

基于实测数据的二次雷达 OBA 查表多算法校准性能对比研究

闫喆, 赵传智*, 姚力

四川九洲电器集团有限责任公司, 四川绵阳, 中国

*通讯作者

【摘要】针对二次雷达单脉冲测向系统中传统理论 OBA (Offset Bias Adjustment) 查表与真实外场环境存在偏差, 导致不同波位、不同探测距离下测向精度不一致、系统误差漂移的工程问题, 本文基于真实外场试验采集多波位、多距离工况下的和通道、差通道幅度点迹数据, 开展 OBA 偏移补偿曲线的多方法校准对比研究。分别采用形状配准、移动最小二乘、常规插值、高斯径向基函数拟合、高阶多项式拟合、二阶有理多项式拟合、正交距离回归、傅里叶三角函数拟合以及轻量神经网络拟合等多种曲线重构算法, 完成不同工况下 OBA 查表的修正与更新。通过统计各算法校准后的测向误差、曲线平滑性、远距离稳定性, 系统对比各类方法在复杂外场实测数据下的修正效果、噪声抑制能力与拟合鲁棒性。试验结果表明: 各类算法在近距离高精度拟合、远距离抗漂移等场景中各有优劣, 传统拟合算法稳定性强但非线性拟合能力有限, 智能拟合模型对复杂畸变 OBA 曲线适配性更优但存在过拟合风险。本文明确了不同算法的适用边界、典型缺陷与工程选型建议, 可为二次雷达单脉冲测向 OBA 查表的外场精细化校准、实测数据落地标定提供参考依据。

【关键词】二次雷达; 单脉冲测向; OBA 查表; 外场实测; 曲线拟合; 误差校准; 算法对比

1. 引言

单脉冲测向技术是二次雷达实现目标角度高精度解算的核心技术, 其利用天线和差通道幅度比值实现目标方位估计[1], 具备测向速度快、实时性强、体制成熟的优势, 广泛应用于航空监视、目标识别与空域监测场景[2]。在单脉冲测向体制中, 天线阵列加工误差、通道幅相不一致、外场环境多径干扰、架设姿态偏差等因素会引入系统性测向偏移误差, 工程上普遍采用 OBA 偏移补偿查表法对测向偏差进行修正, 是保障二次雷达测向精度的关键手段[3]。

现阶段雷达设备出厂 OBA 查表多基于暗室标定或电磁仿真数据生成, 模型参数适配理想无干扰环境[4]。在外场实际工作条件下, 随着探测距离变化、波位切换、环境杂波扰动, 真实测向偏差特性呈现强非线性、距离相关性与波位差异性, 导致静态理论 OBA 表与真实误差分布失配, 出现近距离偏差突变、远距离漂移、部分波位补偿失效等问题[5], 严重制约外场装备测向一致性与实测精度。

为解决 OBA 表外场失配问题, 行业普遍采用实测点采样结合曲线重构的方式更新查表参数[6], 各类插值、拟合、配准及智能拟

合算法已广泛应用于传感器误差校准领域[7]。但现有研究大多停留在单一算法优化、仿真数据验证或简单工况测试, 缺乏基于真实雷达外场多波位、多距离、多维度实测点迹数据的系统性横向对比[8]。不同曲线重构算法对二次雷达 OBA 这种强畸变、区间特性差异大的误差曲线的适配能力、噪声抑制水平、远距离稳定性、边界拟合精度缺乏量化评估体系, 工程标定过程中算法选型多依赖经验, 缺少实测数据支撑的标准化依据。

针对以上问题, 本文依托二次雷达外场试验, 采集全波位、多距离梯度下的和差通道幅度实测点迹数据, 构建完备的外场实测 OBA 误差数据集。引入形状配准、移动最小二乘、插值算法、高斯径向基函数拟合、高阶多项式、有理多项式、正交回归、傅里叶拟合、轻量神经网络拟合等多类主流曲线重构模型, 完成不同工况下 OBA 查表校准与测向误差修正[9]。通过量化对比各类算法的残余误差、曲线平滑度、抗扰动能力与跨距离适应性[10], 总结各算法的优缺点与适用场景, 形成面向二次雷达外场标定的算法选型建议。研究结果可为二次雷达单脉冲测向系统的外场精细化校准、OBA 查表迭代优化与工程落地应用提供实测支撑与技术参考。

