

LMS 预处理的相位差机载单站无源定位方法

邢怀玺, 吴 华, 陈 游[✉]

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对机载单站无源定位精度受限于参数测量误差的实际问题, 提出一种改善相位差误差下的网格搜索无源定位方法。首先采用 LMS 自适应滤波算法对相位差信息进行滤波处理, 然后根据定位模型利用观测的相位差建立定位方程, 最后通过网格搜索法解算辐射源目标位置。该方法可以在相位差测量误差较大情况下实现对辐射源目标的精确定位。仿真实验结果表明, 滤波处理后的相位差误差可以减小到 0.14 rad 以下, 而且定位结果优于文献[17]的方法。通过分析定位误差, 表明相位差误差在 10° 范围内, 增大网格分辨率和延长观测时间可以提高定位精度, 同时也进一步验证了获取高精度相位差信息的必要性。

关键词 无源定位; 相位差; LMS 自适应滤波; 网格搜索

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.002

中图分类号 V24; TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)05-0009-06

A Phase Difference Airborne Single-Station Passive Location Method Based on LMS Preprocessing

XING Huaixi, WU Hua, CHEN You[✉]

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aimed at the practical problem that the accuracy of air airborne single station passive location is limited by the error of parameter measurement, this paper presents a grid search passive location method to improve the error of phase difference. Firstly, the phase difference information is filtered out by LMS adaptive filtering, and then the positioning equation is established by using the observed phase difference according to the positioning model. Finally, the location of the radiation source target is solved by the grid search method. The target of radiation source can be located at by the method accurately under the condition of large phase difference measurement error. The simulation results show that the phase difference error filtered can be reduced to less than 0.14rad, and the positioning result is better than that of reference [17]. The positioning error is shown that within 10 degrees at the phase error, increasing the mesh resolution and extending the observation time can improve the positioning accuracy, and can verify further the necessity to obtain the accuracy, and to obtain the accurate phase difference information simultaneously.

Key words: passive location; phase difference; LMS adaptive filtering; grid search

机载单站无源定位技术目标探测、定位跟踪和 远距离精确打击已成为机载武器系统的一个重要的

收稿日期: 2019-07-24

作者简介: 邢怀玺(1996—), 男, 山东滨州人, 硕士生, 主要从事信息对抗理论与技术研究。E-mail: 826476643@qq.com

通信作者: 陈 游(1983—), 男, 湖南岳阳人, 讲师, 博士(后), 主要从事信息对抗理论与技术研究。E-mail: chenyouisky@163.com

引用格式: 邢怀玺, 吴华, 陈游. LMS 预处理的相位差机载单站无源定位方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 9-14.
XING Huaixi, WU Hua, CHEN You. A Phase Difference Airborne Single-Station Passive Location Method Based on LMS Preprocessing[J].
Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 9-14.

发展方向,对于提高飞机的突防能力、生存能力和隐蔽攻击能力都有重要的现实意义,因此一直是无源定位领域研究的重点^[1-3]。目前研究的定位问题大多是利用获取的定位参数建立目标与载机的约束关系,然后通过一定的方法求解目标位置。基于相位差信息目标定位能够很好地克服传统测向精度低,收敛时间长的问题,然而,机载测量设备提供的相位差测量误差大,初始参数测量误差会引起定位效果差,结果不稳定的问题^[4]。

由于利用相位差信息定位需要积累一段时间观测信息建立载机与同一位置目标之间的位置约束关系,很难实现对动目标的定位,所以本文只讨论对地面固定辐射源的定位方法。结合空中运动的载机观测平台对地面远距离固定辐射源目标定位的特定应用背景。本文提出一种定位方法,首先采用 LMS 自适应滤波算法^[5-8]对观测平台测量得到的相位差信息进行实时预处理,获取符合误差允许范围的相位差数据,然后建立定位方程,最后引入网格搜索法^[9-10]寻优搜索目标辐射源的位置。对相位差信息的 LMS 自适应滤波处理,不仅能够有效地滤除测量噪声,达到定位参数精度要求,而且收敛速度快,可以时变跟踪相位差的变化;而对于目标位置的解算,网格搜索法克服了批处理和迭代方法^[11-13]运算复杂度高,对初始值依赖性强的固有缺陷,通过遍历搜索直接解算目标位置,这种方法能够很容易地实现目标的有效定位,而且计算简单,利于工程实现。

