

文章编号:1671-251X(2021)03-0053-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17710

煤矿井下超宽带定位混合解算方法

陈美蓉¹, 王凯², 张嘉纯³, 许鹏远²

- (1. 中国矿业大学 数学学院, 江苏 徐州 221116;
2. 煤炭科学研究总院 矿山大数据研究院, 北京 100013;
3. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)



扫码移动阅读

摘要:超宽带定位是根据基站测定的标记点距离,基于一组非线性定位方程组,通过泰勒(Taylor)级数展开算法、Chan 算法或最小二乘法解算获得精确的设备位置。其中,Taylor 级数展开算法的求解精度高,但是对初始值具有很强的依赖性,如果初始值选择不恰当,会导致算法不收敛。针对上述问题,提出了一种结合头脑风暴优化(BSO)和 Taylor 级数展开的混合解算(BSO-Taylor)方法。采用 BSO 算法求解移动站到基站的误差函数最小化的最优解,将最优个体的到达时间差(TDOA)值作为 Taylor 级数展开算法的初始值,进行 Taylor 展开解算得到定位信息,解决了 Taylor 级数展开算法需要较好初始值的问题。对 Chan 算法、Taylor 级数展开算法和 BSO-Taylor 混合解算方法的结果进行了对比实验,结果表明,BSO-Taylor 混合解算方法通过全局搜索策略,获得了接近于真实位置的迭代初始值,既可以获得接近真值的定位性能,又解决了 Taylor 级数展开算法对不良初始值的敏感性;相较于 Chan 算法,BSO-Taylor 混合解算方法的解算结果更加稳定,且准确性更好;相较于初始位置为真实位置的 Taylor 级数展开算法,BSO-Taylor 混合解算方法的解算误差稍大;定位距离的变化和 TDOA 测量值标准差的变化对 Taylor 级数展开算法和 BSO-Taylor 混合解算方法的影响基本一致,而对 Chan 算法的影响较大。

关键词:矿井定位;超宽带定位;到达时间差;误差解算;Taylor 级数展开算法;头脑风暴优化;TDOA

中图分类号:TD655 文献标志码:A

Hybrid solution method for ultra-wideband positioning in coal mines

CHEN Meirong¹, WANG Kai², ZHANG Jiachun³, XU Pengyuan²

- (1. School of Mathematics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Research Institute of Mine Big Data, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
3. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Ultra-wideband positioning is based on the marked point distance measured by the base station and a set of non-linear positioning equations to obtain the precise device position by applying Taylor series expansion algorithm, Chan algorithm or least square solution. Among these algorithms, the Taylor series expansion algorithm has high solution accuracy, but has a strong dependence on the initial value. If the initial value is not selected properly, the algorithm will not converge. In order to solve the above problems, a hybrid solution (BSO-Taylor) method combining brain storm optimization (BSO) and Taylor series expansion is proposed. The BSO algorithm is used to solve the optimal solution for minimizing the error function from the mobile station to the base station. The time different of arrival(TDOA) value of

收稿日期:2021-01-20;修回日期:2021-03-01;责任编辑:张强。
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804306);北京市科技计划项目(Z201100004520015);中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2019-2-ZD002)。
作者简介:陈美蓉(1978—),女,山西汾阳人,讲师,博士,研究方向为智能优化与应用,E-mail:cmrzl@126.com。
引用格式:陈美蓉,王凯,张嘉纯,等.煤矿井下超宽带定位混合解算方法[J].工矿自动化,2021,47(3):53-59.
CHEN Meirong, WANG Kai, ZHANG Jiachun, et al. Hybrid solution method for ultra-wideband positioning in coal mines[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(3): 53-59.

the optimal individual is used as the initial value of the Taylor series expansion algorithm to carry out the Taylor expansion solution to obtain the positioning information. This method solves the problem that the Taylor series expansion algorithm requires better initial value. Moreover, the results of Chan algorithm, Taylor series expansion algorithm and the BSO-Taylor hybrid solution method are compared. The results show that the BSO-Taylor hybrid solution method obtains the iterative initial value close to the true position through the global search strategy. The method not only obtains the positioning performance close to the true value, but also solves the sensitivity of the Taylor series expansion algorithm to the bad initial values. Compared with the Chan algorithm, the solution of the BSO-Taylor hybrid solution method is more stable and more accurate. Compared with the Taylor series expansion algorithm, the initial position of which is the true position, the solution error of the BSO-Taylor hybrid solution is slightly larger. The effects of the variation of the positioning distance and the variation of the standard deviation of the TDOA measurements value on the Taylor series expansion algorithm and the hybrid BSO-Taylor solution method are basically the same. However, the effect on the Chan algorithm is greater.

