布设阵型进行仿真, 得到的误差分布图、PDOP 分布图和 CRB 分布图如图 3 所示, 图中红色点代表基站位置, 结果对比如表 1 所示. 根据仿真实验结果表明, 经过优化后的基站布设阵型, 其定位误差及其方差均有明显的下降, 同时满足多目标联合优化框架中的优化目标, 达到预期效果.

3.1.2 算法对比实验

本文使用遗传算法和萤火虫算法对目标函数求解并进行性能对比, 两种求解方法均由 C++ 编程实现, 其中目标函数求解模块由 MATLAB 编程实现. 两种求解方法的对比结果如表 2 所示.

从表 2 可以看出, 遗传算法每一轮迭代都需要比萤火虫算法消耗更多的计算时间. 由于目标函数的计算过程一致, 因此计算所有个体误差的时间基本相同. 遗传算法比萤火虫算法多消耗的时间主要用于种群进化, 原因在于其种群进化过程远比萤火虫算法复杂.

由于遗传算法的搜索过程属于随机搜索, 因此前期收敛速度很快, 但是当目标函数值下降到一定限度



图2 超宽带基站布设优化程序界面

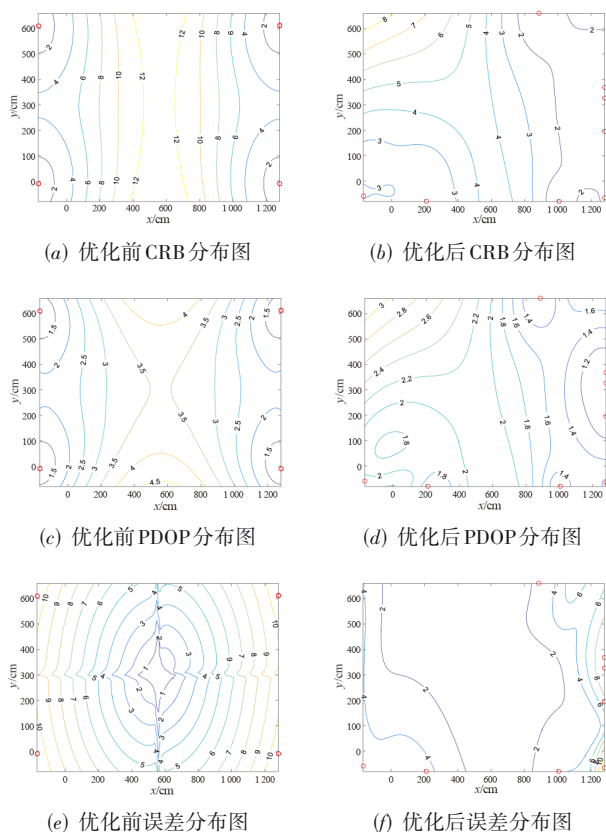


图3 优化前后CRB分布图、PDOP分布图和误差分布图

表1 优化前后性能对比表(仿真)

性能参数	立方体8基站阵型	优化后基站阵型
CRB	7.645 4	3.443 9
PDOP	2.880 4	1.899 6
MSE/cm ²	40.926 9	8.963 9

时,很难再找到更优的解. 而萤火虫算法的搜索过程属于沿路径搜索,因此收敛速度相对较慢,但能跳出局部

表2 萤火虫算法与遗传算法性能对比

性能参数	萤火虫算法	遗传算法
迭代次数	300次	100次
每一轮迭代计算时间	约等于3 s	约等于9 s
每一轮种群进化计算时间	约等于1 ms	约等于6 s
所有个体适应度计算时间	约等于3 s	约等于3 s
总计算时间	约15 min 30 s	约15 min 10 s
收敛时间	约13 min 20 s	约12 min 30 s

最优,找到更优解. 两种求解方法的收敛曲线如图4所示. 两种求解方法的收敛曲线均为10次实验的平均值.

