

# 一种基于 Huber 函数的塔康方位稳健估计算法

陈坤, 田孝华, 何晶, 赵颖辉, 俞成

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

**摘要** 为抑制峰值检测器提取的塔康峰值包络中野值的影响, 提出了一种方位稳健估计算法。利用基于最大似然准则的 Huber 函数压缩大于门限的误差, 减小野值在算法中的权重。并采用双重门限对 Huber 函数作了改进, 消除较大野值的权重, 对较小的野值进行压缩, 给出了门限参数的选取依据。该方法不需要噪声的先验统计知识, 能有效抑制野值的影响。仿真结果表明: 所提算法的参数估计精度较传统的 Huber 估计器和最小二乘算法(Least Square)有明显提高, 在 3 dB 功率信噪比环境下, 估计误差小于  $0.5^\circ$ , 满足塔康系统要求。

**关键词** 峰值检测器; 最大似然准则; Huber 估计器; 最小二乘算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.005

**中图分类号** V249.32; TN911.7 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0018-05

## A Robust Estimation Algorithm of TACAN Azimuth Based on Huber Function

CHEN Kun, TIAN Xiao-hua, HE Jing, ZHAO Ying-hui, YU Cheng

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to suppress the influence from the outliers in the peak envelop extracted by peak detector, an azimuth estimation algorithm is proposed. The Huber function based on maximum likelihood criterion is utilized to suppress the error exceeding threshold and decrease the outliers' weight in the algorithm. Furthermore, double thresholds are adopted to improve Huber function, eliminate the bigger outliers' weight, compress the smaller weight and provide a basis for selecting the threshold parameters. This method does not need the statistics of noise, and can effectively suppress the influence of the outliers. Simulation results show that the accuracy of bearing parameter adopted by this algorithm is better than that of the ordinary Huber estimator and the least square algorithm. Under condition of the power SNR of 3 dB, the estimation error is less than  $0.5^\circ$  which meets the requirements of TACAN system.

**Key words:** peak detector; maximum likelihood criterion; Huber estimator; least square algorithm

塔康系统(TACTical Air Navigation, TANCAN)是最主要的飞机近程导航装备之一<sup>[1-2]</sup>, 主要为空中飞行目标提供方位和斜距导航信息, 实现飞机极坐标定位<sup>[3]</sup>。该系统采用脉冲调制技术, 即脉冲序列由旋转的九瓣心脏形天线发射, 在空中形成幅度受到 15 Hz 和 135 Hz 复合正弦包络调制的 PAM(Pulse Amplitude Modulation, PAM)射频信

号。模拟体制的测角方法是通过测量复合包络的正斜率过零点到主基准定时脉冲的时间差获得方位角度<sup>[4-5]</sup>。然而噪声和测量误差会引起包络信号正斜率过零点及脉冲包络半幅度点的偏差, 它将直接影响系统的测量精度<sup>[6]</sup>。文献[4]对检波后的包络信号采样, 采用最小二乘算法估计方位, 与传统寻找正斜率过零点的方法相比精度较高<sup>[6]</sup>。随着软件无线

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104056)

作者简介: 陈坤(1989-), 男, 四川罗江人, 硕士生, 主要从事导航信号处理研究。

E-mail: kunchen365@sina.com

电技术的发展,在“FPGA+DSP”架构上对塔康中频信号数字化,可以显著节省设备功耗、体积,同时提高可靠性<sup>[7-8]</sup>。通过数字化处理,文献[6]对峰值检测器<sup>[9]</sup>提取的包络信号采用 ILS 算法(Iterative Least Square, ILS)估计方位信息,精度高且易于实现,但在脉冲噪声环境下,峰值检测器提取的调制包络存在不服从包络分布趋势的点(野值),这将影响 LS 算法(Least Square, LS)的性能。为抑制包络信号中野值的影响,采用基于最大似然准则的 Huber 估计器稳健估计包络信号方位信息,并采用双重门限对 Huber 函数作出改进,进一步减小和抑制了野值影响。该方法不需要噪声的先验统计知识,能有效抑制野值的影响,提高方位参数估计精度。

