

## 基于抗差估计的三维测向无源定位算法

莫成坤, 陈树新, 吴昊, 张艺航  
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 针对方位角和俯仰角存在异常误差影响机载单站三维无源定位结果准确性的问题, 提出一种鲁棒的递推最小二乘(RRLS)定位算法。在最小二乘(LS)解的基础上, 利用M估计原理求出目标位置的鲁棒估计形式。为保证定位的实时性, 推导了鲁棒的递推最小二乘算法, 并选取IGGⅢ权函数作为等价权函数。理论分析表明, RRLS算法能够准确识别异常误差, 通过降低异常观测数据的权值来减小其对定位准确性的影响。仿真结果表明, 在两角存在异常误差时, RRLS算法具有良好的抗异常误差能力, 保证了定位结果的有效性和快速收敛。

**关键词:** 机载单站定位; 无源定位; 递推最小二乘估计; 鲁棒估计; 等价权函数

**中图分类号:** V271.4; TP971 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0022-05

## A Robust Estimation Based 3D Passive Locating Algorithm

MO Cheng-kun, CHEN Shu-xin, WU Hao, ZHANG Yi-hang  
(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To solve the problem of location inaccuracy caused by outliers in azimuth and elevation in single-observer airborne 3D passive locating, a robust recursive least squares (RRLS) algorithm was proposed. On the basis of least square solution, the robust estimation of target location was obtained according to M-estimation principle. In order to ensure real-time locating, the robust recursive least squares algorithm was deduced, and the IGGⅢ weight function was selected as equivalent weight function. Theoretical analysis indicated that the RRLS algorithm can identify outliers effectively, and reduce the influence of abnormal measurement data on locating result by decreasing the weights of them. Simulations show that when outliers exist in azimuth and elevating, RRLS algorithm has the good ability to resist the outliers, ensure the validity of the positioning result and fast convergence.

**Key words:** single-observer locating; passive location; recursive least squares estimation; robust estimation; equivalent weight function

### 0 引言

机载单站无源定位因具有隐蔽性、灵活性和高度独立性等优点在现代战争中扮演着重要的角色<sup>[1]</sup>。随着研究的不断深入, 定位方法也不断创新, 主要包括测向定位法, 波达时间差定位法, 多普勒效应法以及多种方法结合的联合定位法<sup>[2-5]</sup>。而在某些恶劣的电磁环境中, 角度信息是传感器唯一可以探测到的信息。因此, 研究基于角度信息的测向定位法仍然具有重要的意义。

在机载单站三维无源定位中, 需要对方位角和俯仰角进行角度观测。在测量角度的过程中误差是不可避免的, 而且两个角度都可能存在误差, 从而导致定位结果不准确。因此, 需要一定的算法来减小定位误差, 提高定位精度。最小二乘(Least Squares, LS)估计<sup>[6]</sup>是最常用的定位算法, 它通过减小观测向量中的误差来提高定位精度, 在三维定位中可以取得良好的定位效果, 但是, 常用的最小二乘估计算法运算量大, 且不能满足实时定位的要求, 而在测量噪声服从正态分布前提下的递推最小二乘(Recursion Least Squares, RLS)算法<sup>[7]</sup>恰好弥补了实时性的缺点, 它通过递推可以实时地对目标进行定位且定位精度基本上与LS算法相同。但该算法对异常误差极度敏感, 少量的异常观测值会使定位结果受到较大的影响, 抗异常误差能力较弱。

收稿日期: 2014-04-14 修回日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61071014)

作者简介: 莫成坤(1990—), 男, 山东济宁人, 硕士, 研究方向为单站无源定位。

本文在上述算法的基础上,根据M估计原理推导了一种鲁棒的递推最小二乘(Robust Recursion Least Squares, RRLS)算法,来满足机载单站三维无源定位对定位精度和实时性的需求。针对三维定位观测数据的特点,依据残差分量分别构建了等价权函数,并通过比较不同算法的影响函数从理论上分析了RRLS算法对异常误差处理的有效性。最后通过仿真验证了无论方位角或俯仰角存在异常误差,RRLS算法相比于RLS算法都具有良好的抗异常误差能力。