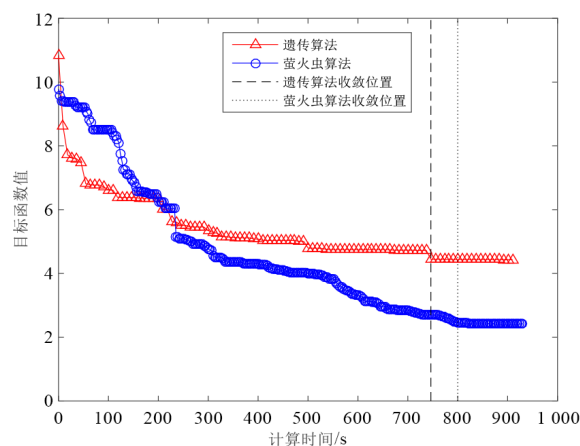


图4 算法收敛曲线对比图

3.2 实测实验与讨论

3.2.1 实验场景与设备

本文的实验场景选取某展厅,该展厅大小为14.5 m × 7.6 m × 3 m,展厅内视野开阔,实验场景和实验场景模拟图如图5所示. 实验设备有超宽带室内定位系统、全站仪和计算机,其中超宽带室内定位系统使用四川中电昆辰鹰眼系统,包括8台基站、1个标签和1台同步控制器,基站之间用光纤相连,并固定在桁架上以方便移动. 为获得基站天线和标签的实际精确位置,使用南方测绘 NTS-332R4 全站仪给基站天线和标签定标. 超宽带室内定位系统将接收到的标签信号到达时间戳传给光纤同步控制器进行延时补偿,然后再将时间戳传送给计算机,计算机再利用TDOA解算出标签坐标. 超宽带室内定位基站、标签、同步控制器和全站仪如图6所示.

3.2.2 单点二维优化实验

为了验证本文提出的超宽带基站布设性能评价指标和求解方法在实际工程应用中的可行性,先进行一次没有约束条件的单点二维优化实验,即仅针对单个目标点进行优化,而未对全局进行优化.



(a) 实验场景图



(b) 实验场景模拟图

图5 实验场景

该实验中,先使用MATLAB在可行解范围内生成一组随机坐标作为待优化目标点,共4个点,待优化目标点的位置如图7所示.使用传统的方形四基站布设阵型求解各个目标点约10 s内的位置,再计算得到各个目标点优化前的定位误差.最后将各个目标点依次输入基站布设优化程序中,得到相应的布设阵型.基站根据求解得到的优化阵型进行重新部署,再次求解对应目标点约10 s内的位置,计算得到其优化后的定位误差.

4组实验中,优化后基站布设阵型的定位误差均小于优化前基站布设阵型,但方差有所增大,四组实验的优化前后基站布设阵型图和优化前后误差对比图如图8所示,图8(a)(c)(e)和(g)中红色星点为优化前基站位置,黑色三角形为优化后基站位置,蓝色圆圈为标

