

引用格式: 王腾辉, 武建锋, 焦喜康, 等. 基于最小 HDOP 选站下的到达时间差定位算法[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 183-196.

基于最小 HDOP 选站下的到达时间差定位算法

王腾辉^{1,2}, 武建锋¹, 焦喜康^{1,2}, 朱靖川^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101048)

摘要: 传统蜂窝网络系统虽支持基于到达时间差 (TDOA) 的定位方法, 但是精度较差。第五代移动通信 (5G) 可在室内定位分配系统中提供准确的多个 TDOA 测量值, 可显著提高室内定位能力。随着 5G 微基站的大规模普及, 目标终端从基站一侧可选择的测量值也越多, 按照传统方法直接进行解算, 测速运算量大且无法剔除误差较大的观测值。本文提出一种定位基站最优组合方法, 使用广度优先搜索 (BFS) 筛选出水平精度因子 (HDOP) 最小的定位基站组合, 并考虑每个 TDOA 测量误差具有不同的方差, 采用加权最小二乘算法估计在基站最优组合条件下目标终端的位置。通过仿真分析和试验验证, 基于最小 HDOP 选站下的到达时间差定位算法在保证定位准确度的前提下, 单次定位解算速度提高了 51.14%, 显著提升了定位响应速度。

关键词: 到达时间差; 第五代移动通信; 水平精度因子; 广度优先搜索; 最小二乘

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-03-0183-14

Positioning algorithm based on the time difference of arrival with the minimum HDOP of station selection

WANG Teng-hui^{1,2}, WU Jian-feng¹, JIAO Xi-kang^{1,2}, ZHU Jing-chuan^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The traditional cellular network system supports the positioning method based on the time difference of arrival (TDOA), but the precision is poor. The 5th-generation mobile communication (5G) can provide accurate multiple TDOA measurement values in the indoor positioning distribution system, which can improve the indoor positioning capability significantly. With the large-scale popularization of 5G micro base stations, the target terminal can select more measurement values from the base stations, then the calculation of speed measurement is much larger and the observation values with big errors cannot be eliminated while used the traditional method for the calculation directly. This study proposes a method of optimal combination for positioning base stations, which used the breadth-first search (BFS) to filter out the minimum HDOP (horizontal

dilution of precision) of the positioning base station combination, and it also considered the different variance of each TDOA measurement, then used the weighted least squares to estimate the location of the target terminal. The simulation analysis and experimental verification shown that the positioning algorithm based on the time difference of arrival with the minimum HDOP of station selection ensures the positioning accuracy, and it also increased the speed of single positioning solution by 51.14%, which significantly improves the speed of positioning response.

Key words: time difference of arrival; 5G system; horizontal dilution of precision(HDOP); breadth first search; least squares estimation

0 引言

室内定位对于基于位置的服务, 物联网和电力服务等非常重要^[1]。目前市场流行的几种定位技术包括蓝牙信标技术、超宽带无线技术以及基于蜂窝网络定位技术。其中, 蓝牙信标技术是目前主流的一种室内定位方案, 该技术最大的优点是设备体积小, 容易集成于手机等移动设备中, 但对于复杂的空间环境, 蓝牙系统容易受到噪声信号干扰, 且蓝牙器件和设备价格比较昂贵^[2-3]。超宽带(UWB)无线技术是近年来提出的室内无线定位技术, 具有定位精度高、穿透力强等优点, 然而布局该系统成本太高^[4-5]。5G 定位技术的出现能够满足高精度定位对无线网络的需求^[6], 5G 的毫米波通信具有高频、高带宽的特点, 有利于提高多径分辨率, 不易受噪声信号干扰^[7], 并且 5G 具有成熟的室内分配方案包括 5G 分布式天线系统(DAS)与 5G 数字室分, 通过利用旧的 DAS 完成室内 5G 覆盖, 可以有效地降低布局成本^[8]。

LTE 移动通信系统提供的到达时间差估计技术使用定位参考信号(PRS)进行测距, PRS 部分响应信号的带宽只有 1.4 ~ 20 MHz, 带宽的有限无法保证定位的精度^[9-13]。而在 5G 系统下, PRS 信号的带宽可以提高到 100 MHz^[14], 因此 5G 系统可以在较大的带宽以及连续的上下行信号上提供高精度的 TDOA (time difference of arrival) 测量值。微基站的大规模普及使得从基站一侧可以提供的测量数据十分充裕, 在这种情况下, 对目标的定位问题由原来的非线性方程精确求解问题转换成了非线性最优化估计问题^[15]。目前有很多定位算法用于 TDOA 测量方程的解, 这些算法可以分为迭代算法和闭式求解算法, Taylor 级数展开法是一种常用的迭代算法, 当给定初始位置不准确时, 迭代算法不能保证收敛, 即出现较大误差^[16], 闭式求解算法可以避免收敛问题, 最常用的闭式算法为两步加权最小二乘(WLS)算法^[17], 该算法在 TDOA 误差足够小时, 可达到克拉美罗下界。当存在大量 TDOA 测量值时, 按照传统方法直接解算运算量大且有误差较大观测值的干扰^[18-22]。本文在使用两步加权最小二乘解算前, 对误差较大的 TDOA 观测值进行剔除, 从而提高定位精度与响应速度。

水平精度因子(HDOP)通常用于分析水平定位精确度, 对于固定的基站数量, 通过改变网元布局可以分析不同布局下对定位精度的影响^[23]。HDOP 值越大则定位精度越差, 反之定位精度越好。卫星定位中有以仰角分区为准则进行选星^[24-25], 而在室内基站布局中, 基站间高度差较小, 因此本文提出一种使用广度优先搜索算法选择最优基站组合, 广度优先搜索时间复杂度为 $O(n)$ ^[26], 具有效率高、准确的特点。