Key words: mine positioning; ultra-wideband positioning; time difference of arrival; error calculation; Taylor series expansion algorithm; brain storm optimization; TDOA

0 引言

随着移动终端的普及以及无人驾驶、智能机器人技术在煤矿中的推广应用,如何在井下狭闭空间内更准确地定位人-机-物,已成为制约智能矿山建设的瓶颈环节^[1-2]。目前,常用的室内定位方法有红外线定位、超声波定位、蓝牙定位、射频识别定位、激光定位和超宽带定位等^[3-4],这些方法已广泛用于井下各类设备及人员定位。其中,超宽带作为一种无线载波通信技术,采用窄脉冲信号实现信号数据传输和无线通信,具有较高的数据传输速率、可共享的频谱、较低的拦截和检测概率及较强的抗干扰能力^[5-6],正在取代蓝牙、射频识别等定位技术,越来越多地应用于矿井人员和设备定位^[7-8]。

超宽带定位是根据基站测定的标记点距离,基于一组非线性定位方程组,通过泰勒(Taylor)级数展开算法^[9-11]、Chan 算法^[12]或最小二乘(Least Square,LS)法^[13]解算获得精确的设备位置。其中,Taylor 级数展开算法的求解精度高,但是对初始值具有很强的依赖性,如果初始值选择不恰当,会导致算法不收敛,因此,在迭代之前,应估计出较为准确的移动站初始位置。为解决该问题,本文提出了结合头脑风暴优化(Brain Storm Optimization,BSO)^[14-17]和 Taylor 级数展开算法的新型超宽带定位解算(BSO-Taylor 混合解算)方法。通过具有较好全局搜索能力的 BSO 算法,寻优获得具有较小定位误差的最优定位点作为 Taylor 级数展开算法的解算初始值,从而提升定位精度。实验验证了所提方法的有效性。

1 TDOA 定位方法

常用的超宽带定位方法包括到达时间定位方

法、到达时间差(Time Different of Arrival,TDOA)定位方法、到达角度定位方法和信号强度定位方法及混合定位方法^[18]。其中,TDOA 定位方法不要求基站与移动站之间时钟一致,只需每个基站之间时钟同步就能得到所需值,且在对到达时间作差的过程中会减小部分误差,定位精度能相对提高。考虑到煤矿巷道狭长封闭空间中基站和标定点的同步难度,本文采用 TDOA 定位方法。

TDOA 定位方法也称为双曲线测距方法,通过测量标定点发出的信号到达 2 个不同参考基站的时间差值,解算相应的测距模型,获得标定点位置。TDOA 定位系统如图 1 所示,将参考基站 BS_i 之间时钟连接到同一网络,确保其保持同步。

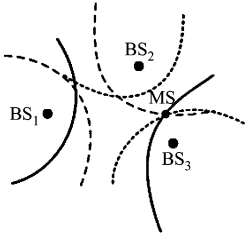


图 1 TDOA 定位系统

Fig.1 TDOA positioning system

以 3 个参考基站 BS₁、BS₂ 和 BS₃ 为例,设其坐标分别为 (x_1,y_1) 、 (x_2,y_2) 、 (x_3,y_3) ,移动站 MS 的位置坐标为 (x,y) ,其到达 3 个基站的距离之差分别记为 D_{21} 、 D_{32} 、 D_{31} ,测距方程组定义为

$$\left\{\begin{aligned} D_{21} &= \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2} = c(\tau_2-\tau_1) \\ D_{32} &= \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2} = c(\tau_3-\tau_2) \\ D_{31} &= \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2} = c(\tau_3-\tau_1) \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: c 为电磁波传播速度; τ_i 为第*i*个基站所接收信号的到达时间, $i=1,2,3$ 。

实际测量中存在噪声,式(1)不严格相等,因此,通过 Taylor 级数展开算法或 Chan 算法等非迭代方法求解式(1),可以得到移动站的位置坐标。

2 BSO-Taylor 混合解算方法

TDOA 定位方法测定距离需要求解一组非线性定位方程组,目前主要采用 LS 法、直接法或 Taylor 级数展开算法进行方程求解。其中,Taylor 级数展开算法是超宽带定位中重要的迭代算法。通过在每次迭代后求解 TDOA 测量误差值的局部 LS 解,以提高对移动站位置的估计精度。

