

文章编号: 2096-1618(2021)05-0493-06

# 基于 ADS-B 的风场反演与异常值影响研究

朱嘉慧<sup>1</sup>, 王海江<sup>1</sup>, 徐自励<sup>2</sup>, 李 静<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**目前空域风场的探测主要靠探空气球、无线电探空仪和测风仪等,但这些方法获得的风场数据覆盖比较稀疏,数据精度不能满足中尺度气象学和航空气象学的研究需要。针对高空区域风场存在准确性低、监测范围小、空间分辨率低等不足,结合 ADS-B 数据进行风场反演,利用 Meteo-Particle 粒子模型对风矢量进行估计,得到飞机航线以外的风场分布,并对异常值的影响进行相关分析。研究结果表明,将航空器数据用于气象信息反演具有重大意义,该模型用于风场反演有较高的准确度,可靠性高。与目前天气预报数值模型 ECMWF 相比,反演风场具有更高的精度,能够反映出以前不具备的有用细节。在风场反演中,异常值的存在严重影响了结果的准确率,进行异常值的筛选能显著提升风向结果的准确性。风向的整体变化趋势有很大改善,特别是在低空层,风向均方根误差变化平稳,波动较小,基本稳定在区域[6,10]。

**关键词:**空域风场;中尺度气象;ADS-B;Meteo-Particle;ECMWF

**中图分类号:**TN955

**文献标志码:**A

**doi:**10. 16836/j. cnki. jcuit. 2021. 05. 003

## 0 引言

在高空区域很难直接探测到风场信息,并且现有的风场数据存在监测范围小、空间分辨率低等缺点。高空风场的探测资料还需要不断完善和丰富,一方面以适应急剧增长的出行频率所带来拥挤的空中交通流量,另一方面能够为空域气象研究提供数据资料<sup>[1]</sup>。飞机上的许多 ADS-B 设备可以构建实时、动态的传感器网络,ADS-B 信息的定位精度比单个雷达高 1-2 个数量级<sup>[2]</sup>。虽然 ADS-B 报文格式保留了专门用于风向信息的条目,但目前很少有飞机播放这些条目。现阶段主要对策是利用 ADS-B 与 Mode S 数据的融合信息进行风矢量反演,在实际的航空监视作战中有很大的实用价值<sup>[3]</sup>。

近年来,中国一直在大力推进 ADS-B 技术,不断完善相关设备的部署。2020 年 12 月 31 日起,中国全面实施 ADS-B 技术,要求飞行器尽量具备自动广播监视能力。与澳大利亚、美国等相关技术发展成熟的国家相比,中国在相关领域的发展速度较慢,还存在众多问题需要研究解决。目前,国外的 ADS-B 相关技术发展十分成熟,将许多先进复杂的技术如卫星导航、通信、飞机设备和地面设备等融合到一起,能够应用于各大领域。国内 ADS-B 的应用主要可以分为空中监视、防撞系统和辅助进近 3 类<sup>[4-6]</sup>。其中,空中监视相关应用是通过监视系统提供的位置信息来监视飞行状态的一致性,将其应用于飞机一致性监视,其性能优于雷达。场面监视可用于机场场面定位,为低空飞机提供有效的监视。防撞系统相关应用主要包括航迹预测、空中交通警戒和防撞系统(TCAS)、机载间隔保障系统(ASAS),均通过飞机速度、位置等精确信息减少飞行

冲突,从而增加空域容量。辅助进近是通过 ADS-B 与远景合成显示技术相结合,在不扩建机场的同时增加机场跑道数目,进一步削弱飞机的漩涡尾流对飞机按纵队进近的影响,防止跑道入侵。上述 3 类应用发展较为成熟,近几年取得了较快发展,而 ADS-B 数据在其他领域的应用还有待研究。