1 基于到达时间差的定位方法

1.1 TDOA 定位原理

TDOA 定位方法也可称为双曲线定位法, 该方法通过求双曲线交点来求定位坐标, 单个 TDOA 的测量值获取通过两个 TOA 值相减得到, TDOA 方法的提出能够解决 TOA 中需要发送端和接收端时钟精确

同步的要求^[27]。二维平面需要 3 个及以上的基站, 获得两条或以上的双曲线, 求解双曲线交点得到用户设备位置的估计。假设二维空间上任意分布着 N 个基站, 用户设备的估计位置为 (x, y) , 网元 NE_i 的位置为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, 3, \dots$, 可以得到:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \quad (1)$$

式(1)中, R_i 表示用户设备 UE 到达第 i 个 NE_i 的距离。以网元 NE_1 作为参考点, 可以得到:

$$R_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}, \quad (2)$$

式(2)中, R_1 表示用户设备 UE 到达参考点 NE_1 的距离。则时差 ΔR_{i1} 表示为

$$\Delta R_{i1} = R_i - R_1 = c\Delta t_{i1} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (3)$$

式(3)中, c 表示电磁波传播速度, $\Delta t_{i1} \in [1, n]$ 为时间差。

1.2 基于 TDOA 的定位解算算法

由于二维定位至少需要 3 个基站, 所以 TDOA 的解算算法只能基于基站个数至少是 3 个才可以进行定位, 实际工程中应用最广的为最小二乘。最小二乘算法大致可以分为两类, 即具有解析表达式的算法和递归算法。二维情况下, Chan 氏算法分为三基站定位和三基站以上定位两种情况, 两步加权最小二乘近似一个最大似然估计器。

1.2.1 基站个数为 3 的情况

对式(3)化简, 令 $X_{i,1} = x_1 - x_i$, $Y_{i,1} = y_1 - y_i$ 可得到:

$$R_i^2 - R_1^2 = 2[X_{i,1}, Y_{i,1}] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + K_i - K_1, \quad (4)$$

式(4)中: $K_i = x_i^2 + y_i^2$ 。

当基站数目 $N=3$ 时, 可得到 2 个 TDOA 测量值, 则 UE 的位置为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 - K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 - K_1 \end{bmatrix} \right\}. \quad (5)$$

1.2.2 基站个数大于 3 的情况

当基站数目 $N \geq 4$ 时, TDOA 测量值的数目大于未知参数的数目, 采用加权最小二乘法处理冗余数据。此时先将初始非线性 TDOA 方程组转换为线性方程组, 然后采用加权最小二乘法得到初始解, 再利用约束条件对初始值进行第二次加权最小二乘法估计, 从而得到改进的估计坐标。

① 第一次加权最小二乘估计

TDOA 噪声的线性方程为

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a, \quad (6)$$

式(6)中: $\mathbf{Z}_a = [\mathbf{Z}_p, \mathbf{R}_1]$ 为未知矢量, 其中 $\mathbf{Z}_p = [x, y]^T$, $\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 - K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 - K_1 \\ \vdots \\ R_{N,1}^2 - K_N - K_1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{G}_a = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & R_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & R_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & y_{N,1} & R_{N,1} \end{bmatrix}$,

\mathbf{Z}_a^0 为 UE 的实际位置所对应的 \mathbf{Z}_a 值。

求解线性方程时, 假定 \mathbf{Z}_a 的各元素间相互独立, \mathbf{Z}_a 的加权最小二乘估计的结果为

$$\mathbf{Z}_a = \arg \min \{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a)^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a) \} = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{h}, \quad (7)$$

式(7)中: $\boldsymbol{\Psi}$ 为误差矢量的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Psi} = E[\boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\Psi}^T] = c^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B}$, 其中 \mathbf{Q} 为 TDOA 测量值的协方差矩阵 $\mathbf{Q} = \text{diag}\{\sigma_{2,1}^0, \sigma_{3,1}^0, \dots, \sigma_{N,1}^0\}$, 在实际求解时, 该协方差矩阵中, 除去对角线位置, 其他位置均为高斯噪声的均值, 主对角线上每个位置为高斯噪声的标准差。 $\mathbf{B} = \text{diag}\{R_2^0, R_3^0, \dots, R_N^0\}$, 第一次加权最小二乘估计的 UE 位置对应的 UE 的 \mathbf{Z}_a 值为 $\mathbf{Z}_a \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h}$ 。

② 第二次加权最小二乘估计

第一次最小二乘估计的计算, 是在假定 \mathbf{Z}_a 的各元素是独立的情况下进行的, 实际下 \mathbf{Z}_a 中的 \mathbf{R} 是与 (x, y) 有关的量, 用 \mathbf{Q} 矩阵近似代替误差矢量的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 会带来一定的误差。为了得到更精确的定位结果, 继续进行第二次估计。

首先计算估计位置 \mathbf{Z}_a 的协方差矩阵, 在有噪声的情况下:

$$\text{cov}(\mathbf{Z}_a) = E(\Delta \mathbf{Z}_a \Delta \mathbf{Z}_a^T) = (\mathbf{G}_a^{0T} \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1}, \quad (8)$$

式(8)中: $\Delta \mathbf{Z}_a \approx (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{B}$ 。

矢量 \mathbf{Z}_a 是均值为第一次估计结果, 协方差为

$$\mathbf{Z}_a = \arg \min \{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a)^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{Z}_a) \} = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{h}. \quad (9)$$