2.研究方法

2.1 算法概述

根据 OBA 曲线重构需求, 选择了多种算

法用于 OBA 的校准测试, 各类算法原理与性能对比如表 1 所示。

表 1.多种算法的性能对比

算法	核心特性	数据规模适应性	抗噪能力	计算/推理成本
形状配准	抗噪能力强	小/中	极好	低
移动最小二乘	局部加权, 平滑	小/中	好	极高
简单插值算法	局部趋势引导	小	极差	极低
高斯径向基函数拟合	擅长高维散乱数据	小/中	中	高($O(N^3)$)
轻量神经网络拟合	擅长拟合隐性规律	大	中/好	训练高/推理极低
高阶多项式拟合	全局趋势, 易震荡	小/中	差	低
二阶有理多项式拟合	擅长极点/渐近线等	中	较好	低
正交距离回归	正交误差, 双向变量误差	小/中	好	中/高
三角函数(傅里叶)拟合	契合周期信号	中	中	低/中

2.2 数据采集

将二次雷达设备装在试验场转台上, 在一定距离上部署信号源, 发射二次雷达信号。过程中, 二次雷达设备设定固定波位接收信号, 同时随转台转动, 记录接收信号的和幅度、差幅度等数据, 同时记录转台角度。

在上述过程中, 通过布置不同位置的信号源, 获取不同距离上的接收点迹信号, 通过二次雷达设备不同的波位配置, 获取各个波位的点迹数据。

2.3 测试方法

测试方法如下:

a) 对于特定距离、特定波位, 获取到试验数据;

b) 将该波位内的点随机平均分成 3 组, 前两组作为训练集, 用于校准, 第 3 组作为测试集, 用于测试。

c) 校准时运行特定校准算法, 对 OBA 数值进行修正; 测试时使用校准后的 OBA 表及测试集数据, 进行测向精度统计, 记录 RMSE (Root-Mean-Square Error)。

d) 对于特定距离、特定波位、特定算法, 上述过程共执行 100 次, 统计平均值作为该条件下的优化性能评估指标。

依照上述方法, 对不同距离、不同波位条件下各个算法进行性能统计, 分析性能优劣。

3.仿真实验

3.1 不同距离多种算法的远距离稳定性对比

在 1° 波位、多种距离条件下, 对多种算法进行蒙特卡洛实验, 统计结果如表 2、表 3 所示。

其中, 在 100km 条件下, 各种算法的校

准 OBA 形状如表 4 所示。

表 2.性能对比

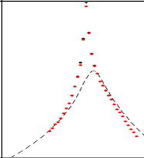
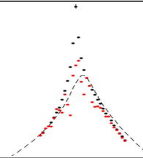
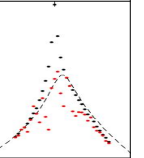
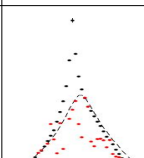
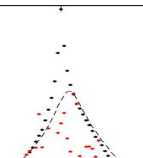
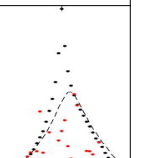
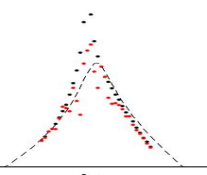
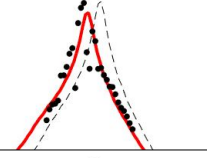
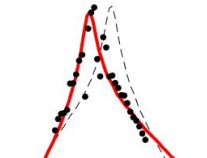
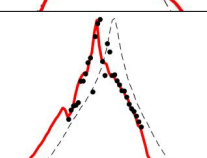
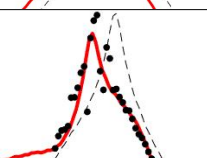
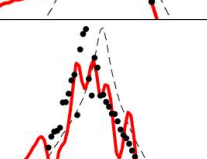
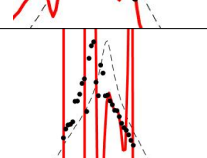
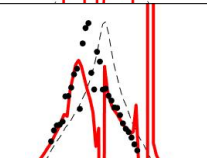
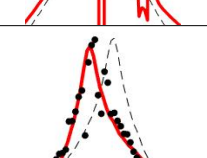
算法	10km	100km	150km
采集点与理论 OBA			
未校准	1.51	1.69	2.04
形状配准	0.84	0.92	1.36
移动最小二乘	0.88	1.68	2.23
简单插值算法	0.62	1.05	1.68
高斯径向基函数拟合	4.02	2.69	3.39
轻量神经网络拟合	2.39	2.62	3.58
高阶多项式拟合	3.12	3.71	3.75
二阶有理多项式拟合	1.96	1.58	2.20
正交距离回归	2.71	3.64	3.74
三角函数(傅里叶)拟合	3.51	3.24	3.38