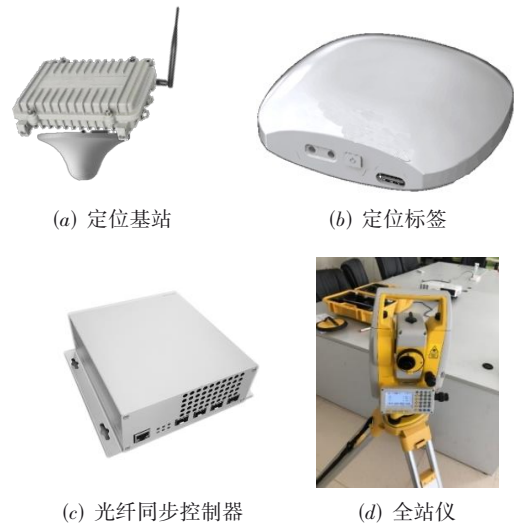


图6 实验设备

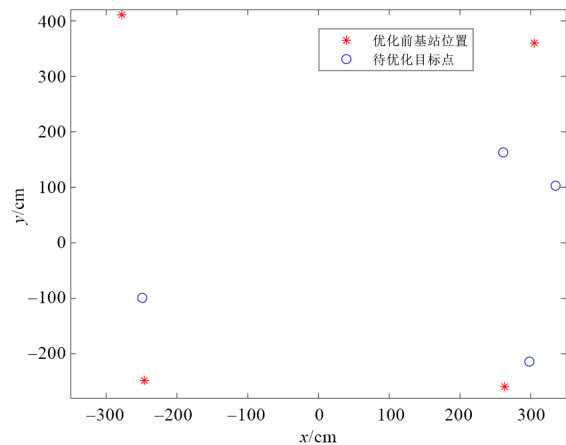


图7 待优化目标点位置分布图

签位置,图8(b)(d)(f)和(h)中显示4组实验在大约10 s内多次定位结果的误差,横坐标表示第n次定位,纵坐标表示定位误差,其中蓝色曲线为优化前的定位误差,红色曲线为优化后的定位误差,实验结果如表3所示.

优化后的基站布设阵型中,各个基站以标签为圆心呈类似扇形分布,且各个基站到标签的距离相差甚微,这是由于第2.2节中推导出来的TDOA测量误差与标签到各个基站之间的距离差呈正相关,当标签到各个基站的距离越接近时,即标签到各个基站之间的距离差越小,则定位误差越小.从图8的4组实验中可以看出,优化后的基站阵型确实能提高定位精度,但第1、第2和第4组的提升效果均不太明显,因为优化前的基站阵型本身已经可以获得较好的定位精度,因此优化后的定位精度提升效果并没有那么显著.特别要注意图8(f)对应的第3组实验的结果,具有一个明显的提升.优化前基站阵型的定位精度已较为糟糕,定位误

