

# 基于三维反演重构的微波着陆系统飞行校验评估方法

罗 潇, 史晓锋\*

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 飞行校验是保证航空运输安全的必要技术手段。微波着陆系统(MLS)作为重要的全天候精密进近和着陆引导系统,其飞行校验和测试评估方法在民用航空领域尚未形成完善规范,为此依据国际标准对 MLS 飞行校验进行分析研究。针对 MLS 覆盖范围大、进近航道灵活,而飞行科目对航道的覆盖有限,可能出现空间信号漏检的问题,提出基于稀疏信号的场型重构方法。该方法采用径向基函数神经网络,实现稀疏样本条件下信号场型的三维反演重构,进而对 MLS 三维空间信号场型进行评估,并以航道跟随误差为样本空间进行仿真实验。结果表明,三维反演重构后航道跟随误差的重构误差大约为 1.4 英尺,远小于 FAA8200 飞行校验规范手册规定的 20 英尺的容限要求。本文的研究成果为 MLS 飞行校验中完整空间信号场型评估提供了新方法。

**关键词:** 飞行校验;微波着陆系统;反演重构;径向基函数神经网络

中图分类号: V249; TN96 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)01-0022-06

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5160

## Flight Inspection and Evaluation Method for Microwave Landing System Based on Three-dimensional Inversion Reconstruction

LUO Xiao, SHI Xiaofeng\*

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191 China)

**Abstract:** Flight inspection is a necessary technical means to ensure aviation transportation safety. As an important all-weather precision approach and landing guidance system, Microwave Landing System (MLS) lacks comprehensive standards for flight inspection and test evaluation in the civil aviation domain. Therefore, this study investigates MLS flight inspection based on international standards. Addressing the challenges posed by MLS's wide coverage and flexible approach paths, which may result in spatial signal omissions due to limited flight maneuvers covering the paths, we propose a sparse signal-based scene reconstruction method. This approach employs RBFNN to achieve three-dimensional inversion reconstruction of signal scenes under sparse sample conditions, and enables evaluation of the three-dimensional spa-

收稿日期:2023-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(62227810)。

第一作者:罗潇(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为飞行校验。

ORCID: 0009-0003-8240-5801 E-mail: 1445186550@qq.com

\*通信作者:史晓锋(1974—),男,研究员,博士,主要研究方向为航空导航、飞行测试、测控技术。

ORCID: 0000-0002-8823-6119 E-mail: shixiaofeng@buaa.edu.cn

引用格式:罗潇,史晓锋.基于三维反演重构的微波着陆系统飞行校验评估方法[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(1):22-27.

LUO Xiao, SHI Xiaofeng. Flight Inspection and Evaluation Method for Microwave Landing System Based on Three-dimensional Inversion Reconstruction[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(1): 22-27.

tial signal scenes of MLS. Additionally, we conduct simulation experiments using the path following error as the sample space. The experimental results show that the reconstruction error of the path following error after three-dimensional inversion reconstruction is about 1.4 feet, which is far less than the 20 feet tolerance required by the FAA8200 flight inspection specification manual. This paper provides a new method for comprehensive evaluation of complete spatial signal scenes in MLS flight inspection.