从整体上看,中国 ADS-B 技术的研究与应用还有着巨大的开发价值。可以预见的是,在航空事业发展进入关键期的情况下,对 ADS-B 技术的需求显得越来越迫切,需要尽快将该技术系统、规划、合理地应用到空中交通管制中。目前国内的相关研究较少,缺乏能够参考的研究算法和应用原理,难以支撑 ADS-B 技术的快速发展。针对以上问题,本文主要研究 ADS-B 数据在气象领域的应用,将 ADS-B 数据用于风场反演,并对风场反演和反演过程中存在的问题进行归纳,从而改进反演结果。

## 1 数据介绍与预处理

研究数据来源于 OpenSky 平台和 Jun S 教授,后期还可在线申请更多数据<sup>[7-8]</sup>。选用 2018 年 1 月 1 日的 ADS-B 数据作为研究数据。ADS-B 技术定位更为精确,信息更新率快,可以实现 0.5 s 接收一次航空器位置信息,定位分辨率达到 10 m 量级。ADS-B 技术的性能明显优于传统的雷达,传统 SSR 雷达由于固有的角分辨率限制,无法分辨距离太近的两个机组,监视精度相对较低。验证数据来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据,分辨率为 31 km, 0.25°。从 ECMWF ERA5 重新分析数据中提取的风场数据,分别为 00 h, 06 h, 12 h 和 18 h 的瞬时数据<sup>[9]</sup>。

目前一共获取了两亿多条 ADS-B 消息数据,并选取代尔夫特理工大学作为研究区域的中心,以便能直观地与目前的研究结果进行对比。首先,筛选了代尔

夫特理工大学周边的数据。以代尔夫特为实验数据分布中心,选取其半径300 km区域范围的数据,最后得到63万条ADS-B消息。其次,按照消息的时间戳对所有数据进行排序,得到一系列有序的消息列表。利用Python的pyModeS库对源数据进行解码,得到用于计算风矢量的参数<sup>[10-12]</sup>。

## 2 风场反演

### 2.1 风信息估计算法

目前,中国获取风信息的主要方法是利用飞机航迹信息,从飞机转弯信息中估计风矢量<sup>[13]</sup>。但该方法不能排除因飞机测量或传输错误引起的不正确的转弯数据,从而导致错误的结果。因此,主要采用降低错误率的方法来估计风矢量。

风矢量主要根据飞行器运动学关系进行计算。理论上,在无风的理想状态下,飞机的空速等于地面速度;而事实上,由于风的存在,各传感器采集到的空速会随着风的变化而变化。当顺风时气流与飞机同向,采集的空速随之变小,即空速小于地速;当逆风时气流与飞机反向,采集到的空速随之变大,即空速大于地速。然后,根据这一内在关系计算风信息。空速矢量 $\vec{V}_t$ 、地速矢量 $\vec{V}_g$ 和风矢量 $\vec{V}_w$ 之间的关系如图1所示。在实际推算中,为了简化计算,需要将风矢量分解为水平分量 $\vec{V}_{wx}$ 和垂直分量 $\vec{V}_{wy}$ <sup>[14-16]</sup>。