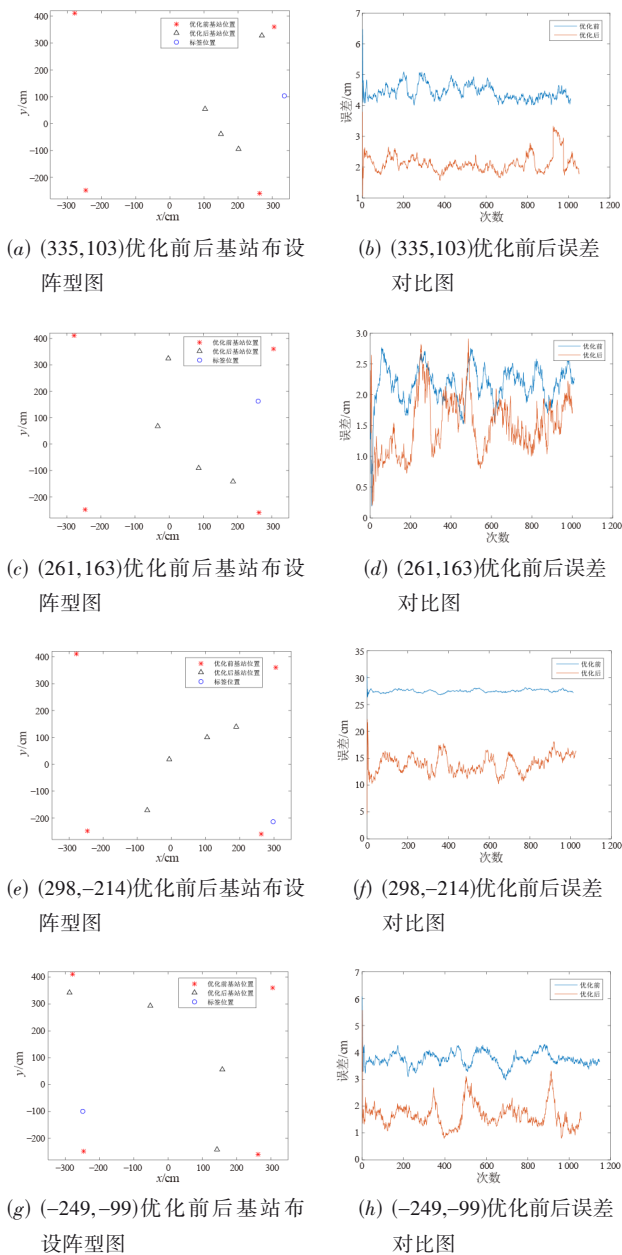


图8 优化前后基站布设振兴图和误差对比图

差接近 30 cm, 而优化后定位精度有了明显的提升, 定位误差减小了 10 cm. 从图 8(e) 的基站位置图可以发现, 该标签在优化前非常接近其中一个基站, 使该基站与其他基站到标签的距离差较大, 正如 2.2 节中阐述的, 在真实距离差较大的情况下将引入更大的测距误差, 从而导致定位结果恶化; 另一方面, 标签已超出优化前基站所围成的区域, 且与基站之间所构成的角度使其 PDOP 较差, 是其定位精度差的一个重要原因. 经过单点二维优化实验, 验证了本文提出的评价指标和求解方法在单目标优化的工程应用中的可行性.

表3 单点二维优化实验结果对比表

组别		平均误差/m	均方误差/m ²	方差/cm ²
第一组 (335,103)	优化前	4.439 9	19.771 9	0.059 1
	优化后	2.122 1	4.588 7	0.085 3
第二组 (261,163)	优化前	2.163 0	4.770 9	0.092 4
	优化后	1.499 2	2.451 2	0.203 7
第三组 (298,-214)	优化前	27.517 8	757.306 9	0.078 4
	优化后	13.973 6	198.156 9	2.895 8
第四组 (-249,-99)	优化前	3.751 4	14.139 9	0.067 1
	优化后	1.663 4	2.968 8	0.201 8

3.2.3 全局三维优化实验

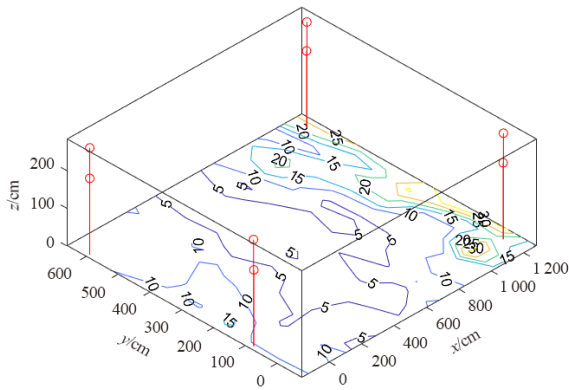
全局三维优化实验根据仿真实验中得到的基站布设阵型对基站进行部署, 然后与立方体 8 基站阵型进行实测数据对比. 实验结果表明, 优化后的基站布设阵型的性能得到提高, 误差和方差均明显减小. 优化后的基站布设阵型与立方体 8 基站阵型的数据对比如表 4 所示, 实际误差的分布图对比如图 9 所示, 图中红色点为基站位置.

表4 优化前后性能对比表(实测)

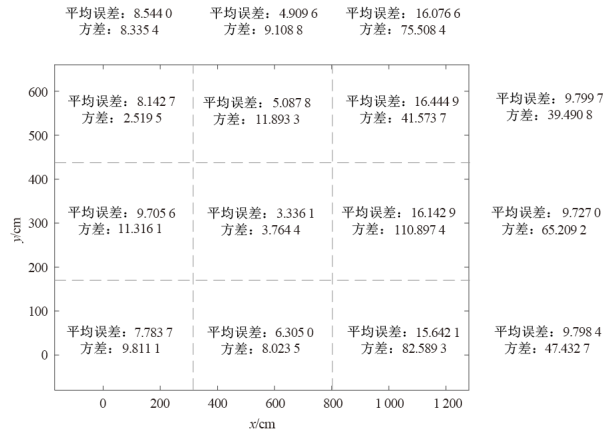
性能参数	立方体 8 基站阵型	优化后基站阵型
平均水平误差/cm	5.891 4	7.826 1
平均垂直误差/cm	7.237 9	3.863 6
平均三维误差/cm	9.775 0	9.061 8
均方误差/cm ²	145.373 6	96.645 5
方差/cm ²	66.138 1	15.488 5

根据图 9 可知, 经过实际测试, 优化后基站阵型的平均误差和方差比立方体 8 基站阵型小, 目标场景的边界区域误差明显降低, 超宽带室内定位系统的平均三维定位误差减小 0.713 2 cm, 定位精度得到提升. 图 9 中蓝色方框圈出的区域得到了明显的改善. 立方体 8 基站阵型在该区域的等势线较密集, 表示误差的上升梯度较大, 定位效果急剧恶化; 而优化后的基站阵型仅在角落区域的等势线较密集, 蓝色方框外的其他区域则基本一致.