## 1 定位模型及最小二乘解

建立定位模型如图1所示<sup>[8]</sup>。

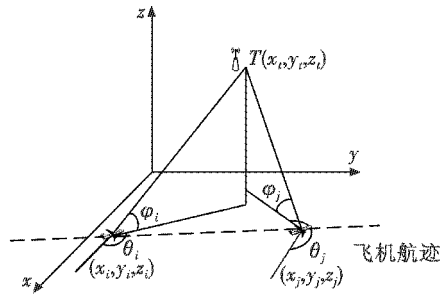


图1 基于角度信息的机载单站无源定位示意图

Fig.1 Single observer airborne passive location diagram based on angle information

假设定位目标  $T(x_t, y_t, z_t)$ , 令飞机从某点出发并做匀速直线运动,且运动方向不指向目标<sup>[9]</sup>。飞机实时对目标进行测向定位,并通过导航系统确定自身坐标  $(x_i, y_i, z_i)$ 。第  $i$  个测向点到目标  $T$  的真实方位角(本文中规定与  $x$  轴正方向的夹角)和俯仰角(观测目标与飞机之间的连线与  $xoy$  平面的夹角)分别为  $\theta_i^*$  和  $\varphi_i^*$ , 该测向点测出的目标方位角和俯仰角分别为  $\theta_i$  和  $\varphi_i$ , 根据几何关系可以得到非线性方程组为

$$\begin{cases} \theta_i^* = \arctan \frac{y_t - y_i}{x_t - x_i} \\ \varphi_i^* = \arctan \frac{z_t - z_i}{\sqrt{(y_t - y_i)^2 + (x_t - x_i)^2}} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

根据三角变换可将式(1)转化为矩阵形式,即

$$\mathbf{H}^* \mathbf{X}^* = \mathbf{L}^* \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{H}^* = \begin{bmatrix} \sin \theta_1^* & -\cos \theta_1^* & 0 \\ \cos \theta_1^* \sin \varphi_1^* & \sin \theta_1^* \sin \varphi_1^* & -\cos \varphi_1^* \\ \sin \theta_2^* & -\cos \theta_2^* & 0 \\ \cos \theta_2^* \sin \varphi_2^* & \sin \theta_2^* \sin \varphi_2^* & -\cos \varphi_2^* \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin \theta_N^* & -\cos \theta_N^* & 0 \\ \cos \theta_N^* \sin \varphi_N^* & \sin \theta_N^* \sin \varphi_N^* & -\cos \varphi_N^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11}^* \\ \mathbf{h}_{12}^* \\ \mathbf{h}_{21}^* \\ \mathbf{h}_{22}^* \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{n1}^* \\ \mathbf{h}_{n2}^* \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{L}^* = \begin{bmatrix} \sin \theta_1^* x_1 - \cos \theta_1^* y_1 \\ \cos \theta_1^* \sin \varphi_1^* x_1 + \sin \theta_1^* \sin \varphi_1^* y_1 - \cos \varphi_1^* z_1 \\ \sin \theta_2^* x_2 - \cos \theta_2^* y_2 \\ \cos \theta_2^* \sin \varphi_2^* x_2 + \sin \theta_2^* \sin \varphi_2^* y_2 - \cos \varphi_2^* z_2 \\ \vdots \\ \sin \theta_N^* x_N - \cos \theta_N^* y_N \\ \cos \theta_N^* \sin \varphi_N^* x_N + \sin \theta_N^* \sin \varphi_N^* y_N - \cos \varphi_N^* z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{11}^* \\ \mathbf{l}_{12}^* \\ \mathbf{l}_{21}^* \\ \mathbf{l}_{22}^* \\ \vdots \\ \mathbf{l}_{n1}^* \\ \mathbf{l}_{n2}^* \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X}^* = [x_t, y_t, z_t]^T。$$