$$\vec{V}_w = \vec{V}_g - \vec{V}_t \quad (1)$$

$$\vec{V}_{wx} = \vec{V}_{gx} - \vec{V}_{tx} \quad (2)$$

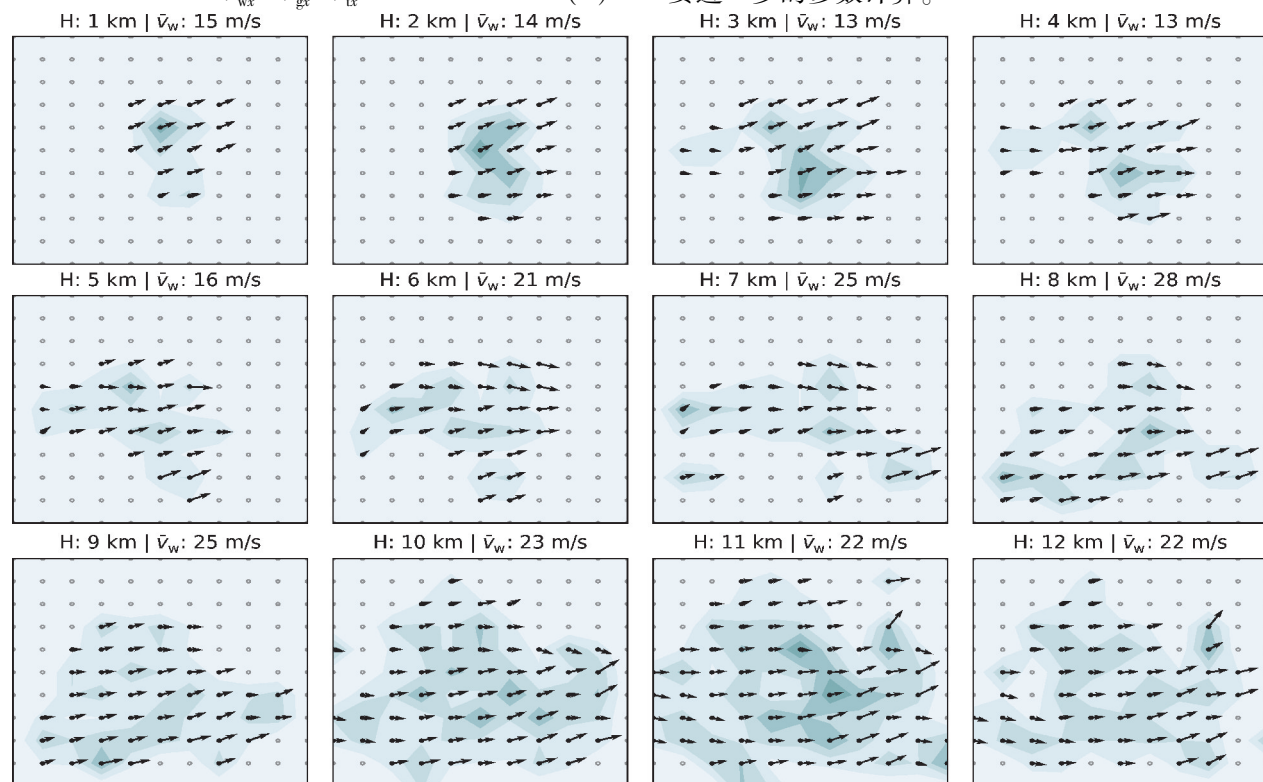


图2 一次风场反演网格图

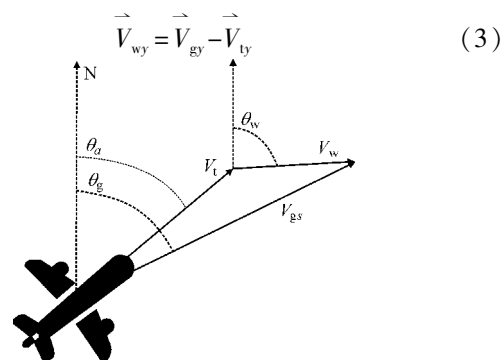


图1 飞机运动矢量关系图

### 2.2 风场反演

通过上一节的算法原理从ADS-B数据中提取出风场信息,但得到的风信息大多分布在飞机航线上,其余部分则比较缺乏。因此,利用Meteo-Particle粒子模型对风矢量进行估计,得到飞机航线以外的风场分布<sup>[14]</sup>。图2是2018年1月1日11:59:10-12:00:50的一次反演风场图,一共包括从1~12 km共12个高度层,每个高度层上是600×600 km的小风场图,其中每个分辨率是60×60 km。图2表明,低空层的数据明显少于高空层,随着高度的增加,风场信息也逐渐增加。图3是12:00:00时刻的ECMWF风场网格图,可以看到,由于网格固定且更新时间间隔较大,因此基于再分析数据集生成的插值模型通常过于平滑<sup>[17-18]</sup>。在低分辨率气象数据集中,风场通常没有局部变化。比较分析两图的细节情况表明反演结果与验证数据风速和风向一致性好,且反演结果精度较高,具体的对比还需要进一步的参数计算。