1 基于相位差的无源定位模型

1.1 定位的几何原理

实际情况下,载机对地面固定辐射源进行无源定位时,通常两者距离相距较远,载机的飞行高度远小于载机与辐射源间的距离,因此为了简化模型可以近似为二维定位问题。见图 1。

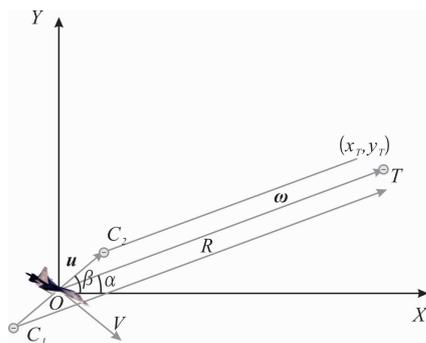


图 1 干涉仪接收辐射源信号示意图

在二维直角坐标系中,目标辐射源位于 (x_T, y_T) , C_1 与 C_2 构成的干涉仪基线长度为 d ,基线矢

量方向为 C_2C_1 指向,用 u 表示。假设干涉仪垂直于机身放置,载机位于二维直角坐标系的原点 O ,载机与辐射源距离为 R , ω 为接收目标辐射电磁波的方向矢量, λ 为辐射源信号波长, v 为载机速度矢量,其大小为 v 。

1.2 定位方程

假设载机沿着 x 轴匀速直线飞行,飞机的位置信息与航姿信息由惯导系统或 GPS 提供,载机在 k 时刻的位置状态为 $\mathbf{X}_{Ok} = [x_{Ok}, y_{Ok}]^T$,目标辐射源 T 的位置状态为 $\mathbf{X}_T = [x_T, y_T]^T$,二者之间的径向距离为 R ,相对方位角为 α ,基线方向角为 β 。则两者在 k 时刻的相对位置矢量为 $\mathbf{X}_T - \mathbf{X}_{Ok} = [x_k, y_k]^T$ 。一般而言,天线固定安装在观测平台上,平台自身的机动即天线组成的干涉仪的机动。

由几何关系和运动学原理可知:

$$\alpha_k = \arctan\left(\frac{y_k}{x_k}\right) = \arctan\left(\frac{y_T - y_{Ok}}{x_T - x_{Ok}}\right) \quad (1)$$

干涉仪接收的信号波前满足远场近似条件,由相位差定位的几何关系可知,相位差表达式转换到直角坐标系中可得观测量表达式,在 k 时刻接收目标辐射波的相位差为:

$$\varphi_k = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\beta_k - \alpha_k) \quad (2)$$

式中: β_k, α_k 表示 k 时刻干涉仪基线方向角和目标相对于载机的方位角; λ 为辐射源信号波长, $\lambda = c/f_T$, c 为光速, f_T 为辐射源信号频率。

式(2)确定了一条等相位差曲线,称为定位线,也称为单次观测的定位线方程,反映了观测量对目标位置的约束关系。

工程实际中,为了提高参数测量的精确度,一般都增大天线间的间距,选取较长的干涉仪基线进行测量,所以相位差测量模糊的问题无法避免^[14-15]。采用一定的方法,可对相位差数据进行有效解模糊,进而得到无模糊的相位差数据^[15]。

1.3 定位过程

本文的定位过程如图 2 所示,在二维平面中。天线固定安装在载机的机翼两侧位置,目标的位置 $P = (x_T, y_T)$ 。以开始观测时载机的位置为坐标原点,载机相对于辐射源作匀速直线运动,由于天线是固定的,所以在整个运动过程中,天线的相对位置不变。在整个观测时间内,不同时刻载机与辐射源的相对位置发生变化,导致观测量对目标位置的约束关系发生变化,每个时刻确定一条等相位差曲线,与测向不同的是,由于目标定位的复杂性,所以需要多个观测点,得到一组目标真实相位差曲线作为参考曲线,从而实现对目标的定位^[16]。