测量方位角和俯仰角的估计值与真实值之间因测量噪声的存在总是有误差的,因此,无法得到真实的系数矩阵  $\mathbf{H}^*$  和观测向量  $\mathbf{L}^*$ , 只能得到受噪声污染的矩阵  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{L}$  (即用测量值  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  代替矩阵  $\mathbf{H}^*$  和  $\mathbf{L}^*$  中的  $\theta_i^*$  和  $\varphi_i^*$ )。若忽略系数矩阵  $\mathbf{H}$  的噪声干扰,则求出目标的最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{X}}_{LS} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{L} \quad (3)$$

## 2 鲁棒的递推最小二乘定位算法

在机载单站三维无源定位中,如果方位角和俯仰角观测数据的扰动即测向噪声严格服从正态分布,则最小二乘估计解具有一致性和有效性。但是,当观测数据不严格服从正态分布假设、样本遭受异常误差污染时,单个观测值的偏差都可能导致估计结果严重偏差<sup>[10]</sup>。为提高LS算法的抗异常误差能力以及保证算法的实时性,在引入M估计原理的基础上推导鲁棒的递推最小二乘无源定位算法。

### 2.1 鲁棒算法推导

以  $\mathbf{h}_{ij}$  代替系数矩阵  $\mathbf{H}^*$  中的  $\mathbf{h}_{ij}^*$ ,  $\mathbf{l}_{ij}$  代替观测向量  $\mathbf{L}^*$  中的  $\mathbf{l}_{ij}^*$ 。则定位估值  $\hat{\mathbf{X}}$  的误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L} = [\mathbf{h}_{11}, \mathbf{h}_{12}, \dots, \mathbf{h}_{n1}, \mathbf{h}_{n2}]^T \hat{\mathbf{X}} - [\mathbf{l}_{11}, \mathbf{l}_{12}, \dots, \mathbf{l}_{n1}, \mathbf{l}_{n2}]^T \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为残差向量; 设观测值独立, 先验权矩阵  $\mathbf{W}$  为对角阵。按照鲁棒估计原理, 取极值函数为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 w_{ij} \rho(V_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 w_{ij} \rho(\mathbf{h}_{ij} \hat{\mathbf{X}}_{ij} - \mathbf{l}_{ij}) = \min \quad (5)$$

式中,  $\rho(\cdot)$  函数一般为对称、连续、严凸, 或在正半轴上非减的函数, 决定鲁棒性的好坏。记  $\psi(V_{ij}) = \partial \rho / \partial V_{ij}$ , 并令上式对  $\mathbf{X}$  的导数为零, 则有

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 w_{ij} \psi(V_{ij}) \mathbf{h}_{ij} = 0 \quad (6)$$

为了达到抗异常误差的目的, 当误差超过一定值时, 鲁棒估计的  $\psi$  函数取非负减函数。这里令  $\psi(V_{ij}) / V_{ij} = \mathbf{U}_{ij}$  (权因子),  $\bar{w}_{ij} = w_{ij} \mathbf{U}_{ij}$  为等价权元素, 则可将式(6)改写为矩阵形式, 即

$$\mathbf{H}^T \bar{\mathbf{W}} \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

式中,  $\bar{\mathbf{W}} = \text{diag}(\bar{w}_{11}, \bar{w}_{12}, \dots, \bar{w}_{n1}, \bar{w}_{n2})$  为等价权矩阵。故目标位置的鲁棒估计为

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}^T \bar{\mathbf{W}} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \bar{\mathbf{W}} \mathbf{L} \quad (8)$$

## 2.2 递推算法推导

为保证机载单站无源定位的实时性,在式(8)的基础上推导递推的鲁棒估计算法。记第  $k$  个定位估值  $\hat{\mathbf{X}}_k$  是用前  $k$  个观测数据进行鲁棒估计得到的估计值,  $\mathbf{H}_k$  表示前  $2k$  行,其他参数的下标形式意义与之类似。故有

$$\hat{\mathbf{X}}_k = (\mathbf{H}_k^T \bar{\mathbf{W}}_k \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \bar{\mathbf{W}}_k \mathbf{L}_k \quad (9)$$