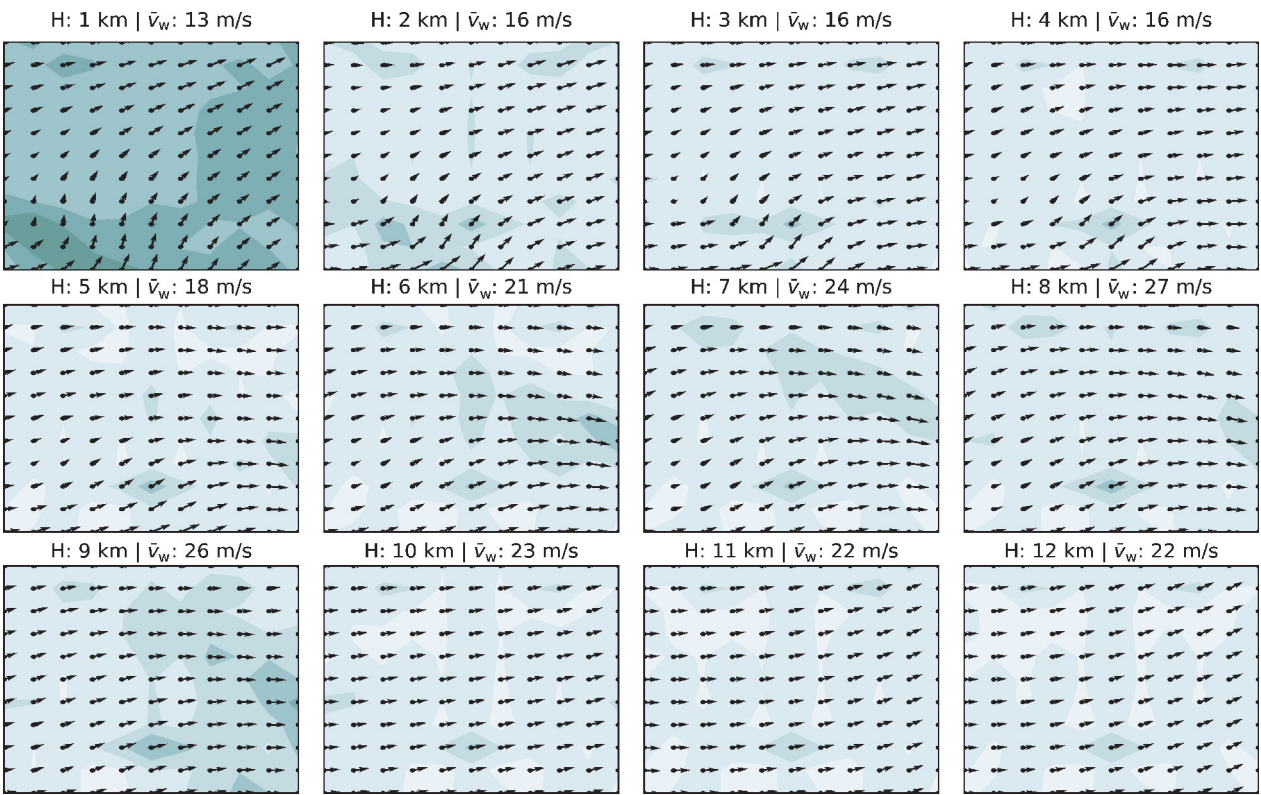


图3 ECMWF 风场网格图

2.3 风场反演准确性评估

为定量评估风场反演效果,均方根误差  $rmse$  和相关性指标  $correlation$  分别被定义为

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum (A_r - A_l)^2}{N}} \tag{4}$$

$$correlation = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\sum A_r \cdot A_l}{\sqrt{\sum A_r^2 \cdot A_l^2}} + \frac{\sum (A_r - \bar{A}_r)(A_l - \bar{A}_l)}{\sqrt{\sum (A_r - \bar{A}_r)^2 \sum (A_l - \bar{A}_l)^2}} \right) \tag{5}$$