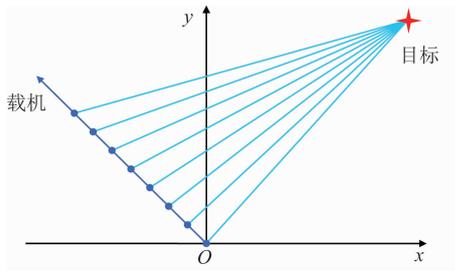


图 2 定位模型平面图

载机运动过程中惯导提供载机不同时刻的位置信息,通过对不同时刻辐射源信号相位差的测量,在一定的观测时间内得到载机不同位置状态下的一组相位差观测序列。首先,在获取目标大概方向的基础上,机载运动平台相对于目标作侧飞运动获得多个航迹点相位差的观测曲线;然后,对相位差数据解模糊得到无模糊的相位差数据;接着计算出相位差真实曲线,并作为参考曲线;最后,确定辐射源位置的搜索范围,对比不同位置的真实相位差曲线与参考曲线,其中最接近参考曲线的相位差曲线对应的位置即为辐射源的位置。

实现对目标的准确定位,减少定位误差需要高精度的相位差数据,然而在实际工程应用中,现有的测量设备通常会面临两大难题:一是存在相位差模糊,二是测量所得相位差误差很大,势必影响最终定位精度,前者可以通过解模糊方法来解决,而对于后者,本文采用 LMS 自适应滤波的方法对相位差信息进行滤波处理。以解模糊后的相位差数据作为输入值,对输入数据进行平滑,减弱测量噪声的影响,提高相位差数据的估计精度,最终达到提升定位性能的目的。

2 相位差预处理

Step 1 初始化设置滤波器权值 \mathbf{W} 为任意值,然后相位差观测量作以下各步的循环运算;

Step 2 计算滤波器输出的相位差:

$$y(n) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{X}(n) \quad (3)$$

Step 3 计算相位差估计误差:

$$e(n) = \varphi_h(n) - y(n) \quad (4)$$

Step 4 更新 N 个滤波器权重系数:

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\mu e(n) \mathbf{X}(n) \quad (5)$$

Step 5 循环返回到 Step 2。

$\mathbf{W}(n)$ 为抽头权向量; $e(n)$ 为滤波器在 n 时刻的估计误差; μ 为步长因子; $\varphi_h(n)$ 为解模糊后的真实相位差,当真实相位差未知时,可直接用滤波器的实际输出 $y(n)$ 代替 $\varphi_h(n)$; $\mathbf{X}(n)$ 为输入相位差信息,通过循环运算, $\mathbf{W}(n)$ 逐渐逼近真实相位差。

取 $\mu=0.01$, 滤波器阶数为 32 阶,输入的解模

糊相位差数据误差方差为 30° , 对其进行滤波,滤波结果见图 3~4。

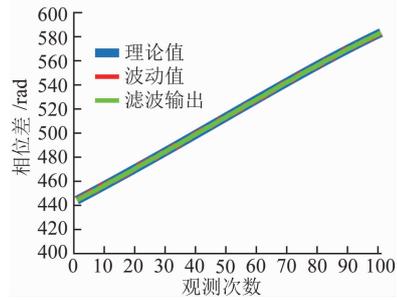


图 3 滤波前后相位差

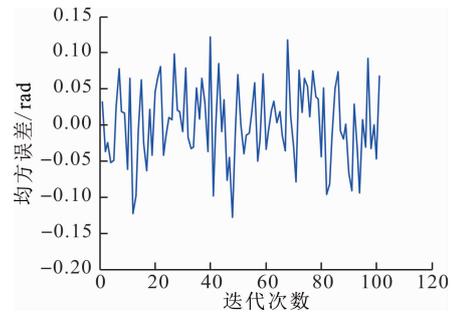


图 4 滤波输出误差

通过滤波结果可以看出,采用 LMS 算法有明显的降噪效果,滤波后的均方误差小于 8° ,能够在很大程度上缩小相位差观测误差。

3 基于网格搜索的定位模型

3.1 网格模型

对于上述定位原理,在载机对地面固定目标侦察定位的场景下,本文定位解算的思路如下:积累对目标的观测数据。经过粗定位得到目标的大致方向和距离后,视以该位置为中心的附近区域为目标可能存在的区域,将该区域进行网格划分。遍历整个网格,利用辐射源位置与网格划分节点坐标计算对应的真实相位差数据。建立代价函数比较网格点的相位差数据与观测数据之间的偏差,遍历寻优得到使代价函数最小的最终定位点。