**Keywords:** flight inspection; MLS; inversion reconstruction; RBFNN

飞行校验是保障航空运输安全必不可少的技术手段,其旨在检查和评估各种导航、雷达、通信等设备的空间信号质量及其容限。微波着陆系统(microwave landing system, MLS)作为一种新型着陆引导系统,目前主要用于军用航空领域,可在一广阔的覆盖区内提供位置信息,并以方位角、仰角和距离进行度量。相较于目前机场广泛使用的仪表着陆系统(instrument landing system, ILS),其适应性强、覆盖范围广、制导精度高。面对日益复杂的空中交通情况,MLS在民用航空领域具有广阔的发展前景。在着陆引导系统飞行校验的研究领域,李小强等<sup>[1]</sup>提出了一种基于双VDB台站的卫星导航地面增强系统飞行校验方法,陆永东等<sup>[2]</sup>对仪表着陆系统飞行校验方法进行深入的对比研究, Yang等<sup>[3]</sup>提出一种基于模糊集决策的ILS飞行校验中的参数异常检测方法,但针对MLS飞行校验和测试评估方法在国内民用航空领域尚未完善。本文依据国际标准对MLS的飞行校验进行研究,分析了校验关键参数及其容限要求、校验基准的选取以及飞行科目设计,同时针对MLS飞行校验过程中可能出现空间信号漏检等问题,提出一种基于有限稀疏样本条件下利用径向基函数神经网络对MLS场型进行三维反演重构的方法,实现了MLS完整空间信号场型评估。

## 1 MLS 飞行校验

### 1.1 关键参数与容限要求

MLS作为用于引导飞机着陆的系统,对其进行飞行校验,关键在于评估MLS系统引导着陆的精度是否符合要求。对MLS的系统误差进行分析,其输出信号的角频率分为航道跟随误差(path following error, PFE)和控制运动噪声(control motion noise, CMN)。航道跟随误差包含航道跟随噪声和平均航向道误差或平均下滑道误差,是由系

统或设备提供的角度和距离数据误差中的慢变化(频率较低)成分,这种成分的误差属于可能引起飞机偏离预定航向道和/或下滑道的引导信号误差分量,其指预定飞行航迹和实际飞行航迹(按引导信号飞行时)之间的偏差。控制运动噪声则是指由系统或设备所提供的角度和距离数据误差中的快变化成分(频率较高),这种成分的误差会导致飞机舵面和操纵杆的抖动,当CMN过大时,说明飞机飞行不平稳。

为获得PFE和CMN,需要对误差分量进行解构剥离。根据飞机着陆过程的动态响应特征,通过转折频率为10弧度/秒的低通滤波器可以获得PFE和CMN分量。其中PFE包括小于或等于0.5弧度/秒的方位误差成分和小于或等于1.5弧度/秒的仰角误差成分;CMN则包括那些处于0.3~10弧度/秒范围内的方位误差成分和处于0.5~10弧度/秒范围的仰角误差成分<sup>[4]</sup>。具体测量滤波器配置如图1所示。

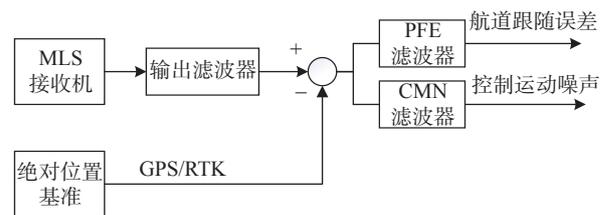


图1 滤波器配置

Fig. 1 Filter configuration

PFE和CMN可以直接反映飞机着陆过程中的制导误差和舵面响应,因此评估这两个参数在空间内的分布是否符合容限要求是MLS飞行校验的关键。为获得PFE和CMN在空间的容限分布,本文基于ICAO 8071附件十<sup>[5]</sup>以及FAA8200飞行校验规范手册<sup>[6]</sup>,分析MLS覆盖区内的误差评估方法。其中在MLS系统引导着陆的过程中,系统在跑道入口处的精度决定了着陆质量,因此跑道入口

处是精度的主要测量点。以方位制导为例, MLS 信号的覆盖范围如图 2 所示。在跑道入口和跑道中线的交叉点上方定义了一个“MLS 基准点”。当飞机进入 MLS 覆盖范围时,都以此点作为基准,覆盖范围内的其余地方精度要求随着距离或偏移角度增大而降低,即 PFE 和 CMN 的容限将随着离基准点的距离、横向偏移角度和仰角而变化。同时,按照规范要求,其变化规律与距离或偏移角度呈线性关系。