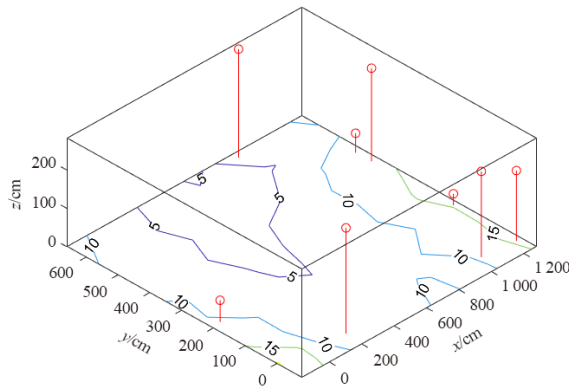
进一步地, 将场景划分为 9 个区域进行分析, 如图 10 所示, 其中图 10(b) 和 (d) 分别展示了优化前后各个区域的平均误差和方差. 通过图 10 的对比可以看出, 误差分布的主要区别在于区域 3, 6 和 9 (即 $x > 800$ cm 的区域, 图 9 中蓝色方框圈出的区域), 而区域 1, 2, 4, 5, 7 和 8 的误差和方差均较为平稳. 从图 10(b) 和 (d) 的对比中可以看出区域 3, 6 和 9 优化前的平均误差和方差均较大, 结合图 10(a) 可知该区域的定位精度较差且波动性较大, 稳定性较差; 优化后的定位误差有所减小,