3.2 代价函数建立

运用网格搜索法等搜索算法时,必须先确定问题的代价函数,然后才能根据代价函数值大小在网格中搜索出符合要求的最优坐标点。代价函数选取的好坏会直接影响定位精度的高低。因此,首先构建出基于相位差信息的机载无源定位的代价函数。

本文的定位模型,实现一次搜索定位的前提是载机在运动状态下至少获得 2 次观测数据,采用积累一定数量的观测数据方式,充分利用观测数据的信息量进行定位解算,在满足一次定位的必要条件同时又抑制了测量时的误差随机性,产生了中心极

限定定理的效果,使最终定位的结果更加准确。

载机运动条件下,记录并存储不同时刻平台位置信息,在一定观测时间内积累测量相位差序列。将粗定位得到的定位点作为搜索区域中心,并将搜索区域网格化。遍历网格点计算相应的相位差数据,与滤波处理的相位差观测数据作残差积累,取一定观测时间的均方误差作为代价函数:

$$J = \sum_{k=1}^n (\varphi(t_k) - \varphi_T(t_k))^2 \quad (6)$$

式中: $\varphi(t_k)$ 为 t_k 时刻载机自身位置对应某一网格点的相位差; $\varphi_T(t_k)$ 为 t_k 时刻载机自身位置对应目标辐射源真实位置的相位差。

3.3 基于相位差的无源定位方法

1)提取相位差。载机在运动过程中实时观测相位差,并对其进行解模糊。

2)调整滤波参数。根据观测时间调整 LMS 自适应滤波器阶数、步长。

3)相位差信息滤波处理。LMS 自适应滤波实时输出理论相位差数据 $\varphi_T(t_k)$ 。

4)确定定位区域。将以辐射源初始定位点 X_0 为中心的 $2S \times 2S$ 的方形区域作为搜索区域。

5)划分网格点。每个维度均匀划分成 M 个网格点,整个区域划分成 $M \times M$ 个网格,得到每次观测辐射源 M^2 个候选位置表示为 (X_i, Y_j) 。则每个网格的坐标为:

$$X_i = X_{\min} + i(X_{\max} - X_{\min})/M \quad (7)$$

$$Y_j = Y_{\min} + j(Y_{\max} - Y_{\min})/M \quad (8)$$

6)计算理论相位差。利用在 0 到 t 观测时间段内载机惯导系统提供的位置信息,计算全部网格点的理论相位差 $\varphi_{ij}(t_k)$, $\varphi_{ij}(t_k)$ 表示候选位置 (X_i, Y_j) 在 t_k 时刻对应的相位差。

7)计算代价值。将候选网格点的理论相位差数据和观测积累的相位差序列代入代价函数进行评估,代价函数如式(9)所示。

$$J_{ij} = \sum_{k=1}^n (\varphi_{ij}(t_k) - \varphi_T(t_k))^2, i = 1, 2, \dots, M, \\ j = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

8)寻优搜索最佳定位点。在 M^2 个候选网格点中遍历寻找代价值最小的候选点,作为最终确定的最佳定位点。表达式如下:

$$\arg \min(J_{ij} \ i=1,2,\dots,M, j=1,2,\dots,M) = \\ \min(\arg(J_{ij} \ i=1,2,\dots,M, j=1,2,\dots,M)) \quad (10)$$

4 仿真分析

4.1 仿真对比

为了验证本文设计的定位模型能有效提高定位

精度,通过仿真模拟定位场景,利用本文方法对固定辐射源目标进行定位。

仿真条件:仿真场景为二维平面内载机对固定辐射源目标定位,载频为 3 GHz,载机作匀速直线运动,速度为 300 m/s,目标为地面固定辐射源;平台与目标径向距离约为 156 km,观测时间为 20 s,采样时间 $T_s = 1$ s,相位差随机误差为 20° ,服从高斯分布;设置滤波器阶数为 32,步长因子 $\mu = 0.01$;搜索范围 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$,网格划分 $M = 40$ 。