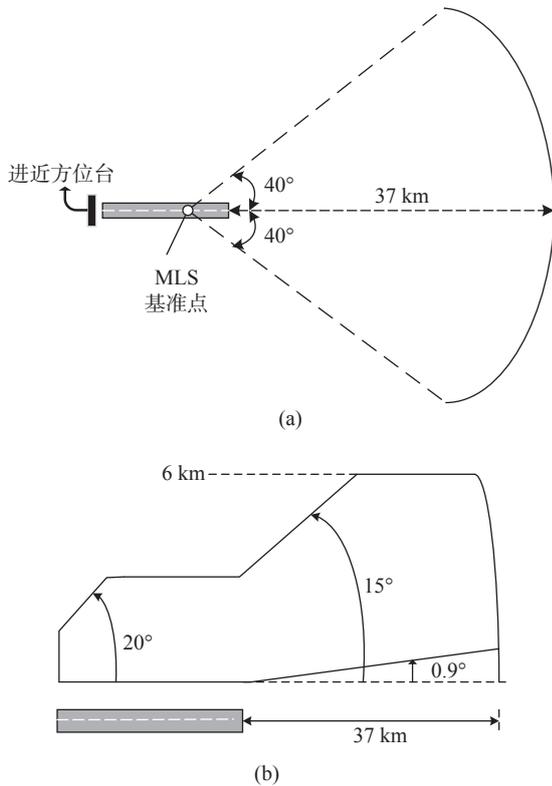


图 2 MLS 方位制导覆盖图  
Fig. 2 MLS azimuth coverage

本文结合 PFE 和 CMN 在基准点处的容限要求以及跑道路口以外的降级容限要求,推算 PFE 和 CMN 在整个覆盖空间内的容限分布。进近基准点处的容限要求如表 1 所示(距离形式)。

表 1 进近基准点处容限要求

Tab. 1 Tolerance requirements at approach reference points

误差	方位制导	仰角制导
PFE	±6 米(20 英尺)	±0.6 米(2 英尺)
CMN	±3.2 米(10.5 英尺)	±0.3 米(1 英尺)

具体步骤如下。首先将基准点处的容限值根据方位天线到基准数据点的距离转为极坐标形式

$$\theta = \arctan\left(k \frac{T_f}{D}\right) \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为基准点处 PFE/CMN 以角度形式的容限值, ( $^{\circ}$ );  $T_f$ 为 PFE/CMN 以距离形式的容限值, m;  $D$ 为从方位天线到基准数据点的距离, m;  $k$ 为米和英尺的转换系数。

在极坐标形式下,根据 MLS 在跑道路口以外的衰减系数,可以得到覆盖范围内任意测量点处 PFE/CMN 容限值的分布函数为

$$\theta_0 = (1 + 0.01r) \left(1 + \frac{\theta_p}{80}\right) \left(1 + \frac{\theta_t - 3}{2(15 - \theta_m)}\right) \cdot \theta \quad (2)$$

式中: $\theta_0$ 为测量点处的容限值, ( $^{\circ}$ );  $r$ 为测量点距离基准点的距离, 海里;  $\theta_p$ 为横向偏移角度, ( $^{\circ}$ );  $\theta_t$ 为仰角, ( $^{\circ}$ );  $\theta_m$ 为规定的最低下滑道角度, ( $^{\circ}$ )。

## 1.2 校验基准选取

校验基准的选取直接关系到飞行校验的可靠性及稳定性。飞行校验过程中飞机需要按照飞行科目采集规定路径上的信号数据。由于外界干扰,校验飞机在飞行过程中很容易发生航迹偏移,导致出现飞行误差,从而影响飞行校验的结果。为确保在不同位置获得准确的空间信息,需要选取合适的校验基准以建立空间信号采样的基准刻度。