2.1 Taylor 级数展开算法

设待求解移动站 MS 的位置坐标为 (x,y) ,初始位置为 (x_R,y_R) ,测量误差为 $(\Delta x,\Delta y)$,采用 Taylor 级数展开算法迭代计算,则移动站的解算位置与初始位置存在以下有关系:

$$\begin{cases} x = x_R + \Delta x \\ y = y_R + \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

在初始位置坐标 (x_R,y_R) 处进行 Taylor 级数展开,并忽略二阶以上分量,可得

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}\mathbf{A} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{h} = \begin{bmatrix} R_{21} - R_2 + R_1 \\ R_{31} - R_3 + R_1 \\ \vdots \\ R_{M1} - R_M + R_1 \end{bmatrix}$, R_M 为移动站到第*M*个

基站的距离, $R_{M1} = R_M - R_1$,表示移动站到第*M*个

基站与到第 1 个基站的距离差值; $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ \vdots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} \end{bmatrix}$,

a_{M1} 为函数 $f(x,y) = (x_R + \Delta x, y_R + \Delta y)$ 对*x*的偏

导数, a_{M2} 为函数 $f(x,y) = (x_R + \Delta x, y_R + \Delta y)$ 对*y*

的偏导数; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为误差向量, $\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} n_{21} \\ n_{31} \\ \vdots \\ n_{M1} \end{bmatrix}$, n_{M1}

表示移动站到第*M*个基站与到第 1 个基站距离差值的测量误差。

对式(3)进行加权 LS 法估计后得

$$\mathbf{A} = (\mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为 TDOA 测量值的协方差矩阵。

设误差门限为 $\boldsymbol{\varepsilon}$,下一次迭代计算位置坐标为 $x' = x_R + \Delta x, y' = y_R + \Delta y$,重复以上过程,直到满足以下关系:

$$|\Delta x| + |\Delta y| < \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

2.2 BSO-Taylor 混合解算方法

BSO 由 Shi Yuhui^[19]于 2011 年首次提出,是一种模拟人类思考行为的新型群体智能优化算法。它将群体智能优化算法中的每个解视为一个数据点,通过对数据点的聚类进行分组,搜寻各组中的优势个体,找到问题的全局最优解。BSO 已被用来解决多个领域的优化问题。

超宽带定位解算建模为单目标优化问题,以移动站位置坐标为进化个体,个体的取值范围取决于室内空间尺寸,其优化目标为最小化移动站到各个基站的误差函数之和。针对此优化问题,采用 BSO 算法求解适应度最小的最优解,并将最优个体的 TDOA 值作为 Taylor 级数展开算法解算的初始值,进行 Taylor 展开解算得到定位信息。

超宽带定位 BSO-Taylor 混合解算方法具体流程如下:

Step 1:以移动站位置坐标为进化个体,随机生成*N*个个体。

Step 2:在决策空间将个体进行聚类,分成*K*个集群。

Step 3:根据移动站到各个基站的误差评估个体适应度值。

Step 4:对每个簇中的个体进行排序,将每个簇中的最好个体作为该簇的中心。

Step 5:生成一个 0~1 的随机数,如果该随机数小于预设的概率*P*₁,则随机生成一个个体,代替一个簇中心。

Step 6:生成新个体,过程如图 2 所示。

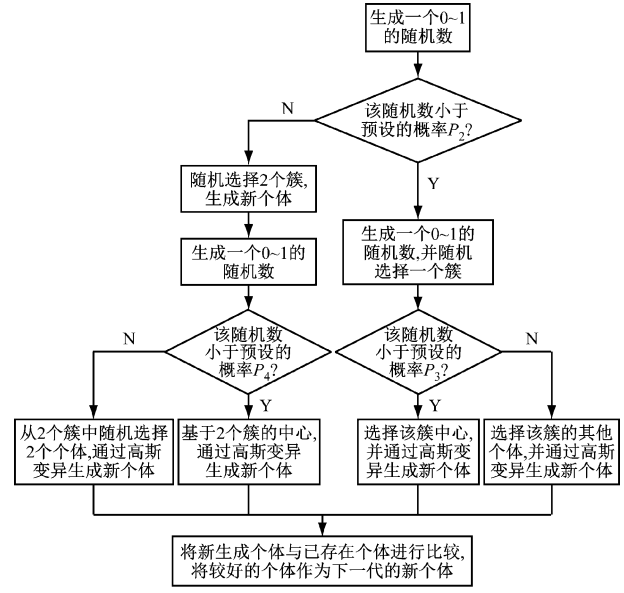


图 2 生成新个体的过程

Fig. 2 Process of generating a new individual

Step 7:如果达到了预设的最大迭代次数,则停止,否则转 Step 2。

Step 8:采用以上进化算法得到移动站的最优

位置坐标,作为 Taylor 级数迭代的初始值。

Step 9:将初始值代入式(4)进行迭代计算。

Step 10:若达到最大迭代次数或满足 $|\Delta x| + |\Delta y| < \varepsilon$,则输出最优目标点;否则计算式(3),并返回 Step 9。

3 测距实验与解算方法性能对比

3.1 实验环境

考虑到井下巷道一般为狭长封闭空间,本实验环境为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 80\text{ m}$ 的狭长巷道,基于 P440 模块实现超宽带测距,移动站的测量点位置如图 3 所示。4 个基站的位置分别设为 $(0,0)$ 、 $(100\text{ m},0)$ 、 $(0,100\text{ m})$ 、 $(100\text{ m},100\text{ m})$,基于 Matlab 2016b 对所提方法性能进行对比分析。

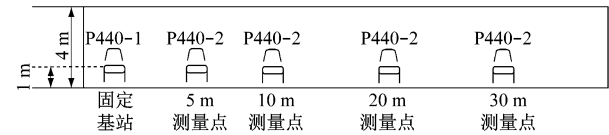


图 3 移动站的测量点位置

Fig. 3 Measurement point position of mobile station

被测移动站 MS 的实际位置选择为 $(50\text{ m}, 50\text{ m})$,如图 4 所示。测量并采集目标移动站的测量值,分别应用 Taylor 级数展开算法、Chan 算法^[20]和 BSO-Taylor 混合解算方法求取移动站位置。

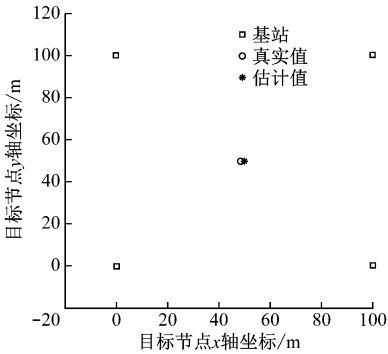


图 4 被测移动站的实际位置

Fig. 4 True position of mobile station under test

Chan 算法是一种求解双曲线方程组的非递归算法,该算法采用两步最大似然估计,其特点是计算量小,在噪声服从高斯分布的环境下,定位精度高。

3.2 算法稳定性对比实验

Taylor 级数展开算法是在初始值基础上,迭代寻找最佳移动站坐标。移动站的初始位置选择为真实值,如图 5 所示。算法运行 10 000 次位置解算得到的散点图如图 6 所示,解算的位置点大致沿着直线 $y=x$ 两侧均匀分布,说明 Taylor 级数展开算法的稳定性较好。Taylor 级数展开算法解算结果在 x 轴方向的误差如图 7 所示,从图 7 可看出,最大正误差不超过 0.04 m ,最大负误差不超过 -0.045 m 。

Taylor 级数展开算法解算结果在 y 轴方向的误差如图 8 所示,从图 8 可看出,最大正误差不超过 0.08 m ,最大负误差不超过 -0.07 m 。Taylor 级数展开算法解算结果的均方根误差如图 9 所示,最大误差不超过 0.035 m 。通过以上分析可知,Taylor 级数展开算法的定位解算结果较为稳定,定位误差

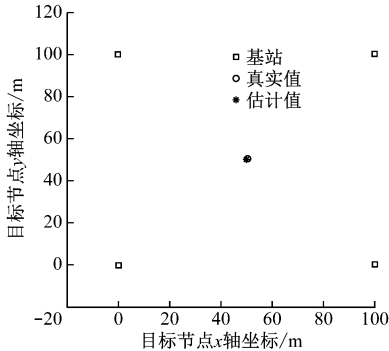


图 5 Taylor 级数展开算法移动站位置
Fig. 5 Position of mobile station of Taylor series expansion algorithm