令  $\mathbf{P}_k = (\mathbf{H}_k^T \bar{\mathbf{W}}_k \mathbf{H}_k)^{-1}$ , 则有  $\mathbf{P}_k = ([\mathbf{H}_{k-1}^T \bar{\mathbf{W}}_{k-1} \mathbf{h}_k^T \tilde{\mathbf{w}}_k] \cdot [\mathbf{H}_{k-1}^T \bar{\mathbf{W}}_{k-1} \mathbf{h}_k^T \tilde{\mathbf{w}}_k]^T)^{-1}$ , 其中,  $\bar{\mathbf{W}}_k = (\tilde{\mathbf{W}}_k)^2$ ,  $\text{diag}(\bar{w}_{k1}, \bar{w}_{k2}) = (\text{diag}(\tilde{w}_{k1}, \tilde{w}_{k2}))^2 = (\tilde{\mathbf{w}}_k)^2$ 。观测值相互独立,等价权矩阵为对角阵,解得

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{P}_{k-1}^{-1} + \bar{\mathbf{h}}_k^T \bar{\mathbf{h}}_k]^{-1} \quad (10)$$

式中,  $\bar{\mathbf{h}}_k = [\bar{\mathbf{h}}_{k1}, \bar{\mathbf{h}}_{k2}]^T = \tilde{\mathbf{w}}_k [\mathbf{h}_{k1}, \mathbf{h}_{k2}]^T$ 。利用矩阵反演公式化简得

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I}_1 - \mathbf{P}_{k-1} \bar{\mathbf{h}}_k^T (\mathbf{I}_2 + \bar{\mathbf{h}}_k \mathbf{P}_{k-1} \bar{\mathbf{h}}_k^T)^{-1} \bar{\mathbf{h}}_k] \mathbf{P}_{k-1} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{I}_1$  为 3 阶单位矩阵;  $\mathbf{I}_2$  为 2 阶单位矩阵。则由式(9)知

$$\bar{\mathbf{X}}(k) = \mathbf{P}_k [\mathbf{H}_{k-1}^T \bar{\mathbf{W}}_{k-1} \bar{\mathbf{h}}_k^T] [\mathbf{L}_{k-1}^T \mathbf{l}_k^T]^T \quad (12)$$

$\mathbf{l}_k = [\mathbf{l}_{k1}, \mathbf{l}_{k2}]^T$ , 利用式(10)将式(12)化简为

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}(k-1) + \mathbf{P}_k \bar{\mathbf{h}}_k^T [\mathbf{l}_k - \bar{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{X}}(k-1)] \quad (13)$$

式(13)即为鲁棒的最小二乘算法递推形式。若取  $\rho(\mathbf{V}_{ij}) = v_{ij}^2$ , 则式(5)退化为最小二乘极值原则。可见,鲁棒估计包含了最小二乘估计。由于递推算法具有实时性,不能以批处理最小二乘估计结果解算残差。故在递推期间每次计算等价权因子之前,先以上次鲁棒估计的结果为初值进行一次递推最小二乘估计,再计算残差分量  $\hat{v}_{k1}$  和  $\hat{v}_{k2}$  的估计值为

$$\begin{cases} \hat{v}_{k1} = \mathbf{h}_{k1} \hat{\mathbf{X}}_{\text{RLS}}(k) - \mathbf{l}_{k1} \\ \hat{v}_{k2} = \mathbf{h}_{k2} \hat{\mathbf{X}}_{\text{RLS}}(k) - \mathbf{l}_{k2} \end{cases} \quad (14)$$

## 2.3 等价权函数的建立

从算法的推导中可以看出,鲁棒估计的关键是构造合适的等价权函数,使得当出现异常观测数据时,权值减小甚至降为 0,以减小异常数据对估值的影响。综合考虑鲁棒性能,采用 IGG III 权函数<sup>[11]</sup>,即

$$\bar{w}_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & |\tilde{v}_{ij}| \leq r_1 \\ \frac{w_{ij} r_1}{|\tilde{v}_{ij}|} \left( \frac{r_2 - |\tilde{v}_{ij}|}{r_2 - r_1} \right)^2 & r_1 < |\tilde{v}_{ij}| \leq r_2 \\ 0 & |\tilde{v}_{ij}| > r_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $w_{ij}$  为观测数据的先验权;  $\tilde{v}_{ij}$  为标准化残差,  $\tilde{v}_{ij} = \hat{v}_{ij}/\sigma_j$ ,  $\sigma_j$  为残差分量的标准差,可以通过先验方式计算得出。区间临界点  $r_1, r_2$  反映了算法对异常数据的敏感度,通常选取  $r_1 \in [1.0, 1.5]$ ,  $r_2 \in [2.5, 8.0]$ 。