根据 ICAO 8071 的飞行校验理论,校验精度(即校验基准精度)应至少为被校设备系统精度的 3 倍<sup>[7]</sup>。考虑 MLS 属于精密进近着陆引导系统,因此需要更高精度的空间定位技术作为校验的基准,如 GPS/RTK 技术,其定位精度可达到厘米级,远远高于 MLS 精度的 3 倍以上。

## 1.3 飞行科目设计

选取合理的校验基准可以计算飞行校验中的关键参数,设计不同的飞行科目可以对不同航道上的关键校验参数进行采样。飞行科目的设计需要考虑整个测试区域的地形、地貌、气象等因素以及被校设备的工作范围,同时应尽量减少飞机在空域的暴露时间以保证飞行安全。MLS 不同于 ILS 的单一航道进近,其支持曲线进近、分段进近等。MLS 飞行校验过程中,飞行科目包含的航道始终有限,只能获得有限的稀疏离散信号,难以对完整空间信号场型进行评估。因此,需要使获得的有限稀疏信号在空间中分布具有更强的空间相关性,进而推算出 MLS 校验参数在整个覆盖区中的分布。

设计合理的飞行科目以实现后续的场型反演重构尤为重要。

考虑 MLS 信号覆盖范围(如图 2 所示),其包含跑道中心线 $\pm 40^\circ$ 、垂直面  $0\sim 15^\circ$ 、距离基准点  $0\sim 20$  海里的扇形区域,因此飞行科目的设计在仰角上必须尽可能多地包含不同角度的下滑道,同时在方位制导上必须尽可能包括不同的横向偏移角度。本文结合 FAA 8200 中对 MLS 的飞行校验规范,设计了一项包含多段航线的 MLS 飞行科目,其飞行航迹如图 3 所示,其中包括  $3^\circ$  下滑角正直对准/斜对准航道、 $6^\circ$  下滑角正直对准/斜对准航道、径向水平飞行以及多段不同距离的圆周飞行。

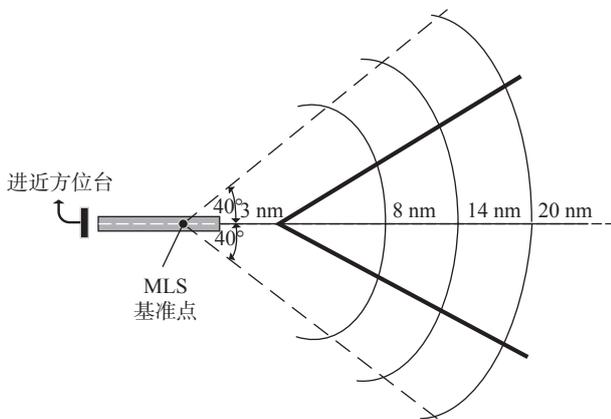


图 3 飞行科目示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flight subjects

## 2 三维空间信号场型反演重构

尽管设计的飞行科目包含多段航线,但相较于广阔的 MLS 信号覆盖范围,校验过程中采集的数据仍然是稀疏信号,其本身就存在空间信号漏检的可能;因此,常规的飞行校验测试评估方法难以实现 MLS 完整三维空间信号场型评估。在雷达信号、图像处理等领域,空间插值技术被广泛用于数据处理中,其可根据已知的稀疏样本数据点经过插值实现数据反演重构。基于 MLS 的精度要求以及校验参数依赖于距离的分布特点,本文采用径向基函数神经网络插值法。利用采集的稀疏样本作为训练集,可在大范围内实现高精度的插值<sup>[8]</sup>,从而实现 MLS 三维空间信号场型反演重构。