确定的随机变量, \mathbf{Z}_a 的元素可以表示为: $Z_{a,1} = x^0 + e_1$, $Z_{a,2} = y^0 + e_2$, $Z_{a,3} = R_1 + e_3$, 其中, e_1 , e_2 , e_3 为 \mathbf{Z}_a 的估计误差。

建立线性方程组:

$$\boldsymbol{\Psi}' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}_a' \mathbf{Z}_a', \quad (10)$$

式(10)中: $\mathbf{h}' = [(Z_{a,1} - x_1)^2 (Z_{a,2} - y_1)^2 Z_{a,3}^2]^T$, $\mathbf{G}_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Z}_a' = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix}$ 。

与前面的分析推导相似, 可得到含有 UE 位置的未知量 \mathbf{Z}_a' 的解为

$$\mathbf{Z}_a' = (\mathbf{G}_a'^T \boldsymbol{\Psi}'^{-1} \mathbf{G}_a')^{-1} \mathbf{G}_a'^T \boldsymbol{\Psi}'^{-1} \mathbf{h}', \quad (11)$$

式(11)中: $\boldsymbol{\Psi}'$ 为估计误差的协方差矩阵, $\boldsymbol{\Psi}' = E[\boldsymbol{\Psi}' \boldsymbol{\Psi}'^{-1}] = 4 \mathbf{B}' \text{cov}(\mathbf{Z}_a) \mathbf{B}'$, $\boldsymbol{\Psi}' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}_a' \mathbf{Z}_a'^0$, $\mathbf{B}' = \text{diag}\{x^0 - x_1, y^0 - y_1, R_1^0\}$, 最终可得到 UE 的位置表达式:

$$\mathbf{Z}_p = \pm \sqrt{\mathbf{Z}_a'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

再根据第一次加权最小二乘估计得到的 \mathbf{Z}_a 值的符号, 为结果确定符号消除模糊性。

1.3 水平精度分析

水平精度因子 HDOP 是定位误差与测距误差的比率, 定位系统的 HDOP 值较小, 意味着定位准确。为比较各个基站组合的 HDOP 大小, 假设目标终端位置坐标 (x_u, y_u) , 将式(6)使用泰勒级数在 x_u 、 y_u 处并保留一次项误差 \hat{x}_u 、 \hat{y}_u 得:

$$f(x_u, y_u) = f(\hat{x}_u + \Delta x_u, \hat{y}_u + \Delta y_u) = f(\hat{x}_u, \hat{y}_u) + \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u)}{\partial x_u} \Delta x_u + \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u)}{\partial y_u} \Delta y_u = f(\hat{x}_u, \hat{y}_u) - \frac{x_i - \hat{x}_u}{\hat{r}_i} \Delta x_u - \frac{y_i - \hat{y}_u}{\hat{r}_i} \Delta y_u - \frac{x_1 - \hat{x}_u}{\hat{r}_1} \Delta x_u - \frac{y_1 - \hat{y}_u}{\hat{r}_1} \Delta y_u \quad (13)$$

令方向余弦

$$a_{xj} = \frac{x_i - \hat{x}_u}{\hat{r}_i} - \frac{x_1 - \hat{x}_u}{\hat{r}_1}, \quad a_{yj} = \frac{y_i - \hat{y}_u}{\hat{r}_i} - \frac{y_1 - \hat{y}_u}{\hat{r}_1}, \quad (14)$$

令 $e_i = \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u)}{\partial x_u} \Delta x_u + \frac{\partial f(\hat{x}_u, \hat{y}_u)}{\partial y_u} \Delta y_u$ 表示第 i 个基站与参考点基站间 TDOA 测距误差。式 (13) 中,

$\hat{r}_i = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2} - \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2}$ 。则式 (13) 转换为

$$f(x_u, y_u) = f(\hat{x}_u, \hat{y}_u) - a_{xj} \Delta x_u - a_{yj} \Delta y_u \quad (15)$$

式 (13) 表示为矩阵形式为

$$\Delta \mathbf{R} = \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{x}, \quad (16)$$

式 (16) 中: $\Delta \mathbf{R} = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$, $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x_u, \Delta y_u)^T$, $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} \\ a_{x2} & a_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{xn} & a_{yn} \end{pmatrix}$ 。

考虑每个基站的 TDOA 测量误差不同, 因此不同于普通最小二乘, 使用加权最小二乘解算, 解算式为

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{b}, \quad (17)$$

为求加权矩阵 \mathbf{W} , 求得误差向量的协方差矩阵 \mathbf{C}_{TDOA} 为

$$\mathbf{C}_{\text{TDOA}} = E \left\{ \begin{matrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & \dots & e_n \end{bmatrix} \end{matrix} \right\} = \sigma_{\text{TDOA}}^2 \begin{bmatrix} k^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

则加权矩阵 \mathbf{W} 为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k^2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

将 $\mathbf{A}^T \mathbf{W}$ 矩阵展开有

$$\begin{bmatrix} a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & \cdots & a_{xn} \\ a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & \cdots & a_{yn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k^2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{x1}}{k^2} & a_{x2} & a_{x3} & \cdots & a_{xn} \\ \frac{a_{y1}}{k^2} & a_{y2} & a_{y3} & \cdots & a_{yn} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

$$\text{令 } \mathbf{A}^T \mathbf{W} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & \cdots & b_n \\ c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{x1}}{k^2} & a_{x2} & a_{x3} & \cdots & a_{xn} \\ \frac{a_{y1}}{k^2} & a_{y2} & a_{y3} & \cdots & a_{yn} \end{bmatrix}, \text{ 因此由式 (17) 可得}$$

$$\Delta x_u = [(\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1}]_{1,2} \sum_{i=2}^n s_i e_i, \quad (21)$$

式 (21) 中: $s_i = [(\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1}]_{1,1} b_i + [(\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1}]_{1,2} c_i$, 因此 Δx_u 的方差表示为

$$\sigma_x^2 = \sigma_{\text{TDOA}}^2 \sum_{i=2}^n s_i^2. \quad (22)$$

同理可得 Δy_u 的方差表示为

$$\sigma_y^2 = \sigma_{\text{TDOA}}^2 \sum_{i=2}^n g_i^2, \quad (23)$$

式 (23) 中: $g_i = [(\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1}]_{2,1} b_i + [(\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1}]_{2,2} c_i$.