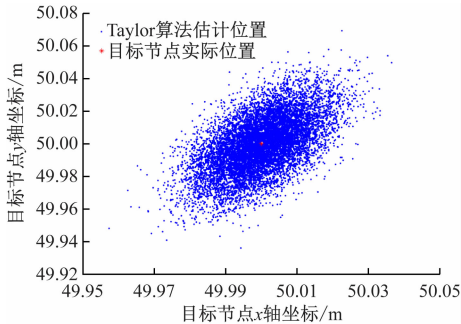


图 6 Taylor 级数展开算法散点图
Fig. 6 Taylor series expansion algorithm scatter plot

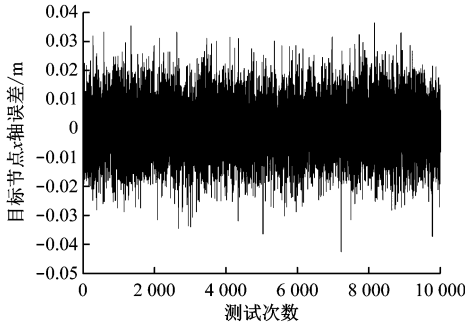


图 7 Taylor 级数展开算法 x 轴误差
Fig. 7 x -axis error of Taylor series expansion algorithm

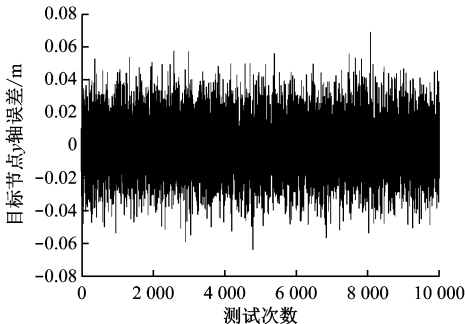


图 8 Taylor 级数展开算法 y 轴误差
Fig. 8 y -axis error of Taylor series expansion algorithm

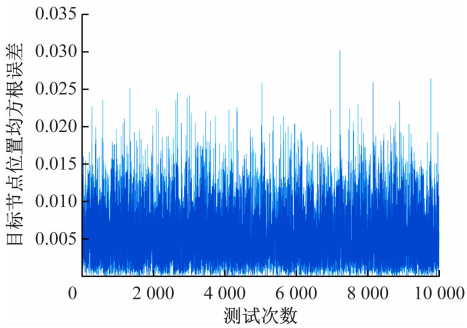


图9 Taylor级数展开算法均方根误差曲线

Fig. 9 Taylor series expansion algorithm RMS error curves

较小。但实际上,Taylor级数展开算法对初始值具有较强的依赖性,上述较优的解算结果依赖于选取的迭代初始值是移动站位置真值。

对比分析 Chan 算法和 BSO-Taylor 混合解算方法的性能,运行 10 000 次位置解算得到的散点图如图 10 所示,相较于 Chan 算法 BSO-Taylor 混合解算方法的解算结果更加集中于实际位置附近,稳定性更好。

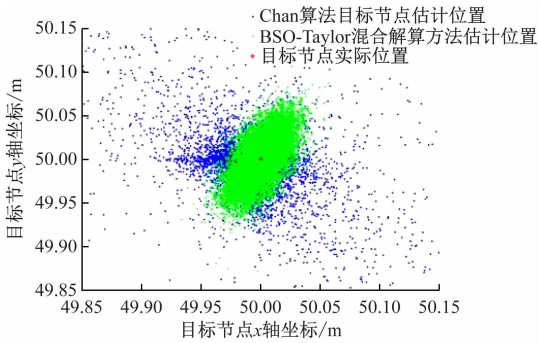


图10 Chan算法与BSO-Taylor混合解算方法散点对比

Fig. 10 Scattered comparison of Chan algorithm and BSO-Taylor algorithm

Chan 算法与 BSO-Taylor 混合解算方法解算结果在 x 轴方向的误差对比如图 11 所示,Chan 算法解算结果的最大正负误差分别不超过 0.15, -0.15 m,而 BSO-Taylor 混合解算方法的解算结果的最大正负误差分别不超过 0.10, -0.10 m。2 种方法解算结果在 y 轴方向的误差对比如图 12 所示,Chan 算法解算结果的最大正负误差分别不超过 0.15, -0.15 m,而 BSO-Taylor 混合解算方法的解算结果的最大正负误差分别不超过 0.10, -0.10 m。2 种方法解算结果的均方根误差对比如图 13 所示,Chan 算法解算结果的最大误差不超过 0.12,而 BSO-Taylor 混合解算方法解算结果的最大误差不超过 0.04。通过分析可以发现,BSO-Taylor 混合解算方法相较于 Chan 算法的解算误差更小,稳定性也更好。