### 1 塔康系统测角原理

塔康系统测角采用相位式全向信标原理,具体分为粗测和精测两部分。粗测是指塔康信标天线在水平面内以 15 周/s 的速率顺时针旋转心脏形方向图,见图 1(a),向周围空间依次发射脉冲信号。脉冲信号幅度受到正弦调制。在空间任一点观察,调制包络正弦规律相同,相位不同。为确定每一点的相位,塔康系统规定,当心脏形方向图的最大值旋转到地理位置正东方(相对磁北顺时针旋转 90°)时,地面信标必须发射主基准信号。方位测量时,均以主基准为时间基准,测量包络正斜率拐点滞后于主基准的相位差得到粗测角  $\phi_1$ ,见图 1(b)。精测指方向图每个“9 瓣”的最大值指向正东方时,天线发射辅基准信号,通过与 135 Hz 正弦包络信号比相得到的精测角  $\phi_2$ 。粗测得到的相位是飞机实际的磁方位角,但测量误差较大,精测的误差是粗测的 1/9,但具有多值性。塔康系统将粗测角和精测角的结果结合起来,避免出现多值性的同时提高测角精度。飞机方位角  $\phi$  由式(1)可得:

$$\phi = 40 \times \left\lfloor \frac{\hat{\phi}_1}{40} \right\rfloor + \frac{\hat{\phi}_2}{9} \quad (1)$$

式中“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”为向下取整运算。

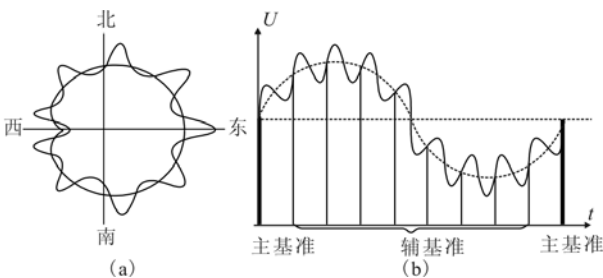


图 1 旋转的 9 瓣心脏形方向图及其辐射信号振幅

Fig. 1 Rotating heart-shaped directional pattern and transmitted signal amplitude

### 2 数学模型

以方位基准信号为起始点的视频脉冲信号表达式为:

$$s(t) = A_0 \left[ 1 + m_{15} \sin(2\pi f_{15} t - \phi_1) + m_{135} \sin(2\pi f_{135} t - \phi_2) \right] \sum_{i=0}^{\infty} G(t, t_i) \quad (2)$$

式中:  $G(t, t_i) = \delta(t - t_i) * G(t)$ ;  $A_0$  为信号幅度;  $m_{15}$  和  $m_{135}$  分别为 15 Hz 和 135 Hz 正弦包络信号调制度;  $f_{15} = 15$  Hz;  $f_{135} = 135$  Hz;  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为 15 Hz 和 135 Hz 分别正弦包络信号初相;  $G(t)$  为钟形脉冲对;  $t_i$  为脉冲到达时刻;  $\delta(t - t_i)$  是编码器输出脉冲列的任一脉冲,有一定宽度;  $G(t, t_i)$  是这些脉冲对经过特定变换得到的相应钟形脉冲对,这些脉冲编码包括主、辅基准群、距离回答脉冲、台站识别脉冲和随机填充脉冲。

机载设备接收到的视频信号为:

$$x(t) = s(t) + n(t) + i(t) \quad (3)$$

式中:  $n(t)$  为零均值高斯白噪声;  $i(t)$  是脉冲噪声。式(3)的离散形式可以表示为:

$$x(k) = s(k) + n(k) + i(k) \quad (4)$$

$$s(k) = A_0 \left[ 1 + m_{15} \sin(2\pi f_{15} kT - \phi_1) + m_{135} \sin(2\pi f_{135} kT - \phi_2) \right] \sum_{i=0}^{\infty} G(kT, t_i), k=0, 1, \dots \quad (5)$$