HDOP 是描述水平坐标精度的误差程度, 考虑实际工程中每个 TDOA 测量误差不同, 故使用加权最小二乘得出此方法下的 HDOP 表达式:

$$\text{HDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}. \quad (24)$$

1.4 基于广度优先搜索的选站方法

微基站的大规模普及使得终端接收机附近存在多个基站, 接收机一侧接收到的测量数据就变得十分充裕, 在这种情况下, 通过选取对定位结果最优的基站组合, 不仅能剔除误差较大的观测值, 也能提高解算速度。

广度优先搜索 (BFS) 作为搜索算法的一种, 被广泛应用在图论算法模型中, 图论中的 Dijkstra 算法和 Prim 最小生成树算法都是由广度优先搜索演变而来^[28], 广度优先搜索算法的核心思想是从当前的节点向外扩展, 用数据结构中的栈维护可以采用的节点, 直到所有节点都被访问, 栈组中存在的节点即是最后需要的节点。

广度优先搜索通过栈维护对定位结果最优的基站组合, 首先选取距离终端最近的基站作为起始节点 l_1 , 之后遍历下个节点, 当满足定位最小基站组合数 3 时, 计算队列中组合的 HDOP 值, HDOP 可以作为选择所需基站组合的指标, HDOP 值越小, 则定位精度越好, 当前 HDOP 值小于 HDOP_{\min} 时该节点入栈, 不符合则该节点出栈, 当所有节点数 n_L 遍历完, 队列存在的组合即为最优组合。选取的速度问题, 间接关系到定位响应速度, 深度优先搜索需要把每个节点遍历两次, 因此速度较慢。而广度优先搜索每

个点只遍历一次，且用一个栈组维护，效率较快。图 1 为算法实现流程图。

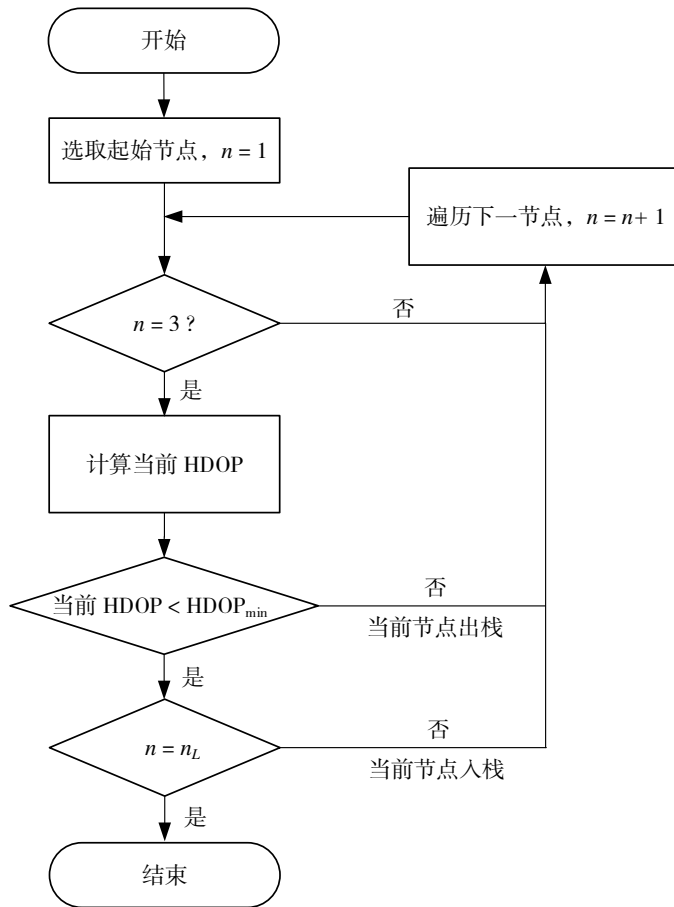


图 1 BFS 算法选站流程图

2 仿真结果与分析

为分析基于最小 HDOP 准则下的选站组合对定位精度影响，根据中国科学院国家授时中心试验厂区的真实场景，建立一个模拟场景，真实的场景如图 2 所示，开发的模拟场景俯视图如图 3 所示。真实场景试验区为 $50 \times 30 \text{ m}$ 的长方形区域，建立笛卡尔坐标系。