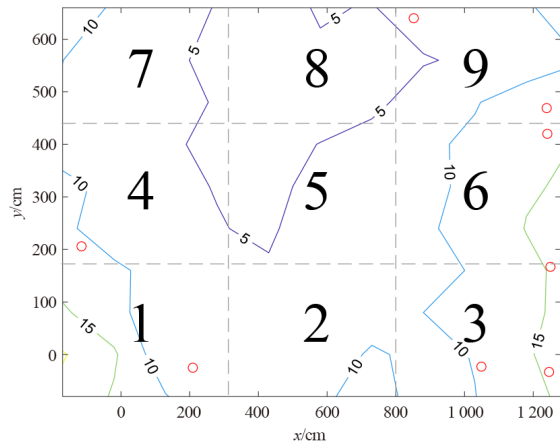
(a) 立方体 8 基站阵型实际误差分布图



(b) 立方体 8 基站阵型分区误差图



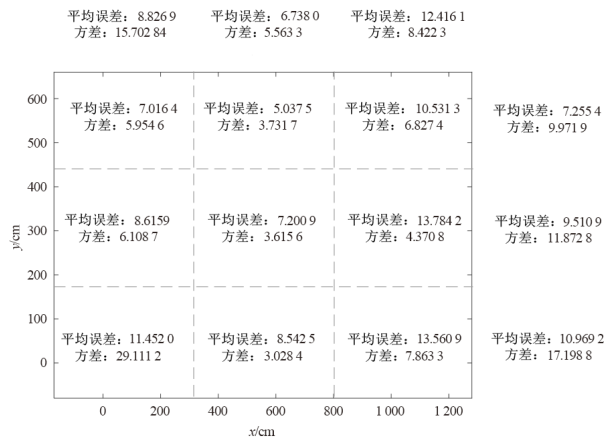
(b) 优化后基站阵型实际误差分布图



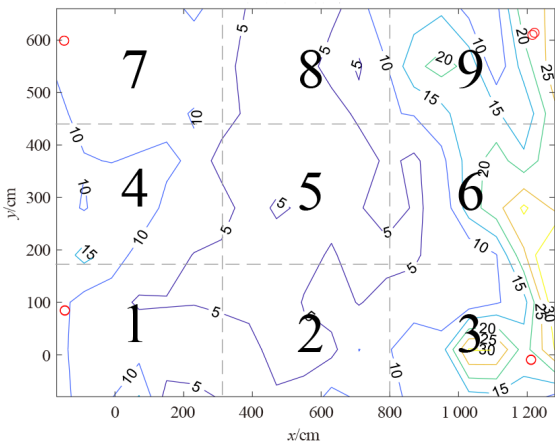
(c) 优化后基站阵型误差等势线图

图 9 优化前后基站阵型实际误差分布图

但仍稍大于 10 cm, 而方差明显减小, 结合图 10(c) 可知该区域的等势线密度明显比图 10(a) 稀疏, 定位效果较为平稳.



(d) 优化后基站阵型分区误差图



(a) 立方体 8 基站阵型误差等势线图

图 10 优化前后基站阵型分区误差图

以往使用立方体 8 基站布设阵型时, 垂直定位误差一直是困扰三维定位精度无法提高的一个大问题, 而且靠近边界时定位精度往往会急剧恶化, 导致定位失效, 而中间区域 3 及其周围的定位精度特别高, 因此平均误差就会比较乐观, 导致用户通过平均误差误认为

立方体8基站阵型的定位效果不错,而实际使用时只有中间区域3及其周围的定位效果比较理想,往往在靠近边界处无法正常使用.经过基站布设优化后,垂直定位精度得到明显改善.尽管需要牺牲一点水平定位精度,但三维定位精度得到了有效提高,同时误差的方差减小了 50.6496 cm^2 ,整个定位场景内的误差波动性明显减小.尽管中间区域3及其周围的定位精度稍逊于立方体8基站阵型,但整个场景的定位精度都趋于平稳,避免了在边界出现定位失效的情况.实验结果表明,本文提出的基站布设优化数学模型求得的优化后基站布设阵型提高了定位精度,同时降低了定位误差的波动性,满足了优化目标框架中的目标,充分体现了本文提出的基站布设优化数学模型的可靠性.

4 结论

在复杂的室内环境中,NLOS识别、多径干扰和基站布设的几何规划等影响室内定位精度的重要问题亟需解决.针对基站布设研究,本文提出使用PDOP、TDOA测量误差和CRB作为衡量基站布设性能的量化指标,并建立了基站布设优化的数学模型.然后分别使用遗传算法和萤火虫算法对该数学模型进行求解,并对两种优化算法的性能进行对比.萤火虫算法虽然收敛速度较慢,但能跳出局部最优,得到更优解,更适用于本文提出的数学模型求解.经过优化后的基站阵型与立方体8基站布设阵型在 $14.5\text{ m} \times 7.6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 展厅中进行实测对比,其定位精度提高了 0.7132 cm ,且方差减小了 50.6496 cm^2 ,具有较高的稳定性.本文为目前缺乏有效基站布设优化方法的超宽带室内定位领域,提供了一种具有工程可行性的基站布设优化方法.