式中:  $T=1/f_s$ ,  $f_s$  为采样率。

### 3 包络检测

#### 3.1 峰值检测

峰值检测器是一种有效检测脉冲调幅信号包络的方法,其算法流程见图 2。检测出的包络局部图见图 3。

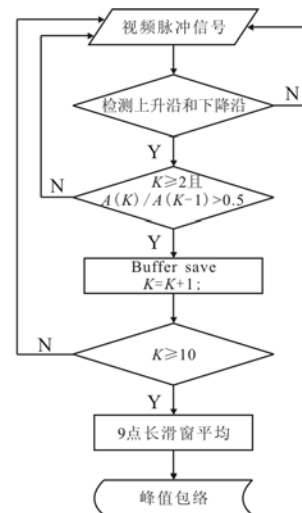


图 2 峰值检测

Fig. 2 Peak detection flow diagram

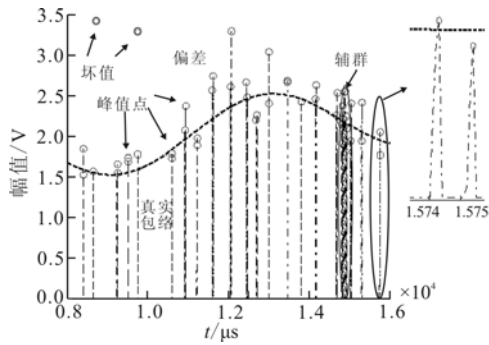


图3 局部脉冲峰值示意图

Fig. 3 Pulse peaks schematic diagram

峰值检测器通过检测上升沿到下降沿的变化捕获峰值点,如果该峰值点幅度大于前一峰值点幅度的一半,则存储该峰值点。再对存储的峰值点通过9点长的滑窗作平均。通过滑窗作平均能有效抑制噪声的影响,使包络更加平滑。由于塔康信号中存在大量的随机填充脉冲,搜索出的脉冲峰值具有随机性(峰值间隔具有随机性),可以看作是非均匀采样问题。由于存在高斯噪声和脉冲噪声,搜索出来的峰值带有误差且含有野值,这将影响LS算法的性能。

### 3.2 Huber 函数

为了提高在复杂噪声环境下方位估计算法的稳健性,需要一种对较大的偏差值具有包容能力的稳健估计函数。Huber估计函数就是为了这样一种应用背景下提出的<sup>[10]</sup>。

包络信号中第*i*个峰值点 $x_i$ 可以表示为:

$$x_i = A_0 [1 + m_{15} \sin(k_i T_{15} - \phi_1) + m_{135} \sin(k_i T_{135} - \phi_2)] + \delta_i \quad (6)$$

式中:  $T_{15} = 2\pi f_{15} T$ ;  $T_{135} = 2\pi f_{135} T$ ;  $k_i$  表示第*i*个峰值点的位置;  $\delta_i$  为偏差;  $A_0$ 、 $m_{15}$ 、 $m_{135}$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  是未知参量。将式(6)写成如下形式:

$$x_i = A_0 + A_1 \sin(k_i T_{15}) + A_2 \cos(k_i T_{15}) + A_3 \sin(k_i T_{135}) + A_4 \cos(k_i T_{135}) + \delta_i \quad (7)$$

式中:  $A_1 = A_0 m_{15} \cos \phi_1$ ;  $A_2 = -A_0 m_{15} \sin \phi_1$ ;  $A_3 = A_0 m_{135} \cos \phi_2$ ;  $A_4 = -A_0 m_{135} \sin \phi_2$ 。