在该场景下进行 50 次蒙特卡罗实验,采用网格搜索法的定位。目标真实位置(120 km, 100 km),网格搜索定位均值(120.6 km, 100.7 km)均方误差 0.505 km。结果见图 5。

从图 5 可以看出,网格搜索法在一定误差范围内能够实现对目标辐射源的定位,另外,该算法求解的结果接近真实值,不会出现发散现象。应指出的是,图 5 中计算结果点位的分布也受到网格搜索法最小网格分辨率的影响,因而明显可见部分点位规则地排列在网格上,部分定位点也会出现重合。

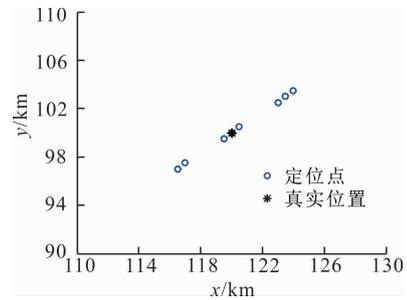


图 5 定位结果示意图

文献[17]在利用相位差信息对目标定位的基础上,采用粒子群改进算法对目标搜索定位。在上述仿真条件下,改变观测相位差误差,通过 50 次蒙特卡罗仿真实验,将本文定位方法和直接网格搜索定位、文献[17]定位方法作对比,得到不同误差下的定位性能,见表 1。从结果可以看出,本文方法能够更好地克服不同的相位差误差对定位精度带来的影响,定位的平均径向距离误差稳定在 1 km 以内,表明本文定位方法优于其他 2 种方法。

表 1 不同误差的定位性能 单位: km

方法	相位差误差		
	10°	20°	30°
直接定位	1.27	1.35	1.45
文献[17]	1.25	1.36	1.42
本文方法	0.90	0.92	0.93

4.2 定位误差分析

4.2.1 网格分辨率对定位精度的影响

在仿真过程中,我们采用 2 种方法来表示搜索

点与真实位置的接近程度。方法 1 是:对比所有观测点(M1);方法 2 是:对比首尾 2 个观测点(M2)。图 6 分别是网格分辨率大小对 x 方向, y 方向, 径向定位误差 R 的影响。

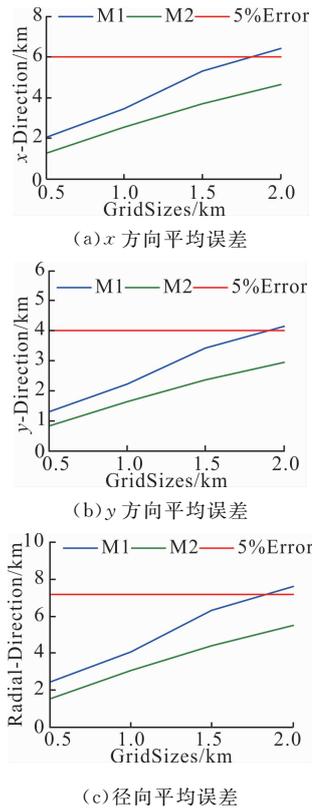


图 6 网格间隔对定位精度的影响

从图中可以看到:以 5% 的距离误差作为衡量定位是否准确的标准,当其他参数固定时,网格间隔越小,平均定位误差越小,且 M2 明显优于 M1。

4.2.2 相位差误差对定位精度的影响

本文的定位模型,对相位差误差最为敏感,要求也最高。相位差误差必须在较小的范围内,才能保证一定的定位精度,见图 7。

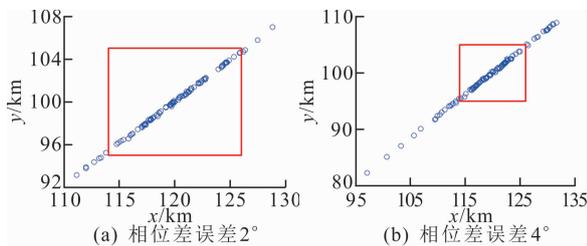


图 7 相位差误差对定位精度的影响

如图 7 所示,在观测时间为 20 s 时,图 7(a)中,相位差误差为 2° , 绝大多数的目标估计满足 $5\%R$ 的误差,极少数会超过 $5\%R$ 的误差,多次试验得到的定位点比较集中。图 7(b)中,相位差误差为 4° , 相比于图 7(a), 虽然仍有大多数的定位点满足 $5\%R$ 的误差,但超过 $5\%R$ 的误差的目标估计也很多。显然相位差误差对定位结果影响明显,相位差误差越小,定位精度越高。