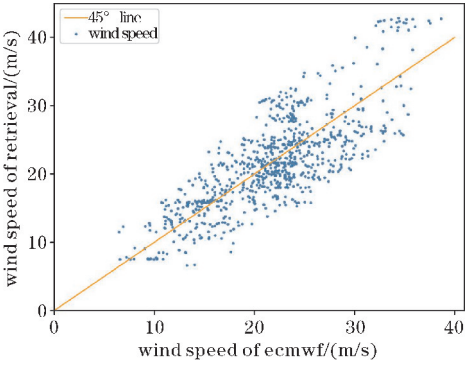
其中,  $A_r$ 、 $A_l$  分别为反演值、验证值,  $\bar{A}_r$ 、 $\bar{A}_l$  分别为其对应均值。  $N$  是所有格点的总数。

采用4个时段的 ADS-B 数据反演风场,与验证数据的比较结果如表1所示,结果表明反演准确性较高,其中风速相关性达到0.67,风速和风向各时段的均方根误差均值分别为6.065 m/s,9.895°,效果理想。但是,23:56:40–00:03:20时段风速和风向的反演准确性较

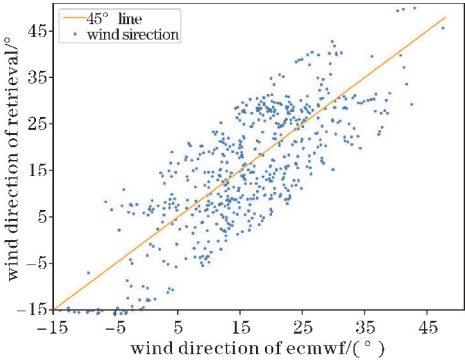
表1 各时间段风速风向误差对比表

时段(UTC)	rmse/(m/s)	correlation
23:56:40–00:03:20	7.94	0.67
05:56:40–06:03:20	6.46	0.88
11:56:40–12:03:20	5.19	0.86
17:56:40–18:03:20	4.67	0.89
23:56:40–00:03:20	10.62	0.53
05:56:40–06:03:20	9.20	0.90
11:56:40–12:03:20	9.42	0.78
17:56:40–18:03:20	10.34	0.90

差,这可能是由于缺乏数据点造成的。整体看,风速的反演效果优于风向,且性能更稳定。图4是风场反演值与ECMWF验证值的散点图,可以看出,反演结果与验证数据有较强的相关性,风速误差大部分集中在8 m/s内,风向误差主要集中在10°以内,具有一定的参考价值。



(a) 风速估计值



(b) 风向估计值

图4 风场反演值与ECMWF验证值的散点图



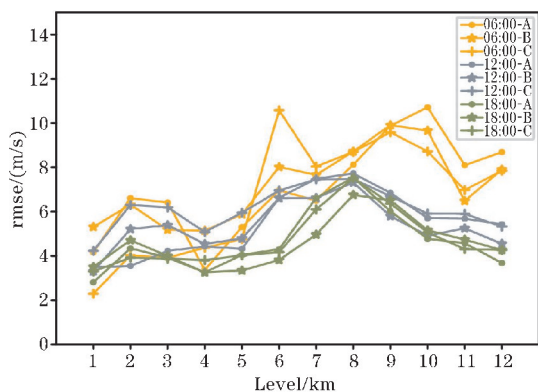
### 3 异常值对风场反演准确性的影响探究

在实验过程中发现,同一时段的不同数据有时准确度波动较大,进一步分析原因发现,数据存在部分异常值。这些异常值影响着准确度的波动,因为评价指标  $rmse$  和  $correlation$  对一组测量中的特大或特小误差反应非常敏感,所以异常值的处理是非常重要的。在不同海拔高度上比较分析其各项指标的变化情况,研究是否进行异常值筛选对反演结果准确性的影响。在实验中,分别选取 06:00、12:00 和 18:00 各个时段中的 3 段数据用于风场反演,分别对比异常值筛选前后的结果差异,并计算验证指标。