记一个周期内搜索到的峰值点数为*N*,则观测到的数据可以表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\delta} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{X} (N \times 1)$  是一周内搜索到的峰值点;  $\boldsymbol{\theta} = [A_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4]^T$ ;  $\boldsymbol{\delta} (N \times 1)$  是对应的偏差;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(k_1 T_{15}) & \cos(k_1 T_{15}) & \sin(k_1 T_{135}) & \cos(k_1 T_{135}) \\ 1 & \sin(k_2 T_{15}) & \cos(k_2 T_{15}) & \sin(k_2 T_{135}) & \cos(k_2 T_{135}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 1 & \sin(k_N T_{15}) & \cos(k_N T_{15}) & \sin(k_N T_{135}) & \cos(k_N T_{135}) \end{bmatrix}$$

建立目标方程:

$$\min \sum_{i=1}^N \rho(e_i / \sigma_i) \quad (9)$$

式中:  $e_i = x_i - \mathbf{h}_i^T \boldsymbol{\theta}$ ,  $\mathbf{h}_i$  是  $\mathbf{H}$  的第*i*行向量,  $\sigma_i$  是  $e_i$  的权重,通常用其跟中位数的距离的中位数来表示。Huber函数  $\rho(e)$  和 Score Function  $\psi(e) = \partial \rho / \partial e$  如下式所示<sup>[12]</sup>:

$$\rho(e) = \begin{cases} e^2/2, & |e| \leq b \\ b|e| - b^2/2, & |e| > b \end{cases} \quad (10)$$

$$\psi(e) = \begin{cases} e, & |e| \leq b \\ b \operatorname{sgn}(e), & |e| > b \end{cases} \quad (11)$$

定义权重函数:

$$q(e) = \frac{\psi(e)}{e} = \begin{cases} 1, & |e| \leq b \\ b \operatorname{sgn}(e)/e, & |e| > b \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\operatorname{sgn}(\cdot)$  是符号函数;  $b$  为门限值。当残差  $|e| \leq b$  时,  $\rho(e)$  是一个严格的凸函数, Huber估计器退化为LS估计器;当残差  $|e| > b$  时,观测数据会被压缩,减小野值影响。但是Huber函数对野值压缩程度有限<sup>[12]</sup>,在需要更稳健估计的环境中,Huber函数效果欠佳。如今电磁环境日益复杂,噪声干扰严重,有必要对Huber函数作出改进。

### 3.3 改进的 Huber 函数

为了进一步压缩野值,减弱其影响,达到更加稳健的效果。对函数  $\rho(\cdot)$  和  $\psi(\cdot)$  改进如下:

$$\rho(e) = \begin{cases} e^2/2, & |e| \leq \xi_1 \\ \xi_1 \ln|e| - \xi_1 \ln \xi_1, & \xi_1 < |e| \leq \xi_2 \\ \xi_2^2, & |e| > \xi_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\psi(e) = \begin{cases} e, & |e| \leq \xi_1 \\ \frac{\xi_1}{|e|} \operatorname{sgn}(e), & \xi_1 < |e| \leq \xi_2 \\ 0, & |e| > \xi_2 \end{cases} \quad (14)$$

权重函数  $q(e)$  可写为:

$$q(e) = \begin{cases} 1, & |e| \leq \xi_1 \\ -\frac{\xi_1}{e^2} \operatorname{sgn}(e), & \xi_1 < |e| \leq \xi_2 \\ 0, & |e| > \xi_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  是门限值。当残差  $\xi_1 < |e| \leq \xi_2$  时,相比于原Huber函数将会赋予更小的权值;当  $|e| > \xi_2$  时,将其剔除,避免大的野值影响估计性能。目标函数的等价形式是寻找满足式(16)的最优权值  $\boldsymbol{\theta}$ 。

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial \rho[e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i]}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i^T \psi[e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i] = 0 \quad (16)$$

将  $\psi(e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i) = q(e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i) e_i(\boldsymbol{\theta})$  代入式(16):