### 2.1 径向基函数(RBF)神经网络

径向基函数是一个取值仅仅依赖于离原点距离的实值函数,或者还可以是到任意一点  $c$  的距

离, $c$  点称为中心点,也就是  $\Phi(x) = \Phi(\|x - c\|)$ <sup>[9]</sup>。常用的径向基函数包括以下函数。

Gaussian 函数:

$$\Phi_i(x) = e^{-\frac{x^2}{\delta_i^2}} \quad (3)$$

Reflected sigmoid 函数:

$$\Phi_i(x) = \frac{1}{1 + e^{\frac{x^2}{\delta^2}}} \quad (4)$$

式中: $\delta$  为函数的宽度参数,可以控制函数的径向作用范围。

径向基函数神经网络是一种使用径向基函数作为激活函数的人工神经网络。径向基函数网络的输出是输入的径向基函数和神经元参数的线性组合。其包含 3 层神经网络结构,分别为输入层、隐藏层、输出层,只要隐藏层神经元足够多径向基函数神经网络(RBFNN)完全可以拟合任何一个函数。基于 MLS 三维场型特点,定义 RBFNN 的拓扑结构的输入层为 3 个节点,分别对应曲面上点的坐标值  $P_i(x, y, z)$ ,输出层为一个节点对应曲面上的点  $P_i(x, y, z)$  对应的校验参数值。其网络拓扑模型如图 4 所示。

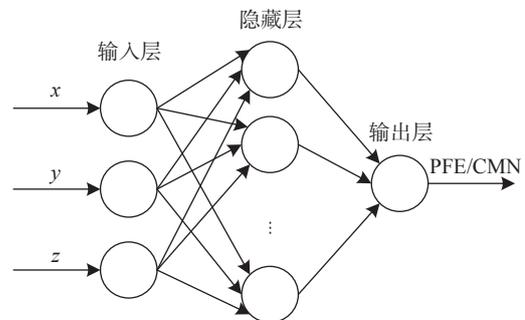


图 4 网络拓扑模型

Fig. 4 Network topology model

利用径向基函数神经网络进行场型反演重构,即将空间中采集的稀疏数据点通过径向基函数映射到高维空间中,然后进行线性插值或拟合,得到空间内缺失数据点的估计值。其学习过程<sup>[10-11]</sup>如下。

记  $\mathbf{X} = [x, y, z]$  为采集的稀疏样本数据点坐标,即为输入层的输入向量。设隐含层的节点个数为  $m$ ,并记其径向基函数向量为  $\mathbf{H} = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ ,其中  $h_i$  为选择的径向基函数,表达式为

$$h_i = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{X} - \mathbf{C}_i\|^2}{2b_i^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为输入向量;  $\mathbf{C}_i$  为第  $i$  个隐含层神经元的中心向量;  $b_i$  为神经元节点的基宽度。

记第  $i$  个神经元节点的中心向量为:  $\mathbf{C}_i = [C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{mi}]^T$ , 其中  $i=1, 2, \dots, m$ 。设构建网络基宽矢量为:  $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ , 其中  $b_i$  为神经元节点的基宽度, 且均为正常数。设构建网络的权值向量为:  $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ , 则网络在  $t$  时刻的输出为

$$y_t = \sum_{i=1}^m w_i h_i \quad (6)$$

## 2.2 仿真验证

以方位制导的 PFE 为样本, 对径向基函数神经网络实现三维空间信号场型反演重构进行仿真实验, 具体步骤如下。

1) 模拟一组飞行校验过程中 MLS 接收机采集的方位制导 PFE 数据, 实际飞行测试过程中 MLS 方位制导数据刷新率约为 13 Hz, 飞机进近阶段速度大约 230 m/s, 而 MLS 覆盖距离达到 37 km, 考虑干扰误差等因素, 一条航线能获得大约 1000 个有效空间采样点。

2) 将模拟的 PFE 数据作为训练样本, 利用径向基函数神经网络, 对覆盖区内未知航路点数据进行推算, 实现三维空间信号场型反演重构。

3) 分析重构后的场型误差。

设定机场情况为: 方位台距离基准点 7965 英尺, 机场规定的最低下滑角度为  $3^\circ$ , 在基准点处方位制导的 PFE 容限值为 20 英尺。图 5 表示根据容限分布函数采样获得的 PFE 样本分布情况。图 6 表示经过三维场型反演重构后 PFE 在覆盖区域的分布。图 7 表示反演重构的数据与样本数据之间的误差。