从式(15)可以看出,IGG III 函数将观测数据的信息区间划为 3 段:保权区、降权区和拒绝区。主体观测数据应当落在保权区,它保障了鲁棒估计的效率;当观测数据出现异常但并非大异常误差,如飞机在测向过程中出现小的扰动时,应降低其权值以减小扰动的影响;当观测数据出现大异常误差,如某时刻飞机的测向数据来自其他辐射源时,将其剔除。由此可见,降权区综合考虑了鲁棒估计的效率和可靠性,而鲁棒估计的抗差能力由降权区和拒绝区来完成。

## 3 理论分析

本文用影响函数<sup>[12]</sup>来度量估值的抗异常误差能力。影响函数是统计量在相应母体分布下的一阶导数,反映了在不同位置上异常值对估值所造成的相对影响。影响函数值越小,估值对异常值越不敏感,抗差能力越强。根据 M 估计原理,RRLS 算法  $\hat{\mathbf{X}}$  的影响函数为

$$\mathbf{IF}_{\text{RRLS}}(\mathbf{l}_{ij}, \hat{\mathbf{X}}, \mathbf{F}) = -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{h}_{ij}^T w_{ij} \psi(\mathbf{h}_{ij} \mathbf{X} - \mathbf{l}_{ij}) \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{M} = \mathbf{H}^T \mathbf{A} \mathbf{H}$ ,  $\mathbf{A} = \text{diag}(w_{11} E\psi'(v_{11}), w_{12} E\psi'(v_{12}), \dots, w_{n1} E\psi'(v_{n1}), w_{n2} E\psi'(v_{n2}))$ ,  $E$  代表数学期望。

对于经典 LS 估计,由于  $\rho(\mathbf{V}_{ij}) = v_{ij}^2$ ,  $\psi(v_{ij}) = v_{ij}$ ,  $E(\psi'(v_{ij})) = 1$ , 故  $\mathbf{M} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H}$ , 其影响函数为

$$\mathbf{IF}_{\text{LS}}(\mathbf{l}_{ij}, \hat{\mathbf{X}}, \mathbf{F}) = -(\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{h}_{ij}^T w_{ij} v_{ij} \quad (17)$$

从式(16)和式(17)可以看出,鲁棒估计的影响函数主要受  $\psi$  函数的制约,当误差超过一定范围时,  $\psi$  函数为非负减函数。因此,随着误差的增大,影响函数值减小,异常误差对估计结果的影响减小。而由式(17)可知,LS 估计的  $\psi$  函数是单调递增的,随着误差的增大,影响函数值也增大,因此 LS 估计不具备抗差能力,异常误差对其影响较大。

## 4 仿真分析

文献[7]通过仿真实验比较了 RLS 算法与 LS 算法的定位性能,说明了 RLS 算法用于定位的可行性。

以 RLS 算法为标准来进行定位性能的分析相当于和经典 LS 算法进行定位性能的比较,这同样可以说明 RRLS 算法用于定位的可行性。具体仿真参数设置如下:辐射源目标  $T$  为(200 km,130 km,100 km)。为研究方便,令飞机从原点出发,沿  $x$  正半轴以 540 m/s 做匀速直线运动,探测周期为 1 s。设 RLS 算法和 RRLS 算法的递推初值为(0 km,0 km,0 km),初始  $P$  矩阵为  $P_{RLS}(0) = P_{RRLS}(0) = 10^5 I, I$  为 3 阶单位矩阵。假定测量噪声的主体分布服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的正态分布,仿真时间为 300 s,定义相对距离误差为

$$\delta_i = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [(\hat{x}_i^{(j)} - x_i)^2 + (\hat{y}_i^{(j)} - y_i)^2 + (\hat{z}_i^{(j)} - z_i)^2]} \quad (18)$$