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i^T (x_i - \mathbf{h}_i^T \boldsymbol{\theta}) q(e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i) = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i^T q(e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i) x_i = \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i^T q(e_i(\boldsymbol{\theta})/\sigma_i) \mathbf{h}_i \boldsymbol{\theta} \quad (18)$$

写成矩阵形式:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} = \mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H} \boldsymbol{\theta} \quad (19)$$

式中:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q(e_1/\sigma_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q(e_2/\sigma_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q(e_n/\sigma_n) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$\mathbf{Q}$  为加权矩阵,通过式(20)可得到  $\boldsymbol{\theta}$  的估计式:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (21)$$

$\sigma_i$  表示残差  $e_i$  的权重,最优的选取是取噪声统计特性的方差。因噪声分布未知,为便于工程实现,选取  $\sigma_i = \sigma$ ,  $\sigma$  的估计方法为:用 LS 估计器估计出残差  $e$ ,用残差的平方与其中位数的距离的中位数表示。即<sup>[13]</sup>:

$$\hat{\sigma} = 1.483 \text{med}_j \{ |e_j - \text{med}_k \{e_k^2\}| \} \quad (22)$$

式中  $\text{med}(\cdot)$  表示取中值运算。

Huber 最大似然估计器能够较大幅度的压缩野值的影响,而参数  $\xi_1, \xi_2$  则是控制对野值的压缩程度。门限  $\xi_1, \xi_2$  的选取是影响估计器性能的重要因素。尽管误差  $e$  的分布未知,为简单起见,在不考虑脉冲噪声的影响,仍然假设误差  $e$  分布服从高斯分布<sup>[14]</sup>。有:

$$\theta_T(n) = \Pr\{|e(n)| > T\} = \text{erfc}(T/(\sqrt{2}\sigma)) \quad (23)$$

式中:  $\text{erfc}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_x^\infty e^{-x^2} dx$  为误差函数;  $\sigma$  为式(22)估计出的标准差。通过选取不同的  $\theta_T(n)$ ,可以得到相应的门限  $T$ 。令  $\theta_{\xi_1} \triangleq \Pr\{|e(n)| > \xi_1\}$ ,  $\theta_{\xi_2} \triangleq \Pr\{|e(n)| > \xi_2\}$ , 本文分别取  $\theta_{\xi_1} = 0.05$ ,  $\theta_{\xi_2} = 0.01$ , 即分别以 95% 的置信度使残差落入区间  $[\xi_1, \xi_2]$  和 99% 的置信度当残差  $|e| > b$  时将其剔除。由式(23)可解得  $\xi_1 = 1.96\sigma$ ,  $\xi_2 = 2.24\sigma$ 。

## 4 算法验证

为验证上述算法的有效性,本文利用 Matlab 仿真验证,并对结果进行分析。塔康信号是主群信号为时间起始点的,幅度受正弦包络调制的脉冲信号,其包络信号参数设置见表 1。噪声环境是方差未知的零均值高斯白噪声和脉冲噪声。脉冲噪声的产生语句如下:

$$i = 3 \text{randsrc}(1, N, [0 \ 1; 1-p \ p]) \quad (24)$$

式中:  $N$  是一周期的数组长度,  $p = 0.01$ , 利用式(24)使信号中含有 1% 的脉冲噪声。

表 1 塔康信号参数

Tab. 1 TACAN signal parameter settings

直流分量	$A_0 = 2 \ v$
15 Hz 信号初相	$\phi_1 = \pi/3 \text{ rad}$
15 Hz 信号调制度	$m_{15} = 0.2$
135 Hz 信号初相	$\phi_2 = \pi \text{ rad}$
135 Hz 信号调制度	$m_{135} = 0.2$
中频脉冲信号采样频率	$f_s = 1 \text{ MHz}$