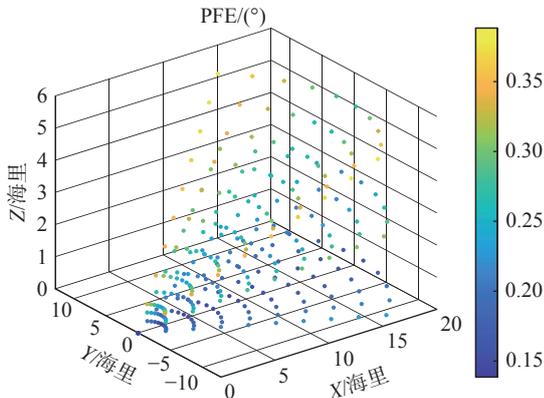


图 5 PFE 样本分布图

Fig. 5 PFE sample distribution map

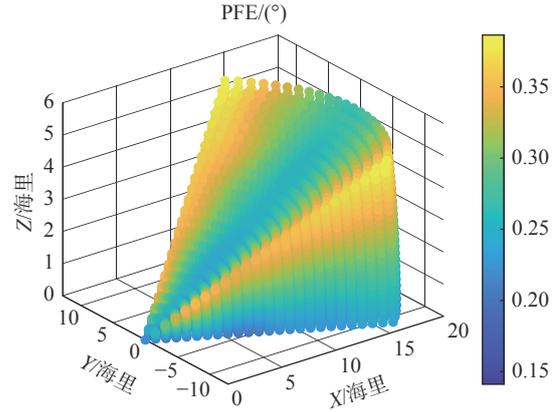


图 6 PFE 反演重构后分布图

Fig. 6 PFE distribution map after inversion reconstruction

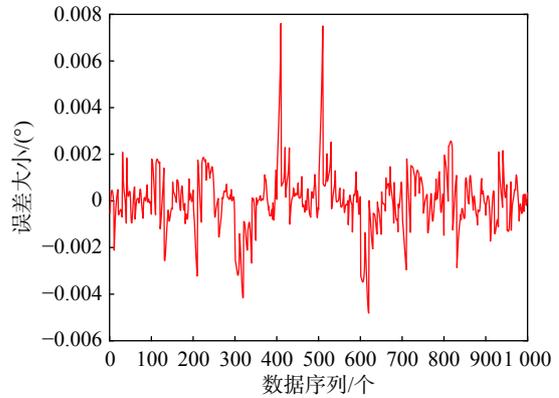


图 7 反演重构的误差

Fig. 7 Error of inversion reconstruction

仿真实验结果表明, 利用径向基函数神经网络实现的三维场型反演重构能够有效地描述 PFE 在覆盖区的分布情况。基于 1000 个稀疏样本的训练, 反演重构后的数据与模拟数据误差均在  $0.01^\circ$  以内, 根据设定的机场情况, 其误差转化为距离形式大约为 1.4 英尺 (约 0.4 m), 远远小于表 1 中 FAA 8200 规定的 20 英尺容限要求。同时实际飞行测试中, 多段飞行航线采集的空间样本数量远大于 1000, 反演重构的误差能进一步缩小。与传统的飞行校验测试评估方法相比, 该方法仅需要少量稀疏样本信号就能对完整三维空间信号场型进行评估, 大大提高了 MLS 飞行校验的精度和效率。

## 3 结论

本文对 MLS 飞行校验方法进行研究, 得出以下结论。

1) 针对尚未完善的规范要求, 依据国际标准对校验中涉及的重点内容进行分析, 为填补相关领域空白提供一定的借鉴。

2) 针对飞行测试中采集的稀疏离散数据难以准确评估场型的问题, 提出了一种利用径向基函数神经网络进行三维场型反演重构的方法。经过仿真验证, 三维反演重构后航道跟随误差的重构误差大约为 1.4 英尺, 远小于 FAA8200 飞行校验规范手册规定的 20 英尺的容限要求, 为 MLS 飞行校验中完整三维空间信号场型评估方法提供了新的思路。

### 参 考 文 献

[1] 李小强, 王永超. 一种双 VDB 台站 GBAS 系统的飞行校验方法[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(23): 111 – 116.