图 2 地下试验场真实场景

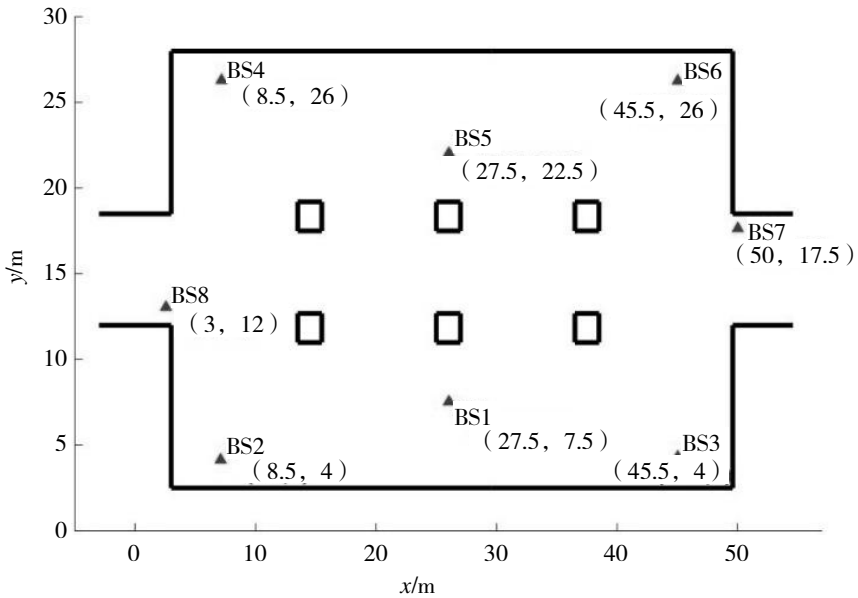


图 3 模拟场景俯视图

在图 3 中笛卡尔坐标系以米为单位, 根据试验场真实环境, 选取两个具有代表性的测试点, 分别位于场景右半边 A 点和左半边 B 点, 如图 4 所示。

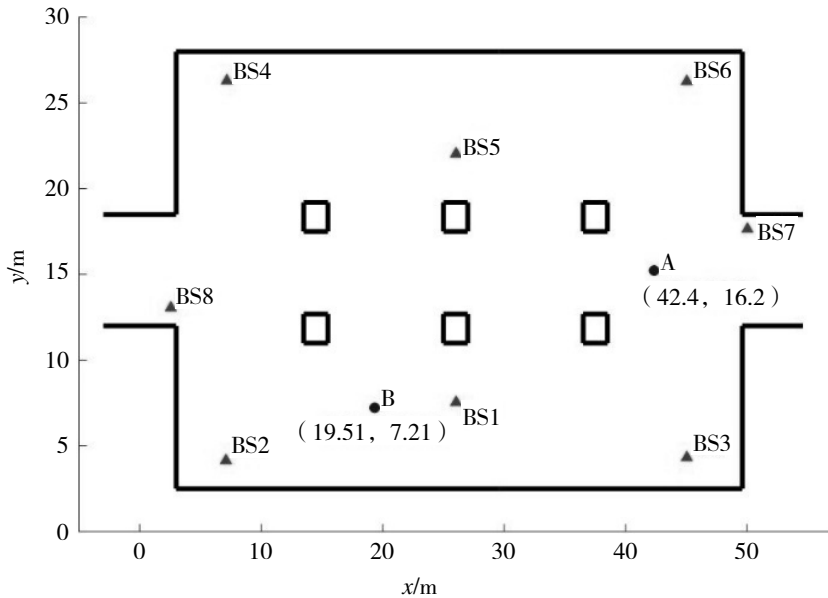


图 4 A、B 点俯视图

图 4 中圆点为测试坐标点, 小三角为基站坐标点, 其中, 距离 A 点最近的 3 个基站为 BS3, BS6, BS7, 距离 B 点最近的 3 个基站为 BS1, BS2, BS8。

使用广度优先搜索算法对 A 点筛选最优定位基站组合, 首先选取距离终端 A 点最近的基站 BS7, 再依次遍历。按照图 1 的算法流程, 选出的 A 点最小 HDOP 的基站组合 BS1, BS3, BS5, BS6, BS7。为了验证算法的准确性, 对 A 点的几组基站组合单独进行 HDOP 计算, 由表 1 可以看出, 提出的广度优先遍历算法选出的基站组合 HDOP 值最小, 值为 1.54, 距离 A 点最近的 3 个基站 BS3, BS6, BS7 的 HDOP 为 2.24, 全站参与下的 A 点 HDOP 值为 1.61。

表 1 A 测试点的基站组合及 HDOP 值

测试点	基站组合	对应 HDOP 值
A	BS1, BS3, BS5, BS6, BS7	1.54
A	BS1, BS5, BS7	1.89
A	BS3, BS6, BS7	2.24
A	BS1, BS2, BS3, BS6, BS7	2.01
A	BS3, BS4, BS5, BS6	1.98
A	全站	1.61

同理，对 B 点筛选最优定位基站组合，首先选取距离 B 点最近的基站 BS1，按照图 1 的算法流程，选出的 B 点最小 HDOP 的基站组合 BS1, BS2, BS8。选取的最优基站组合是距离 B 点最近的 3 个基站，为验证算法准确性，在 BS1, BS2, BS8 基础上增加 B 点周边基站，计算各组合 HDOP。由表 2 可以看出最优基站组合 HDOP 值为 1.87，且为距离 B 点最近的 3 个基站，在此基础上增加基站数量，都会增大 HDOP 的值。

表 2 B 测试点的基站组合及 HDOP 值

测试点	基站组合	对应 HDOP 值
B	BS1, BS2, BS4, BS5, BS8	2.14
B	BS1, BS2, BS5, BS8	2.01
B	BS1, BS2, BS8	1.87
B	BS1, BS2, BS3, BS8	1.92
B	BS1, BS2, BS3, BS4, BS8	2.03
B	全站	1.93

通过上述分析，A, B 两点按照图 1 算法流程选出的定位基站具有最小的 HDOP 值，由于算法特殊性，所选基站组合一定包含距离最近的 3 个点，其中 B 点的最优基站组合为距离 B 点最近的 3 个基站，而距离 A 点最近的 3 个基站的 HDOP 值却较大，于是在 A 点单独筛选几组不完全包括最近 3 个基站的组合，发现此组合下的 HDOP 均比本文算法所选基站的 HDOP 大，可得出距离终端最近的 3 个基站在结果比例中占权重较大。整个算法流程的时间复杂度为 $O(n)$ ，具有效率快且准确的特点。