6 dB 功率信噪比环境下,一个周期的塔康视频脉冲见图 4,起始信号为主基准脉冲信号,每间隔 7 400  $\mu\text{s}$  为辅基准脉冲,中间随机填充脉冲。经过峰值检测器提取的调制包络见图 5。受噪声影响,峰值检测算法搜索的峰值点存在野值,包络中含有毛刺。信噪比越低,峰值检测算法检测的野值越多。为检验所提算法的有效性,在 3~13 dB 功率信噪比环境下,与 LS 估计器和 Huber 估计器估计包络方位参数作对比。估计误差见图 6。LS 估计器是拟合的曲线到包络的距离平方和最小,野值严重偏离包络,拟合过程中野值距离远,权重大,影响算法性能,估计误差较大。Huber 估计器以一定置信度检测野值,通过减小权重减小野值的影响,方位参数估计精度有所提高。通过改进 Huber 函数以一定概率剔除野值,对  $\xi_1 < |e| \leq \xi_2$  的距离加权压缩,能更最大限度的抑制噪声影响,减小误差,在 SNR = 3 dB 的信噪比环境下使误差小于 0.5°。

定义估计方差:

$$\hat{\sigma}_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\phi}_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\phi}_i)^2 \quad (25)$$

估计方差曲线见图 7,改进的 Huber 估计器剔除了部分野值,加大了压缩程度,同信噪比下方差最小,随着信噪比增加,算法主要受脉冲噪声的影响,方差逐渐减小。从图中可以看出,该进的估计算法具有很好的稳健性。当信噪比 SNR > 10 dB 时,3 种算法的方差都小,性能稳定。

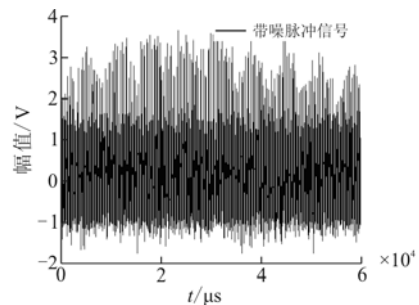


图 4 视频脉冲信号

Fig. 4 Video impulse signal

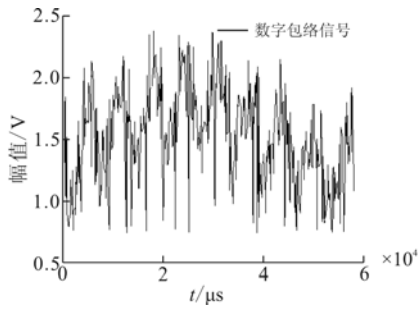


图5 数字包络信号

Fig. 5 Digital envelop signal

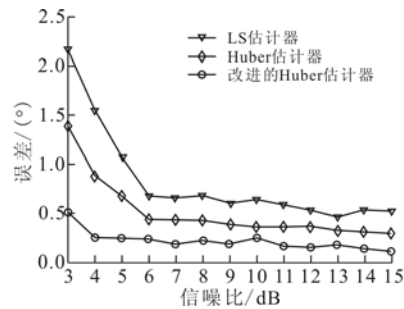


图6 不同功率信噪比下误差曲线

Fig. 6 Error curves in different SNR settings

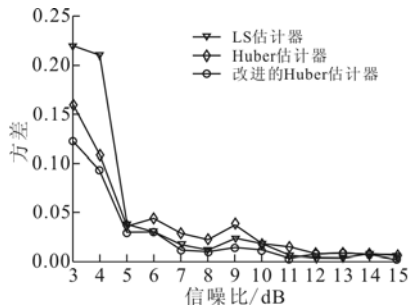


图7 不同功率信噪比下方差曲线

Fig. 7 Variance curves in different SNR settings

## 5 结语

本文提出一种改进的 Huber 估计算法用于稳健估计脉冲噪声环境下塔康信号的方位信息。该方法不需要噪声的先验统计知识,能有效抑制坏值的影响,提高方位参数估计精度。在 SNR=3 dB 的信噪比环境下,参数估计误差小于 0.5°,满足塔康系统的要求。与传统的 Huber 估计器和 LS 估计器相比,该算法有效地提高了参数估计精度。