LI X Q, WANG Y C. A flight inspection method for GBAS dual VDB station[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(23): 111 – 116.

[2] 陆永东, 任龙昊, 王明甲, 等. 仪表着陆系统设备飞行校验结果对比分析方法及系统: CN111824453B[P]. 2022-09-20.

LU Y D, REN L H, WANG M J, et al. Instrument landing system equipment flight verification result contrastive analysis method and system: CN111824453B[P]. 2022-09-20.

[3] YANG R, LV R L, MENG Z Y. Abnormal detection strategy in flight inspection of instrument landing system using fuzzy set decisions[C]//2019 IEEE 1st International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Kunming: IEEE, 2020: 504–508.

[4] 周其焕. 微波着陆系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

ZHOU Q H. Microwave landing system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992.

[5] Manual on testing of radio navigation aids volume itesting of ground-based radio navigation systems: ICAO DOC-8071[S]. USA, 2000.

[6] United states stand-ard flight inspection manual: Faa-order82001d[S].USA, 2015.

[7] 王鼎, 谢洪森, 王传刚, 等. 着舰引导雷达动态校验系统的设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2021, 29(8): 90 – 95.

WANG D, XIE H S, WANG C G, et al. Design and implementation of dynamic inspection system for landing guidance radar[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(8): 90 – 95.

[8] 王振宇, 黄伟奇, 孙健, 等. 插值算法在辐射场重构中的应用现状[J]. *兵工自动化*, 2022, 41(7): 29 – 35.

WANG Z Y, HUANG W Q, SUN J, et al. Application status of interpolation algorithm in radiation field reconstruction[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2022, 41(7): 29 – 35.

[9] ADNAN R, SAMAD A M, TAJJUDIN M, et al. Modeling of flood water level prediction using improved RBFNN structure[C]//2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). Penang, Malaysia: IEEE, 2016: 552–556.

[10] 马腾. 改进的径向基三维插值算法的研究与应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.

MA T. Research and application of improved radial basis function 3D interpolation algorithm[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

[11] ZHOU P Z, JIAO K K, WANG Z H, et al. An ocean current prediction method for profiling float based on RBFNN[C]//OCEANS 2022. Hampton Roads, VA, USA: IEEE, 2022: 1–4.

(编校: 夏书林)

### (上接第 21 页)

[11] 刘志强, 黄张裕, 金建平. 利用卫星高度角和信噪比提高 GPS 定位精度的试验分析[J]. *测绘工程*, 2008, 17(4): 54 – 58.

LIU Z, HUANG Z, JIN J. An experiment study of improving GPS positioning precision by satellite elevation and SNR[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2008, 17(4): 54 – 58.

[12] GROVES P D, JIANG Z Y. Height aiding, C/N0 weighting and consistency checking for GNSS NLOS and multipath mitigation in urban areas[J]. *The Journal of Navigation*, 2013, 66(5): 653 – 669.

[13] GAO C F, WU F, WEI W R, et al. An improved weight stochastic model in GPS precise point positioning[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering. Changchun: IEEE, 2011: 629 – 632.

[14] 杨元喜, 何海波, 徐天河. 论动态自适应滤波[J]. *测绘学报*, 2001, 30(4): 293 – 298.

YANG Y X, HE H B, XU T H. Adaptive robust filtering for kinematic GPS positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 293 – 298.

(编校: 饶莉)