3.3 解算误差对比实验

将 Chan 算法、Taylor 级数展开算法和 BSO-Taylor 混合解算方法的解算误差进行比较,5个标

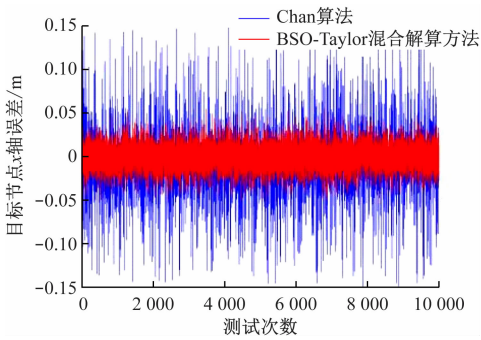


图11 Chan算法与BSO-Taylor混合解算方法
 x 轴误差对比

Fig. 11 x -axis error comparison of Chan algorithm and BSO-Taylor algorithm

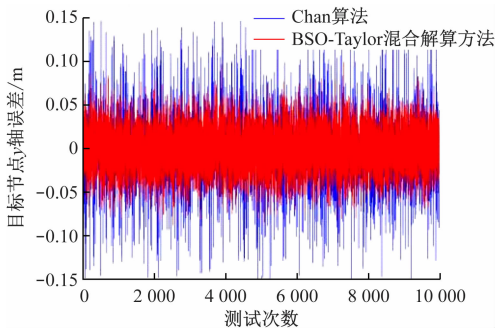


图12 Chan算法与BSO-Taylor混合解算方法
 y 轴误差对比

Fig. 12 y -axis error comparison of Chan algorithm and BSO-Taylor algorithm

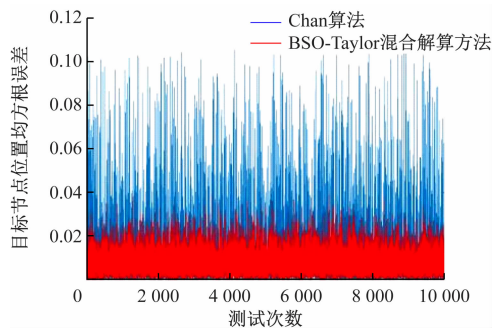


图13 Chan算法与BSO-Taylor混合解算方法
均方根误差对比

Fig. 13 RMS error comparison of Chan algorithm and BSO-Taylor algorithm

定点位置的解算分别运行 100 次的结果与真实值的标准差见表 1。Chan 算法的标准差明显大于另外 2 种方法,基于移动站真实位置的 Taylor 级数展开算法获得的结果具有略优于 BSO-Taylor 混合解算方法的性能,然而,实际系统中的移动站真实位置是不可能预先知道的。BSO-Taylor 混合解算方法通过全局搜索策略,获得迭代初始值,性能接近 Taylor 级数展开算法。

为直观比较 3 种解算方法的定位精度,将移动站位置的 y 坐标固定为 50 m, x 坐标从 0 移动到 100 m,移动站的位置解算结果如图 14 所示。通过

表 1 3 种算法解算结果与真实值的标准差对比
Table 1 Comparison of standard deviation between results of the three algorithms and true value

算法	标准差				
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
Chan 算法	7.685 1	7.697 6	7.687 0	7.686 3	7.702 8
Taylor 级数展开算法	1.486 8	1.494 7	1.465 8	1.489 4	1.474 7
BSO-Taylor 混合解算方法	2.275 9	2.285 3	2.281 8	2.280 3	2.275 6

比较3种解算方法的结果与真实值的误差可见,BSO-Taylor 混合解算方法的解算结果误差稍大于基于真实移动站初始位置的 Taylor 级数展开算法,Chan 算法的误差比前两者高。