式中:  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  为目标的估计位置;  $d$  为目标  $T$  到飞机航迹的距离; 并取 Monte-Carlo 仿真次数  $M = 200$ ; 假定  $\delta \leq 5\%$  时达到定位需求。取先验权矩阵  $W$  为单位矩阵,鲁棒估计的权函数选择 IGG III 函数,并令  $r_1 = 1.5, r_2 = 4$ 。为了比较 RLS 算法和 RRLS 算法的抗异常误差能力,进行如下两组仿真实验。

**仿真实验 1** 测量噪声严格服从均值为 0 的正态分布,且标准差  $\sigma = 0.5^\circ$ ,方位角和俯仰角观测数据无异常误差。仿真结果如图 2 所示。

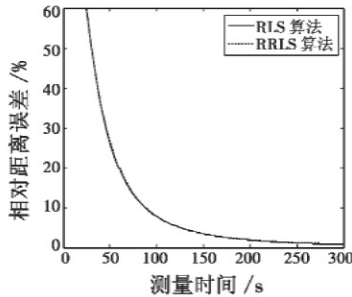


图 2 RLS 与 RRLS 定位算法比较(无异常误差)

Fig. 2 Comparison of RLS and RRLS with no outliers

**结果分析:**从图 2 可以看出,当方位角和俯仰角观测数据无异常误差时,RLS 算法和 RRLS 算法估计结果较为相近,随测量次数的增加均能达到定位要求,即当无异常误差干扰时,采用两种定位算法均可满足机载单站无源定位,这也说明了 RRLS 算法用于定位的可行性。

**仿真实验 2** 假定主体噪声服从正态分布,且标准差  $\sigma = 0.5^\circ$ ,观测数据存在异常误差,这里分方位角存在异常误差、俯仰角存在异常误差和两个测量角同时存在异常误差 3 种情况,如图 3 ~ 图 5 所示。考虑对每种情况加入单个异常误差、连续异常误差和大异常误差时,RRLS 算法对异常误差的抵抗能力。异常误差数值设定如表 1 所示。

表 1 异常误差设定

Table 1 Outliers setting

	时刻 $t/s$				
	111 ~ 120	160	180	200	220
方位角异常误差	$2.5\sigma$	$7\sigma$	$8\sigma$	$9\sigma$	$50\sigma$
俯仰角异常误差	$2.5\sigma$	$7\sigma$	$8\sigma$	$9\sigma$	$50\sigma$
同时存在异常误差	$2.5\sigma$	$7\sigma$	$8\sigma$	$9\sigma$	$50\sigma$

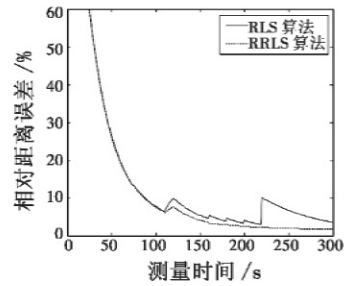


图 3 定位算法比较(方位角有异常误差)

Fig. 3 Comparison of locating algorithms with outliers in azimuth

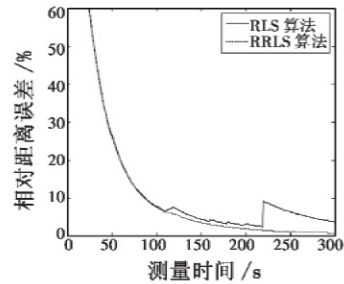


图 4 定位算法比较(俯仰角有异常误差)

Fig. 4 Comparison of locating algorithms with outliers in elevation

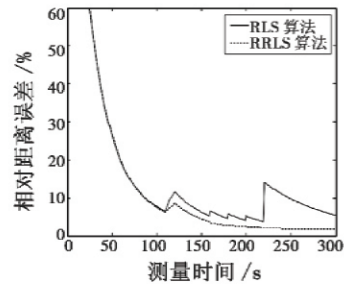


图 5 定位算法比较(同时有异常误差)