参考文献

- [1] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2007, 37(6): 1067-1080.
- [2] BELLUSCI G, JANSSEN G J M, YAN J L, et al. Model of distance and bandwidth dependency of TOA-based UWB ranging error[C]//2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Piscataway: IEEE, 2008: 193-196.
- [3] ALAVI B, PAHLAVAN K. Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(4): 275-277.
- [4] CHANG C, SAHAI A. Estimation bounds for localization [C]//2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. IEEE SECON. Piscataway: IEEE, 2004: 415-424.
- [5] YANG B, SCHEUING J. Cramer-Rao bound and optimum sensor array for source localization from time differences of arrival[C]//Proceedings of (ICASSP'05 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Processing-Signal. Piscataway: IEEE, 2005: iv/961-iv/964.
- [6] CHANG C, SAHAI A. Cramér-Rao-type bounds for localization[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006, 2006: 094287.
- [7] SALMAN N, MAHESHWARI H K, KEMP A H, et al. Effects of anchor placement on mean-CRB for localization [C]//2011 The 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop. Piscataway: IEEE, 2011: 115-118.
- [8] SHARP I, YU K G, HEDLEY M. On the GDOP and accuracy for indoor positioning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2032-2051.
- [9] YARLAGADDA R, ALI I, AL-DHAHIR N, et al. GPS GDOP metric[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(5): 259.
- [10] 丛丽, Abidat Ahmed I, 谈展中. 卫星导航几何因子的分析和仿真[J]. *电子学报*, 2006, 34(12): 2204-2208.
CONG L, ABIDAT A I, TAN Z Z. Analysis and simulation of the GDOP of satellite navigation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2204-2208. (in Chinese)
- [11] BHARADWAJ R, ALOMAINY A, PARINI C. Study of Ultra wideband localisation techniques using various monitoring configurations[C]//2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE, 2012: 2035-2038.
- [12] BHARADWAJ R, YANG K, ALOMAINY A, et al. Effect of Base Station configurations and complexity on the accuracy of ultra wideband localisation[C]//2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Piscataway: IEEE, 2014: 19-20.
- [13] BHARADWAJ R, PARINI C, ALOMAINY A. Ultra-wideband-based 3-D localization using compact base-station configurations[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 221-224.
- [14] REN A F, ZHOU F, RAHMAN A, et al. A study of indoor positioning based on UWB base-station configurations[C]//2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway: IEEE, 2017: 1939-1943.
- [15] 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 X Y. A Study of Indoor Positioning Based on

UWB Base-Station Configurations[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)

- [16] 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 C Y, WANG J. Study of base station layout of ultra wideband emergency positioning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(8): 174-181. (in Chinese)
- [17] 钟佳威. 面向UWB室内定位的基站布设方法研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
ZHONG J W. Research on Base Station Deployment Method for UWB Indoor Location[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018. (in Chinese)
- [18] ZHANG R G, SHEN F, LIANG Y, et al. Using UWB aided GNSS/INS integrated navigation to bridge GNSS outages based on optimal anchor distribution strategy[C]// 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE, 2020: 1405-1411.
- [19] WANG M, CHEN Z, ZHOU Z, et al. Analysis of the applicability of dilution of precision in the base station configuration optimization of ultrawideband indoor TDOA positioning system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 225076-225087.
- [20] GEZICI S, TIAN Z, GIANNAKIS G B, et al. Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.



周 隰(通讯作者) 男,1983年生,湖北松滋人. 2007年获华中科技大学信息与通信工程专业博士学位. 现为桂林电子科技大学副教授,高级工程师,硕士生导师. 主要研究方向为无人机群智协同通信与感知网络、低轨卫星通信网络、认知无线电、位置感知与建图、物联网与大数据技术应用等. 中国电子学会会员编号:E190060518M.

E-mail: zhouzou@guet.edu.cn



杨 帆 男,1995年生,河北保定人. 现为桂林电子科技大学硕士研究生. 主要研究方向为超宽带室内定位的基站选择.

E-mail: yangfan2021@163.com



张国立 男,1996年生,安徽阜阳人. 现为桂林电子科技大学硕士研究生. 主要研究方向为嵌入式系统设计、室内定位与建图.

E-mail: zglguoli@gmail.com



仇洪冰 男,1963年生,江苏如皋人. 现为桂林电子科技大学信息与通信学院教授、博士生导师. 主要研究方向为宽带无线通信、通信信号处理、辐射源定位等. 中国电子学会会员编号: E190013474M.

E-mail: qiuhb@guet.edu.cn

作者简介



陈 兆 男,1996年生,广东潮州人. 现为华南理工大学电子与信息学院博士研究生. 主要研究方向为多传感器融合、超宽带室内定位.

E-mail: chenzhao4561@outlook.com



王 玫 女,1963年生,山西太原人. 现为桂林电子科技大学信息与通信学院教授、博士生导师. 主要研究方向为位置感知和协同定位、传感器网络、能效优化等.

E-mail: mwang@guet.edu.cn