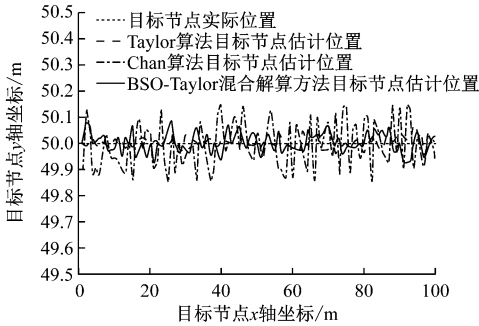


图 14 3 种算法解算的移动站位置结果与真实值曲线
Fig. 14 Curves of mobile station positions calculated by three algorithms and true positions

在保持移动站标定点真实位置不变的基础上,移动参考基站,获得不同定位距离下的解算方法性能对比,如图 15 所示。显然,随着定位距离的增加,定位误差也逐渐增大。这是因为,随着定位距离的增加,多径传播误差和非视线传播误差也随之增加。尽管 BSO-Taylor 混合解算方法在 60 m 后的定位误差有所增加,但是仍大大低于 Chan 算法。

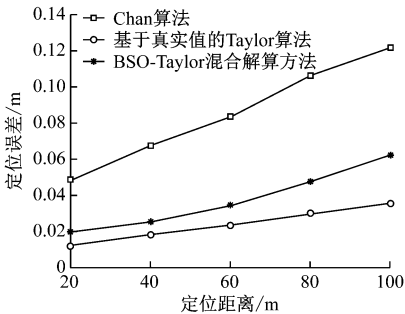


图 15 定位距离对定位误差的影响

Fig. 15 Effect of positioning distance on positioning error

TDOA 定位方法是将距离信号转换成时间信号的定位方法,因此,TDOA 的测量值直接决定了上述 3 种算法的定位性能。选择不同的 TDOA 测量值标准差,对上述 3 种算法连续进行 100 次计算分析,取其均值作为最终仿真结果,如图 16 所示。

可见,3 种算法的定位误差随着 TDOA 测量值标准差的增加而增加。当标准偏差达到 0.09 时,基于标定点真实值的 Taylor 级数展开算法表现最佳,定位误差小于 0.10 m。BSO-Taylor 混合解算方法具有相似的定位误差变化趋势,定位精度明显高于 Chan 算法。

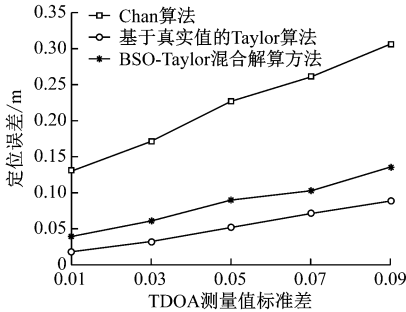


图 16 TDOA 测量值标准差对 3 种算法解算误差的影响
Fig. 16 Effect of standard deviation values of TDOA measurement on the three algorithms error

4 结论

(1) 提出了应用于煤矿井下超宽带定位的 BSO-Taylor 混合解算方法,基于 BSO 求取移动站到基站的误差函数最小化的最优解,并将最优个体的 TDOA 值作为 Taylor 级数展开算法的初始值,解决了 Taylor 级数展开算法需要较好初始值的问题。对 Chan 算法、Taylor 级数展开算法和 BSO-Taylor 混合解算方法的结果进行了对比实验,结果表明,BSO-Taylor 混合解算方法相较于 Chan 算法的解算结果更加稳定,且准确性更好;BSO-Taylor 混合解算方法的误差稍大于基于真实标定点初始位置的 Taylor 级数展开算法,定位距离的变化和 TDOA 测量值标准差的变化对 Taylor 级数展开算法和 BSO-Taylor 混合解算方法的影响基本一致,而对 Chan 算法的影响较大。

(2) BSO-Taylor 混合解算方法只适用于二维固定空间内以点为基站的超宽带定位解算,未来的研究应进一步解决三维定位以及非视距、多径传播、锚点分布和空间信号干扰等问题。

参考文献 (References):

[1] 刘清. 基于超宽带技术的采煤机定位系统设计[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 132-135.
LIU Qing. Design on positioning system of shearer based on ultra wide band technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 132-135.
[2] 赵文生. 综采工作面复杂环境下超宽带测距技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 145-149.
ZHAO Wensheng. Research on UWB ranging technology under complex environment of fully-mechanized mining face [J]. Coal Science and