为验证本文所提出的最优组合方案定位精度，在中国科学院国家授时中心地下试验厂区按照上述模拟方案布局，本次 5G 终端接收机、5G 基站与解算软件如图 5 所示。在试验过程中，基于 5G 带内定位方法，使用带宽为 100 MHz 的定位参考信号 PRS 进行测距。为比较最优定位组合与全站的定位精度，根据 5G 系统可以提供标准偏差 $\sigma_{\text{TDOA}} = 0.03 \text{ m}$ 的 TDOA 测距精度^[29]。首先对 A 点进行测试，最优基站布局对应 BS1, BS3, BS5, BS6, BS 7 坐标位置，5G 终端对应 A 点坐标位置，对最优基站组合下终端解算观测次数为 500 次。

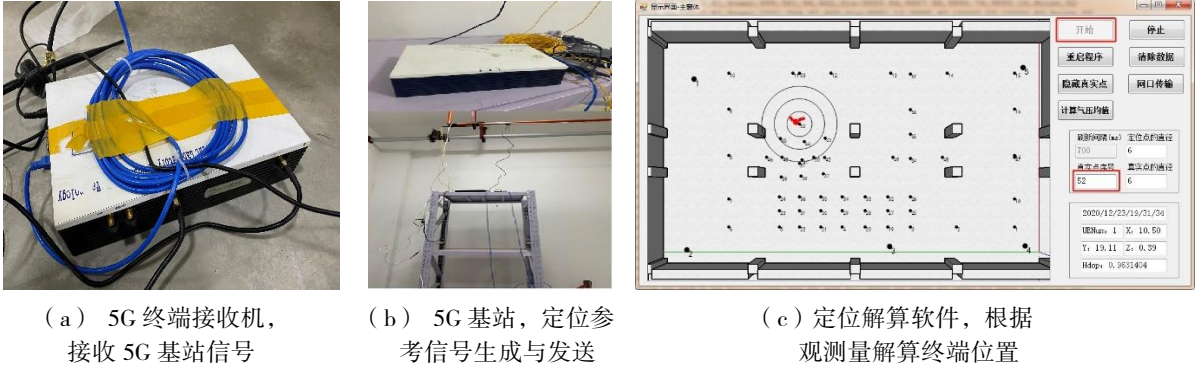


图 5 本次测试的主要设备

表 3 和表 4 为 A 测试点下的最优基站组合与全站的测试结果, 其中, 在 499 次的有效测试点中, 最优组合的最大单次解算耗时为 0.354 s, 平均单次解算耗时为 0.178 s。在 498 次的有效测试点中, 全站参与下的最大解算耗时为 0.423 s, 平均单次解算耗时为 0.312 s, 可以看出本文所提算法在效率上提高了 42.94%。

表 3 A 点最优组合基站的测试结果

测试点	测试指标	测试数值
A	基准坐标	(42.400, 16.288)
A	平均坐标	(42.559, 16.363)
A	平均偏差	(0.159, 0.075)
A	RMSE	(0.119, 0.177)
A	有效测试点数	499
A	最大单次解算耗时	0.354 s
A	平均单次解算耗时	0.178 s

表 4 A 点全站的测试结果

测试点	测试指标	测试数值
A	基准坐标	(42.400, 16.288)
A	平均坐标	(42.236, 16.369)
A	平均偏差	(-0.164, 0.081)
A	RMSE	(0.131, 0.182)
A	有效测试点数	498
A	最大单次解算耗时	0.423 s
A	平均单次解算耗时	0.312 s

图 6 为 A 点在最优基站组合与全站组合下单方向误差比较,可以看出,最优基站组合 x 方向和 y 方向上的均方根误差均小于全站参与,最优组合下的 x 方向平均偏差为 0.159 m, y 方向平均偏差为 0.075 m, 全站组合下的 x 方向平均偏差为 -0.164 m, y 方向平均偏差 0.081 m。