4.2.3 观测时间对定位精度的影响

通过仿真得到了不同观测时间下定位结果如图 8、图 9 所示辐射源的真实位置(120 km, 80 km)。其中蓝色表示 M1,绿色表示 M2。当相位差误差设为 3° 时,定位结果见图 8。

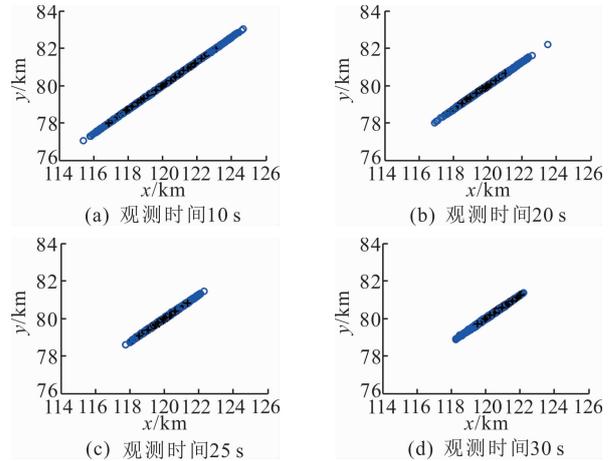


图 8 相位差误差 3° 时观测时间对定位精度的影响

当相位差误差为 13° 时,定位结果见图 9。

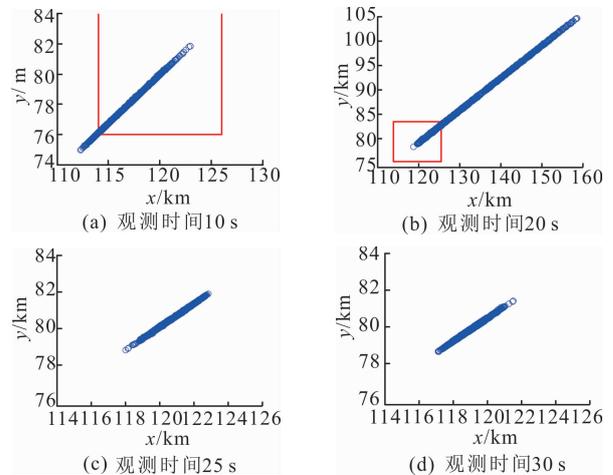


图 9 相位差误差 13° 时观测时间对定位精度的影响

仿真结果可知,当相位差误差为 3° 时,随着观测时间延长时,定位精度会更高。当误差增大到 13° 时,定位波动范围不稳定,且观测时间延长并不会提高定位精度。图 9 中,20 s 观测时间的定位精度没有 10 s 观测时间的定位精度高。因此,相位差误差对定位精度的影响最为严重,不断改变相位差误差进行实验,发现当相位差误差在 10° 以内时,利用本文方法能够实现较好的定位效果。所以,对相位差信息进行滤波平滑处理是非常有必要的。

5 结语

本文从基于相位差的机载单站无源定位角度出发,对解模糊后的相位差观测量用 LMS 算法进行滤波平滑处理,将一定观测时间积累的观测量作为定位解算的输入,通过网格搜索择优找到最小代价

函数对应的位置即为最终的定位点。本文方法的特点是对积累观测量数据的处理来抑制单次观测的随机误差,从而改善定位效果。通过对不同因素影响定位误差的仿真分析,也进一步验证了对积累观测量进行前端滤波处理的必要性,该方法也有效提高了对目标定位的稳定性与精度。同时,网格搜索的定位方法计算比较简单,可操作性强,利于算法的工程实现。

参考文献(References):