- Technology, 2019, 47(12):145-149.
- [3] 郭建广, 郑紫微, 杨任尔. 基于改进变尺度法的超宽带定位新算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(12): 3395-3399.
- GUO Jianguang, ZHENG Ziwei, YANG Ren'er. New UWB localization algorithm based on modified DFP algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(12):3395-3399.
- [4] XIAO Zhu, TAN Guanghua, LI Renfa, et al. Joint TOA/AOA localization based on UWB for wireless sensor networks[J]. Computer Research and Development, 2013, 50(3):453-460.
- [5] 符世琛, 李一鸣, 张敏骏, 等. 基于 UWB 信号的 TW-TOF 测距技术在狭长巷道中的精度测试实验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(3):246-248.
- FU Shichen, LI Yiming, ZHANG Minjun, et al. Accuracy testing experiment in narrow roadway based on TW-TOF ranging technique of UWB signals[J]. Coal Technology, 2017, 36(3):246-248.
- [6] 李丽娜, 尤洪祥, 张晓东, 等. 机器人 UWB 定位系统的设计与实现[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2018, 45(1):34-38.
- LI Lina, YOU Hongxiang, ZHANG Xiaodong, et al. Design and implementation of robot UWB positioning system[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2018, 45(1):34-38.
- [7] ZHANG Qiang, ZHAO Dengkang, ZUO Shaojun, et al. A low complexity NLOS error mitigation method in UWB localization[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Shenzhen, 2015:1-5.
- [8] 胡青松, 张申, 吴立新, 等. 矿井动目标定位:挑战、现状与趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5):1059-1068.
- HU Qingsong, ZHANG Shen, WU Lixin, et al. Localization techniques of mobile objects in coal mines: challenges, solutions and trends[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5):1059-1068.
- [9] 李世银, 朱媛, 王晓明. 考虑锚点位置误差的井下 TDOA 改进算法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(11): 10-13.
- LI Shiyin, ZHU Yuan, WANG Xiaoming. Improved TDOA algorithm for underground positioning considering anchor position error[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(11):10-13.
- [10] 张令文, 谈振辉. 基于泰勒级数展开的蜂窝 TDOA 定位新算法[J]. 通信学报, 2007, 28(6):7-11.
- ZHANG Lingwen, TAN Zhenhui. New TDOA algorithm based on Taylor series expansion in cellular networks[J]. Journal on Communications, 2007, 28(6):7-11.
- [11] CHEHRI A, FORTIER P, TARDIF P M. UWB-based sensor networks for localization in mining environments[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 987-1000.
- [12] YU K, MONTILLET J P, RABBACHIN A, et al. UWB location and tracking for wireless embedded networks[J]. Signal Processing, 2006, 86(9): 2153-2171.
- [13] 成龙, 符世琛, 陈慎金, 等. 基于 Chan 算法的掘进机超宽带位姿检测方法[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 279-281.
- CHENG Long, FU Shichen, CHEN Shenjin, et al. Ultra-wideband pose detection method of roadheader based on Chan algorithm[J]. Coal Technology, 2018, 37(7):279-281.
- [14] 张勇, 高光辉, 郭一楠, 等. 融合差分进化和 Taylor 级数的超宽带定位解算方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(1):70-74.
- ZHANG Yong, GAO Guanghui, GUO Yinan, et al. Ultra-wideband positioning solution method based on differential evolution and Taylor series[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(1):70-74.
- [15] GUO Yinan, YANG Huan, CHEN Meirong, et al. Grid-based dynamic robust multi-objective brain storm optimization algorithm[J]. Soft Computing, 2020, 24:7395-7415.
- [16] 郭一楠, 程伟, 杨欢, 等. 锚杆钻机转速的头脑风暴最优自抗扰控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(3):13-18.
- GUO Yinan, CHENG Wei, YANG Huan, et al. An optimal active-disturbance-rejection controller for the rotary speed of an anchor-hole drill based on brain storm optimization algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2019, 40(3):13-18.
- [17] 郭一楠, 崔宁, 程健. 基于 MOPSO-SA 混合算法的矿山微震震源定位方法[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3):126-132.
- GUO Yinan, CUI Ning, CHENG Jian. Microseismic source localization method based on hybrid algorithm of MOPSO-SA[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3):126-132.
- [18] PÉREZ-SOLAN J J, EZPELETA S, CLAVER J M. Indoor localization using time difference of arrival with UWB signals and unsynchronized devices[J]. Ad Hoc Networks, 2020, 99:1-11.
- [19] SHI Yuhui. Brain storm optimization algorithm[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2011, 6728:1-14.
- [20] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 42(8): 1905-1915.