### 参考文献(References):

- [1] Edward J Chrestopher. Electronically scanned TACAN antenna[J]. IEEE trans antennas propagation, 1974, 22(1): 12-16.
- [2] SHESTAG L N. A cylindrical array for the TACAN system [J]. IEEE trans antennas propagation, 1974, 22(1): 17-25.
- [3] 张忠兴, 李晓明, 张景伟, 等. 无线电导航理论与系统[M]. 西

安; 陕西科学技术出版社, 1998.

ZHANG Zhongxing, LI Xiaoming, ZHANG Jingwei, et al. Radio Navigation Theory and System[M]. Xi'an; Shaanxi technology press, 1998. (in Chinese)

- [4] 王维康, 张斌, 李睿, 等. 塔康系统输出参数的精确测量方法研究[J]. 光电与控制, 2010, 17(7): 78-83.
- WANG Weikang, ZHANG Bin, LI Rui, et al. Accurate measurement of TACAN output parameters[J]. 2010, 17(7): 78-83. (in Chinese)
- [5] 张浩杰, 李晓明, 裴文林. 基于中频数字化技术的塔康测角方法研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(4): 67-71.
- ZHANG Haojie, LI Xiaoming, PEI Wenlin. Angle measuring of TACAN based on IF digital technique[J]. Modern defence technology, 2012, 40(3): 67-71. (in Chinese)
- [6] 陈坤, 田孝华, 赵颖辉, 等. 基于最小二乘迭代算法精确估计塔康方位参数[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 4176-4180.
- CHEN Kun, TIAN Xiaohua, ZHAO Yinghui, et al. Accurate estimation for TACAN azimuth based on iterative least square algorithm [J]. Science technology and engineering, 2013, 13(15): 4176-4180. (in Chinese)
- [7] 张国祥, 郭英, 霍文俊, 等. 基于 Kalman 滤波的塔康方位精确解算方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(2): 76-83.
- ZHANG Guoxiang, GUO Ying, HUO Wenjun, et al. Accurate calculating method of TACAN bearing signal based on kalman filtering[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(2): 76-83. (in Chinese)
- [8] 龚成, 郭英, 齐子森. 塔康导航系统机载中频信号数字化技术[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(5): 29-31.
- GONG Cheng, GUO Ying, QI Zisen. Digital, implement technology of TACAN IF signal[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2008, 9(5): 29-32. (in Chinese)
- [9] Lee J Y, Kim J K, Yoon G. A digital envelope detection for blood pressure measure[C]//2001 proceeding of the 23rd annual EMBS international conference. Istanbul, Turkey: [s. n.], 2001: 226-228.
- [10] Paul Petrus. Robust huber adaptive filter[J]. IEEE trans on signal processing, 1999, 47(4): 1129-1133.
- [11] 孙国林, 郭伟. 一种新的非视距环境下移动台定位算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 232-234.
- SUN Guolin, GUO Wei. Novel positioning algorithm for mobile station under non-line-of-sight environments [J]. Systems engineering and electronics, 2005, 27(2): 232-234. (in Chinese)
- [12] Zhou Y, Chan S C, Ho K L. New sequential partial Update least mean m-estimate algorithms for robust adaptive system identification in impulsive noise[J]. IEEE trans on industrial electronics, 2011, 58(9): 4455-4470.
- [13] Zou Y, Chan S C, Ng T S. A robust M-estimate adaptive filter for impulse noise suppression [C]//ICASSP' 99. Phoenix, AZ: IEEE press, 1999: 1765-1768.
- [14] Zou Yuexian, Chan Shing-Chow, TungSang Ng. Least mean M-estimate algorithms for robust adaptive filtering in impulse noise [J]. IEEE trans on signal processing, 2000, 47(12): 1564-1569.

(编辑: 徐楠楠)