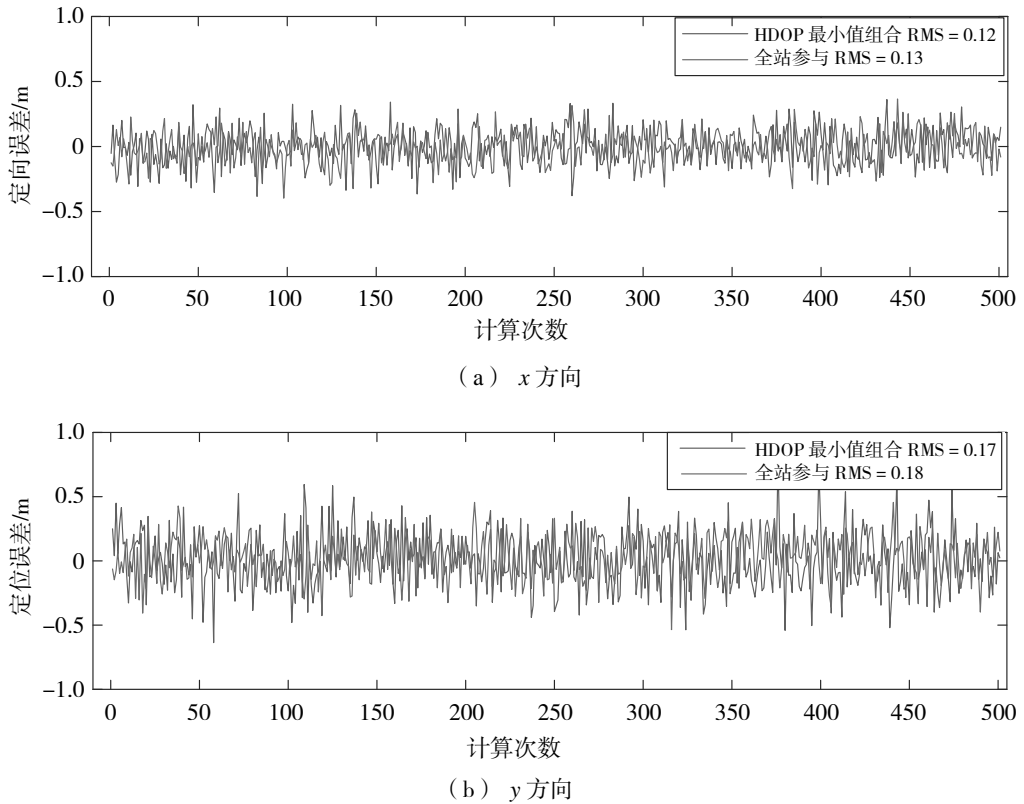


图 6 A 点两种组合在 x 方向、 y 方向的误差比较

对 B 点进行测试,最优基站布局对应 BS1, BS2, BS8 坐标位置,5G 终端对应 B 点坐标位置,对最优基站组合下终端解算观测次数为 500 次。

表 5 和表 6 为 B 测试点下的最优基站组合与全站的测试结果,其中,在 495 次的有效测试点中,最优组合的最大单次解算耗时为 0.234 s,平均单次解算耗时为 0.128 s。在 494 次有效测试点中,全站参与下的最大解算耗时为 0.354 s,平均单次解算耗时为 0.262 s,可以看出本文所提算法在效率上提高了 51.14%。

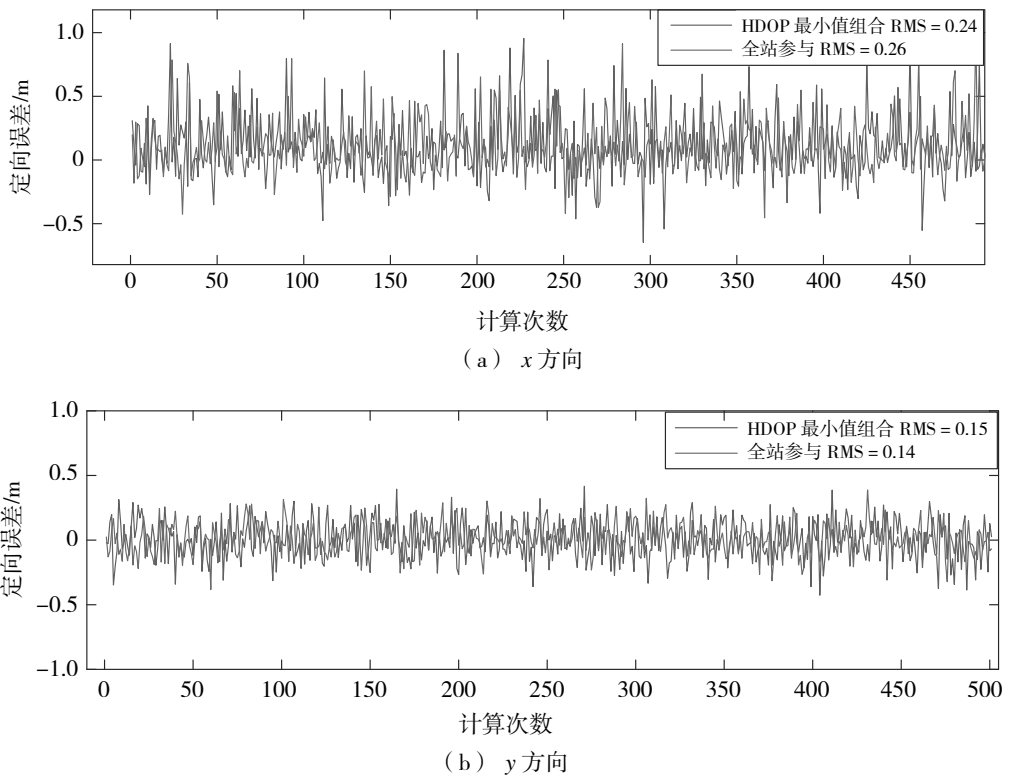
表 5 B 点最优组合下的测试结果

测试点	测试指标	测试数值
B	基准坐标	(19.511, 7.212)
B	平均坐标	(19.859, 7.143)
B	平均偏差	(0.348, -0.069)
B	RMSE	(0.242, 0.147)
B	有效测试点数	495
B	最大单次解算耗时	0.234 s
B	平均单次解算耗时	0.128 s

表 6 B 点全站组合下的测试结果

测试点	测试指标	测试数值
B	基准坐标	(19.511, 7.212)
B	平均坐标	(19.161, 7.277)
B	平均偏差	(-0.350, 0.065)
B	RMSE	(0.261, 0.144)
B	有效测试点数	494
B	最大单次解算耗时	0.354 s
B	平均单次解算耗时	0.262 s

图 7 为 B 点在全站组合与最优基站组合下单方向误差比较,可以看出,最优基站组合 x 方向和 y 方向上的均方根误差均小于全站参与,最优组合下的 x 方向平均偏差为 0.348 m, y 方向平均偏差为 -0.069 m, 全站组合下的 x 方向平均偏差为 -0.350 m, y 方向平均偏差为 0.065 m。