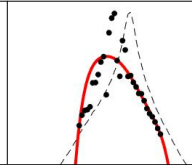
表 3.性能对比

算法	250km	350km	450km
采集点与理论 OBA			
未校准	2.22	2.76	3.07
形状配准算法	2.02	2.97	3.73
移动最小二乘	3.42	3.82	4.77
简单插值算法	2.47	4.39	4.69
高斯径向基函数拟合	4.04	4.82	5.38

轻量神经网络拟合	4.72	5.34	5.62
高阶多项式	3.90	4.24	4.54
二阶有理多项式	2.94	4.47	5.06
正交距离回归	3.92	4.18	4.08
三角函数（傅里叶）拟合	3.45	4.30	4.80

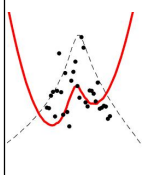
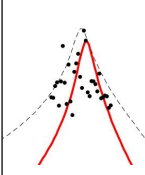
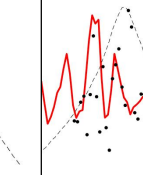
表 4.校准形状对比

算法	10km	单次 RMSE (°)
采集点与理论 OBA		
形状配准算法		1.20
移动最小二乘		1.25
简单插值算法		1.19
高斯径向基函数拟合		1.17
轻量神经网络拟合		1.68
高阶多项式		2.81
二阶有理多项式		2.82
正交距离回归		2.78

三角函数（傅里叶）拟合		2.02
-------------	--	------

在 450km 条件下，校准方法基本失效，如表 5 所示。

表 5.校准形状对比

450km	正交距离回归	形状配准算法	简单插值算法
算法			
RMSE	4.08	4.77	4.69

3.2 不同波位多种算法的测向误差对比

表 6.性能对比

算法	1°	6°	11°
原始 OBA	1.99	2.15	1.78
形状配准算法	0.92	0.88	0.71
移动最小二乘	1.68	1.33	2.09
简单插值算法	1.05	1.05	1.06
高斯径向基函数拟合	2.69	2.54	1.20
轻量神经网络拟合	2.62	2.18	2.00
高阶多项式	3.71	2.38	2.46
二阶有理多项式	1.58	1.56	1.52
正交距离回归	3.64	2.53	3.00
三角函数（傅里叶）拟合	3.24	2.30	2.73

表 7.性能对比

算法	16°	21°	26°
原始 OBA	2.11	1.77	1.84
形状配准算法	0.74	0.81	0.49
移动最小二乘	3.92	2.31	1.49
简单插值算法	1.57	0.74	0.45
高斯径向基函数拟合	2.57	2.30	1.54
轻量神经网络拟合	1.57	2.12	1.58
高阶多项式	2.88	2.95	2.83
二阶有理多项式	2.16	1.55	1.30
正交距离回归	3.87	2.32	2.28
三角函数（傅里叶）拟合	1.56	1.71	1.87

表 8.性能对比

算法	31°	36°	41°
原始 OBA	1.95	1.80	1.84
形状配准算法	0.62	0.56	0.64
移动最小二乘	0.58	0.77	0.81
简单插值算法	0.47	0.47	0.63
高斯径向基函数拟合	1.83	1.64	1.14
轻量神经网络拟合	2.01	2.61	1.67
高阶多项式	2.82	2.46	2.86
二阶有理多项式	0.84	1.00	1.38
正交距离回归	1.43	1.54	2.00
三角函数（傅里叶）拟合	2.24	1.74	1.71