Fig. 5 Comparison of locating algorithms with outliers in azimuth and elevation

从图 3 ~ 图 5 结果分析可以看出,不论是方位角或俯仰角的观测数据存在何种异常误差,RRLS 算法都能够得到较好的定位结果,RLS 算法受异常误差影响较大,收敛速度变慢,而 RRLS 算法可以将大的异常误差数据剔除,同时对较小的异常误差进行降权处理,从而保证了定位结果的准确性。比较图 3 和图 4 可知,在相同的异常误差干扰下,RRLS 算法对俯仰角的抗差效果更好,几乎可以改善各种异常误差对定位精度的影响,能够得到相对准确的定位结果,而该算法不能完全去除方位角连续异常误差的影响,但通过降权也加

快了收敛速度。图 5 表明,方位角和俯仰角同时存在异常误差时,RRLS 算法的抗异常误差能力并未减弱,保证了定位结果的有效性和快速收敛。

## 5 结 论

本文提出了一种基于抗差估计的递推最小二乘算法,应用于机载单站三维无源定位。该算法将抗差估计结合最小二乘估计,通过识别并降低异常误差的权值,使定位模型有了抗异常误差的能力。理论推导和仿真实验都说明了 RRLS 算法能够有效抵抗异常误差的干扰,提供更为准确的定位结果。但最小二乘估计是有偏的,定位精度有限。因此,在鲁棒性较好的前提下提高定位算法的定位精度是下一步研究的侧重点。

### 参 考 文 献

- [1] 李望西,黄长强,王勇,等. 利用相位差变化率的机载无源定位跟踪改进算法[J]. 电子与信息学报,2013,35(1):68-73. (LI W X, HUANG C Q, WANG Y, et al. An improved airborne passive location & tracking algorithm using the rate-of-change of phase difference [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1):68-73. )
- [2] LI G, YANG S W, NIE Z P. Direction of arrival estimation in time modulated linear arrays with unidirectional phase center motion [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 28(4):1105-1111.
- [3] WANG X, HE Z S. Target motion analysis in three-sensor TDOA location system[J]. Information Technology Journal, 2011, 10(6):1150-1160.
- [4] DEMING R, SCHINDLER J, PERLOVSKY L. Multi-target/multi-sensor tracking using only range and Doppler measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2):593-611.
- [5] 马霞. 双站测向与测时差组合定位精度分析[J]. 指挥控制与仿真,2013,35(1):115-118. (MA X. Analysis of coordinated positioning accuracy of two passive radars [J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(1):115-118. )
- [6] 董哲,张晓敏,尤政. 基于最小二乘估计的卫星编队飞行轨道设计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(2):210-213. (DONG Z, ZHANG X M, YOU Z. Satellite formation flying orbit design based on least-squares estimates [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(2):210-213. )
- [7] 吴昊,陈树新,张衡阳,等. 基于递推最小二乘的单站无源定位仿真分析[J]. 火力与指挥控制,2013,38(6):19-22. (WU H, CHEN S X, ZHANG H Y, et al. Simulation and analysis of single observer passive location based on recursion least-squares [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(6):19-22. )
- [8] WANG D, ZHANG L, WU Y. Constrained total least squares algorithm for passive location based on bearing-only measurements [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2007, 50(4):576-586.
- [9] 吴顺华,辛勤,万建伟. 对卫星目标的仅测角天基单站无源定位可观测性分析[J]. 航空学报,2009,30(1):104-108. (WU S H, XIN Q, WAN J W. Observability analysis of bearings-only passive location for satellite target by spaceborne single observer [J]. Acta Astronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(1):104-108. )
- [10] CHEN J, MA T, CHEN W J. Unsupervised robust recursive least-squares algorithm for impulsive noise filtering [J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(4):1-10.
- [11] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社,2006. (YANG Y X. Adaptive navigation and kinematic positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006. )
- [12] 邓妍,戴冠中,慕德俊. 蠕虫感染率的抗差估计与最小二乘估计的比较分析[J]. 西北工业大学学报,2008,26(4):492-496. (DENG Y, DAI G Z, MU D J. Comparing robust estimator and least squares estimator in estimating worm infecting rate [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(4):492-496. )

欢 迎 踊 跃 投 稿

欢 迎 刊 登 广 告