- [1] 刘学. 机载无源定位技术与跟踪算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
LIU X. The Research of Technology and Tracking Algorithms Forair-Borne Passive Location[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [2] ZHENG Q, CHEN J Q, YANG R J, et al. Research on Airborne Infrared Location Technology Based on Orthogonal Multi-station Angle Measurement Method[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86: 202-206.
- [3] SHAN Y H, AN W, SUN Z K, et al. Passive Location Method Based on Phase Rate of Change[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2002, 15(1): 49-54.
- [4] 田中成, 刘聪锋. 无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 356-392.
TIAN Z C, LIU C F. Passive location technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 356-392. (in Chinese)
- [5] MA W G, WANG X P, TIAN J W. Echo Recognition and Correction for Guided Wave Radar Level Based on Adaptive LMS[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2017, 8(4): 328-333.
- [6] 杨文革, 沈晖, 杨婷, 等. LMS自适应滤波算法改进及其在连线干涉测量中的应用[J]. *遥测遥控*, 2016, 37(5): 49-57.
YANG W G, SHEN H, YANG T, et al. An Improved LMS Adaptive Filtering Algorithm and Its Application to Connected Elements Interferometry[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2016, 37(5): 49-57. (in Chinese)
- [7] LI Z F, LI D, XU X L, et al. New Normalized LMS Adaptive Filter with a Variable Regularization Factor [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(2): 259-269.
- [8] ESPOSITO D, MEO G D, CARO D D, et al. On the Use of Approximate Multipliers in LMS Adaptive Filters [J]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2018, 5: 27-30.
- [9] CHEN H Z, LIU Z Y, CAI K, et al. Grid Search Parametric Optimization for FT-NIR Quantitative Analysis of Solid Soluble Content in Strawberry Samples [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2018, 94: 7-15.
- [10] FAYED H A, ATIYA A F. Speed up Grid-Search for Parameter Selection of Support Vector Machines[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 80: 202-210.
- [11] 周恭谦, 杨露菁, 刘忠. 改进的非完全约束加权最小二乘 TDOA/FDOA 无源定位方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(8): 1686-1692.
ZHOU G Q, YANG L J, LIU Z. Improved Incomplete Constrained Weighted Least Squares TDOA/FDOA Passive Location Method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(8): 1686-1692. (in Chinese)
- [12] 夏忠婷, 武洋, 黄苏豫. 基于 SVD-UKF 单站无源定位算法研究[J]. *计算机与数字工程*, 2016, 44(3): 445-448.
XIA Z T, WU Y, HUANG S Y. Single Observer Passive Location Algorithm Based on SVD-UKF[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2016, 44(3): 445-448. (in Chinese)
- [13] 宋耀艳, 张成毅, 侯甲渤. 牛顿迭代法在非线形特征问题中的收敛性[J]. *西安工程大学学报*, 2017, 31(1): 123-130.
SONG Y Y, ZHANG C Y, HOU J B. Convergence of Newton Iterative Method for a Nonlinear Eigen-Problem[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2017, 31(1): 123-130. (in Chinese)
- [14] 李淳, 廖桂生, 李艳斌. 改进的相关干涉仪测向处理方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2006, 33(3): 400-403.
LI C, LIAO G S, LI Y B. A DF Method for the Improved Correlative Interferometer[J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(3): 400-403.
- [15] 赵培焱, 彭华峰, 邓兵, 等. 基于干涉相位的两步法高精度无模糊时延估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(11): 2410-2414.
ZHAO P Y, PENG H F, DENG B, et al. Two-stage High Accuracy and Unambiguous Time Delay Estimation Method Based on Interferometry Phase[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(11): 2410-2414. (in Chinese)
- [16] 郑仕力, 董乔忠, 王笃祥. 基于二维单基线的单星高精度无源定位算法[J]. *航天电子对抗*, 2016, 32(3): 32-35.
ZHENG S L, DONG Q Z, WANG D X. High Precision Passive Localization by Single Satellite Observer Using Two-dimensional Single Baseline[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2016, 32(3): 32-35. (in Chinese)
- [17] 廖薇, 车延庭, 赵俊杰, 等. 微小型无人机单站无源交叉定位[J]. *电子信息对抗技术*, 2018, 33(4): 11-15.
LIAO W, CHE Y T, ZHAO J J, et al. Single Station Passive Cross Location of Micro UAV[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2018, 33(4): 11-15. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)