100km 条件下, 对多个波位、多种算法进行蒙特卡洛实验, 统计结果如表 6、表 7、表 8 所示。

3.3 曲线平滑性分析

对上述统计结果的部分数据进行详细查看, 分析校准后的 OBA 形状如下。

1) 移动最小二乘在大多数情况下, 表现相对较好, 如图 1 所示。

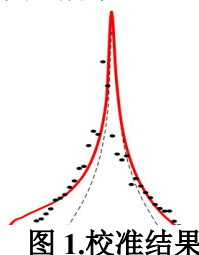


图 1.校准结果

但在个别情况下会出现误差较大的情况。如图 2、图 3 所示。

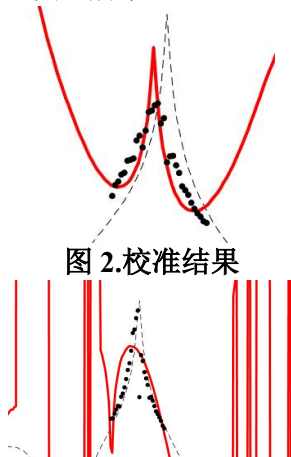


图 2.校准结果

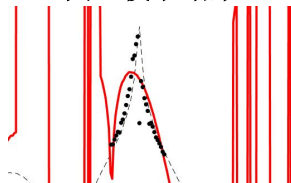


图 3.校准结果

2) 简单插值算法, 在大多数情况下, 校准 OBA 后会存在 OBA 不单调的情况, 但统计测向精度比较好, 例如在 100km、59° 波位条件下, 校准后 RMSE 为 0.7°, 精度有所提升, 但校准后出现了大量的不单调, 如图 4 所示。

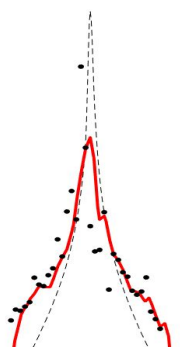


图 4.校准结果

3) 正交距离回归算法, 偶尔会出现破坏原始 OBA 的情况, 如图 5 所示。

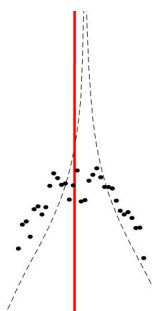


图 5.校准结果

4) 三角函数 (傅里叶) 拟合算法, 在某些情况下会出现内部震荡, 如图 6 所示。

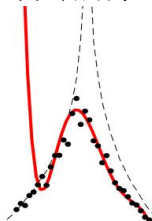


图 6.校准结果

4.研究结论

根据上述实验分析, 总结如下:

a) 近距离条件下, 形状配准算法、移动最小二乘、简单插值算法、正交距离回归均有明显优化效果, 在远距离条件下, 建议使用抗噪能力强的形状配准算法。

b) 形状配准算法, 校准后精度较高、保证单调性, 抗噪能力强, 但由于无法在局部上向实测 OBA 数据逼近, 因此校准精度提升有限, 如果实际应用中更看中 OBA 校准的稳定性, 可以考虑该方法。

c) 移动最小二乘与高斯径向基函数拟合平滑性与适应性均衡性较好, 适合大部分常规波位的工程标定场景, 但偶尔会出现校准后精度明显变差的情况, 使用时应检查校准结果。

d) 简单插值算法, 在大多数情况下, 校准后的精度都比较高, 但存在校准后 OBA 不单调的情况, 应根据实际应用时是否有单调性需求视情使用。

e) 正交距离回归算法, 存在偶尔会破坏原始 OBA 的情况, 造成单个波位校准后精度下降, 使用时应检查校准结果;

f) 三角函数拟合方法, 偶尔会出现校准点内部震荡, 造成单个波位校准后精度下降, 使用时应检查校准结果;

g) 轻量神经网络拟合、高阶多项式拟合、二阶有理多项式拟合、高斯径向基函数拟合等算法, 对复杂误差曲线拟合精度高, 但易出现端点震荡、过拟合与远距离漂移问

题。

此外,根据算法本身的特性,可以遵循如下选型策略:

a) 实时性要求高,选择简单插值或轻量神经网络;

b) 计算资源有限,避免使用高斯径向基函数拟合、移动最小二乘算法;

c) 需要可解释性,避免使用神经网络。

5.结论

5.1 总结研究工作

本文基于二次雷达外场多波位、多距离实测和差幅度点迹数据,系统开展了多类曲线重构算法对 OBA 查表的校准效果对比研究,完成了从实测数据采集、误差建模、曲线修正到测向精度验证的全流程试验分析。通过对传统插值拟合、改进最小二乘类算法、正交回归、三角函数拟合以及轻量智能拟合模型的量化对比测试,验证了不同算法在二次雷达 OBA 误差校准场景下的性能差异。试验结果表明,形状匹配算法最稳定,但校准精度有限;移动最小二乘、高斯径向基函数拟合与正交距离回归算法平滑性与适应性均衡性较好,适合大部分常规波位的工程标定场景,但应仔细检查校准结果;常规插值算法结构简单、修正精度高,但存在不单调的问题,适合近距离平稳误差区间的修正;高阶多项式、有理拟合、轻量神经网络与傅里叶拟合对复杂误差曲线拟合精度更高,但易出现端点震荡、过拟合与远距离漂移问题。

本文通过大量外场实测数据量化了各类算法的优势区间与固有缺陷,厘清了不同距离、不同波位工况下 OBA 校准算法的适用边界,解决了传统标定方法选型无依据、效果不可控的工程痛点,可为二次雷达单脉冲测向系统外场标定、OBA 查表迭代优化与测向精度提升提供实测参考。

5.2 未来研究方向

1) 多算法融合自适应 OBA 校准策略研究:针对单一算法无法同时兼顾近距离高精度与远距离高稳定性的问题,可基于距离区间、波位误差特征构建混合拟合模型,实现不同工况下算法自适应切换,进一步提升全空域测向补偿一致性。

2) 针对小样本、含噪外场数据的鲁棒拟合算法优化:实际外场点迹存在杂波扰动与

稀疏采样问题,后续可结合滤波预处理、异常点剔除机制,优化智能拟合模型的抗干扰能力,提升复杂环境下 OBA 校准的鲁棒性。

3) 动态实时 OBA 更新机制研究:当前校准多为离线静态标定,后续可基于雷达实时点迹数据流,构建在线增量拟合更新框架,实现 OBA 查表随环境、距离的动态自适应迭代,提升装备长期工作稳定性。

4) 面向工程嵌入式部署的轻量化校准模型优化:针对神经网络等智能模型算力开销大的问题,开展模型剪枝、参数简化研究,在保证校准精度的前提下降低算法复杂度,适配雷达嵌入式实时标定场景。

参考文献

- [1] 张尉.二次雷达原理[M].北京:国防工业出版社,2008:89-102.
- [2] 斯科尼克 M.I.雷达手册[M].第2版.王军,译.北京:电子工业出版社,2003:705-719.
- [3] 王西锋.基于 OBA 表自适应生成方法的单脉冲二次雷达角度测量[J].现代雷达,2016,38(4):20-23.
- [4] 邱伟杰.振幅和差式单脉冲二次雷达幅相不一致分析和改进方案[J].航空科学技术,2018,29(3):46-51.
- [5] 林光,罗智德,李家杰.单脉冲二次雷达相位修正技术研究[J].科技传播,2010,2(21):155-156.
- [6] SHERMAN S M, BARTON D K. Monopulse Principles and Techniques [M]. Norwood: Artech House, 2011: 1-18.
- [7] 宋晓瑞,王元钦,郑海昕等.一种基于正交处理的角跟踪系统数字校相方法[J].电子测量技术,2015,38(10):41-45,52.
- [8] 程剑,刘军,张海峰.基于拟合算法的雷达测向误差校准技术[J].无线电工程,2020,50(3):235-239.
- [9] 王磊,施岩龙.提高单脉冲二次雷达测角精度的方法[J].雷达与对抗,2013,33(2):32-36.
- [10] JACOVITTI G. Performance analysis of monopulse receivers for secondary surveillance radar [C]//IEEE International Radar Conference. IEEE, 1983: 456-461.