图 7 B 点两种组合在 x 方向、 y 方向的误差比较

3 结语

本文通过使用广度优先遍历搜索筛选出 HDOP 最小的定位基站组合,在 5G 系统大量 TDOA 观测量的前提下,剔除了误差较大的观测量,能够在保证定位精度的前提下提高定位响应速度。特别地,当最优定位基站组合为距离目标终端最近的 3 个基站,单次解算速度提升最快,相比全站参与解算速度提升了 51.14%,说明本算法具有较强的实时性。本文通过最优定位基站组合与全基站定位误差比较,可以

得出最优基站组合的 HDOP 值与全站 HDOP 值相差越大, 定位精度提升越好。

参考文献:

- [1] XIE T, JIANG H J, ZHAO X J, et al. A Wi-Fi-based wireless indoor position sensing system with multipath interference mitigation[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 1-20.
- [2] KEONSOO L, NAM Y Y, MIN S D. An indoor localization solution using bluetooth RSSI and multiple sensors on a smartphone[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(10): 12635-12654.
- [3] LIE M M K, KUSUMA G P. A fingerprint-based coarse-to-fine algorithm for indoor positioning system using bluetooth low energy[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 33(1): 1-17.
- [4] 孙顶明. 基于 CHAN-Taylor 的室内复杂环境 UWB 定位算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [5] BAKKALI M E, TOUHAMI N A, ELHAMADI T E, et al. High gain 0.18 μm -GaAs MMIC cascode-distributed low-noise amplifier for UWB application[J]. *Microelectronics Journal*, 2020, 108(1): 104970.
- [6] Networks-wireless communications and networks; Researchers from tampere university of technology describe findings in wireless communications and networks (joint device positioning and clock synchronization in 5G ultra-dense networks)[J]. *Computers, Networks & Communications*, 2017.
- [7] 3GPP. 3GPP TS 22.261 v16.7.0, Service Requirements for the 5G system; Stage 1[EB/OL]. (2017-03-13)[2021-03-18]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107>
- [8] 刘翔翔, 张昌瀚. 基于地理信息系统的通信基站优化选址与布局[J]. *科技和产业*, 2020, 20(9): 191-197+224.
- [9] 苏煜琴, 付小宁, 张娜. TDOA localization algorithm based on lagrange constraint factor to modify the initial value of iteration[J]. *应用数学进展*, 2020, 9(3): 372-381.
- [10] GADKA P, SADOWSKI J, STEFANSKI J, et al. Detection of the first component of the received LTE signal in the OTDoA method[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019: 1-12.
- [11] LEE K, LEE D H, HWANG W J, et al. A new D2D-Aided OTDOA positioning method for 3GPP LTE system[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2017, E100, B(3): 473-483.
- [12] 王宝全. 基于 TDOA 参数估计的 LTE 定位技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [13] 李典锋. LTE 及其演进系统中定位技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [14] 3GPP. 3GPP TR 22.872 v16.1.0, Study on Positioning Use Cases; Stage 1[EB/OL]. (2017-03-13)[2021-03-18]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3280>.
- [15] MISHRA P, KUMAR V, RANA K P S. An efficient method for parameter estimation of a nonlinear system using backtracking search algorithm[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, 21(3): 338-350.
- [16] DINIYA J, SHONEY S. Taylor series method in TDOA approach for indoor positioning system[J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, 9(5): 3927-3933.
- [17] KOHLER M, KRZYŻAK A. Pricing of American options in discrete time using least squares estimates with complexity penalties[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2012, 142(8): 2289-2307.
- [18] 蒋康荣. 蜂窝网络中基于 TDOA 的定位算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [19] ZHANG H W, ZHENG Z, WANG W Q, et al. Source localization using TDOA and FDOA measurements under unknown noise power knowledge[J]. *IET Signal Processing*, 2020, 14(7): 435-439.
- [20] QU X M, XIE L H. An efficient convex constrained weighted least squares source localization algorithm based on TDOA measurements[J]. *Signal Processing*, 2016, 119(2): 142-152.
- [21] TOVKACH I O, ZHUK S Y. Adaptive filtration of parameters of the UAV movement based on the TDOA-measurement sensor networks[J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2019, 11(11): 1-10.

- [22] 赵拥军, 赵勇胜, 赵闯. 基于正则化约束总体最小二乘的单站 DOA-TDOA 无源定位算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2336-2343.
- [23] 窦雪倩, 李华, 许博. 基于几何稀释度的多站外源时差定位最优布站方法[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(5): 37-40+72.
- [24] 邱明, 严勇杰, 孙蕊, 等. 基于帝国竞争优化的双目标综合决策选星算法[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-12[2021-03-17]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0235>.
- [25] 王永梅. GNSS 导航系统快速选星算法研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(3): 65-69.
- [26] BANERJEE N, SANKARDEEP C, RAMAN V, et al. Space efficient linear time algorithms for BFS, DFS and applications[J]. Theory of Computing Systems, 2018, 62(8): 1736-1762.
- [27] GYO X S, ZHANG Y, ZENG B T. Passive localization using time difference of arrival and frequency difference of arrival WC[J]. Journal of Computer and Communications, 2018, 6(1): 21-29.
- [28] 孟庆伟. Prim(普里姆)算法与 Dijkstra(迪杰斯特拉)算法分析比较[J]. 计算机光盘软件与应用, 2013(16): 96-97.
- [29] ROSADO J A D P, SALCEDO J A L, GRANADOS G, et al. Preliminary analysis of the positioning capabilities of the positioning reference signal of 3GPP LTE[C]//Proceedings of the 5th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Toulouse, 2011.