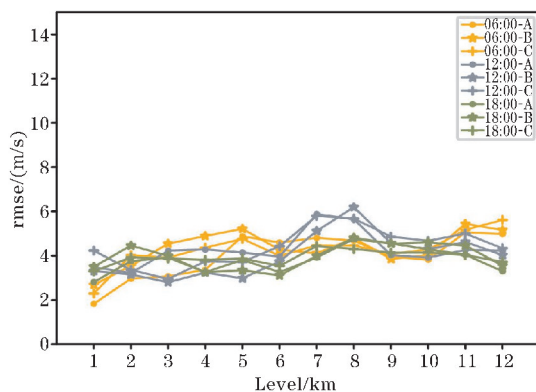
实验结果如图 5 所示,对于风速而言,进行异常值筛选后结果有一定的改善,风速的波动有一定程度的缓和。影响较大的是 06:00 时段,表明该时段存在较

多异常值,且主要出现在高空层,可能是由于数据量偏少。异常值筛选后风速  $rmse$  都稳定在区域  $[2, 7]$ , 较小范围波动,准确性较高。对于风向而言,异常值筛选后,结果有显著提升。风向整体变化趋势有很大变化,特别是在低空层,  $rmse$  值有明显改善,从  $[6, 80]$  降低到  $[6, 11]$ , 使得风向  $rmse$  基本稳定在区域  $[6, 10]$ , 且数值变化平稳,波动较小。

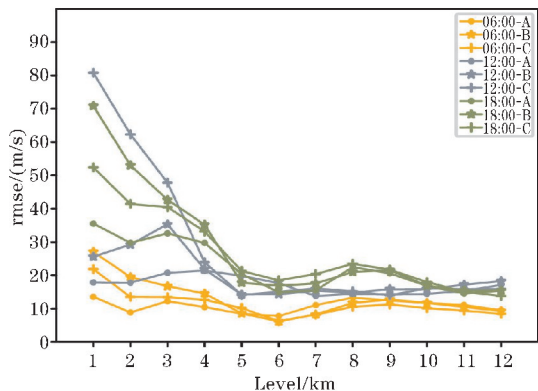
比较异常值筛选(风速阈值设为  $15 \text{ m/s}$ , 风向阈值设为  $20 \text{ m/s}$ ) 结果发现,对于风速反演而言,数据量的大小与反演的准确性有较大关系。而对于风向反演,异常值主要出现在 1~3 层,可见该模型在 1~3 层的抗异性不太好,在 4~12 层异常值较少,抗异性较好。进一步分析原因发现,1~3 层的数据量相比高层明显偏少,故该模型对于数据量较少的情况反演效果不佳,出现较多异常值。



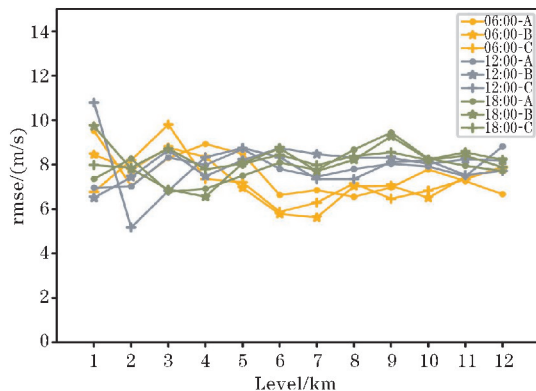
(a) 风速  $rmse$  变化折线图



(b) 异常值筛选后风速  $rmse$  变化折线图



(c) 风向  $rmse$  变化折线图



(d) 异常值筛选后风向  $rmse$  变化折线图

图5 风速  $rmse$ 、风向  $rmse$  异常值筛选前后对比折线图

总体来说,风速反演的准确性要高于风向反演的准确性。但由于所用反演方法得到的风场精度要高于验证数据 ECMWF ERA 5 重分析数据,单一指标不能完全说明问题,因此还计算了  $correlation$  指标,结果对

比如图 6 所示。进行异常值筛选前后,风速  $correlation$  的整体变化趋势几乎没有改变,对低空层有细微的影响。风向的准确性得到很大提升,该结果与  $rmse$  指标反映的问题基本一致。

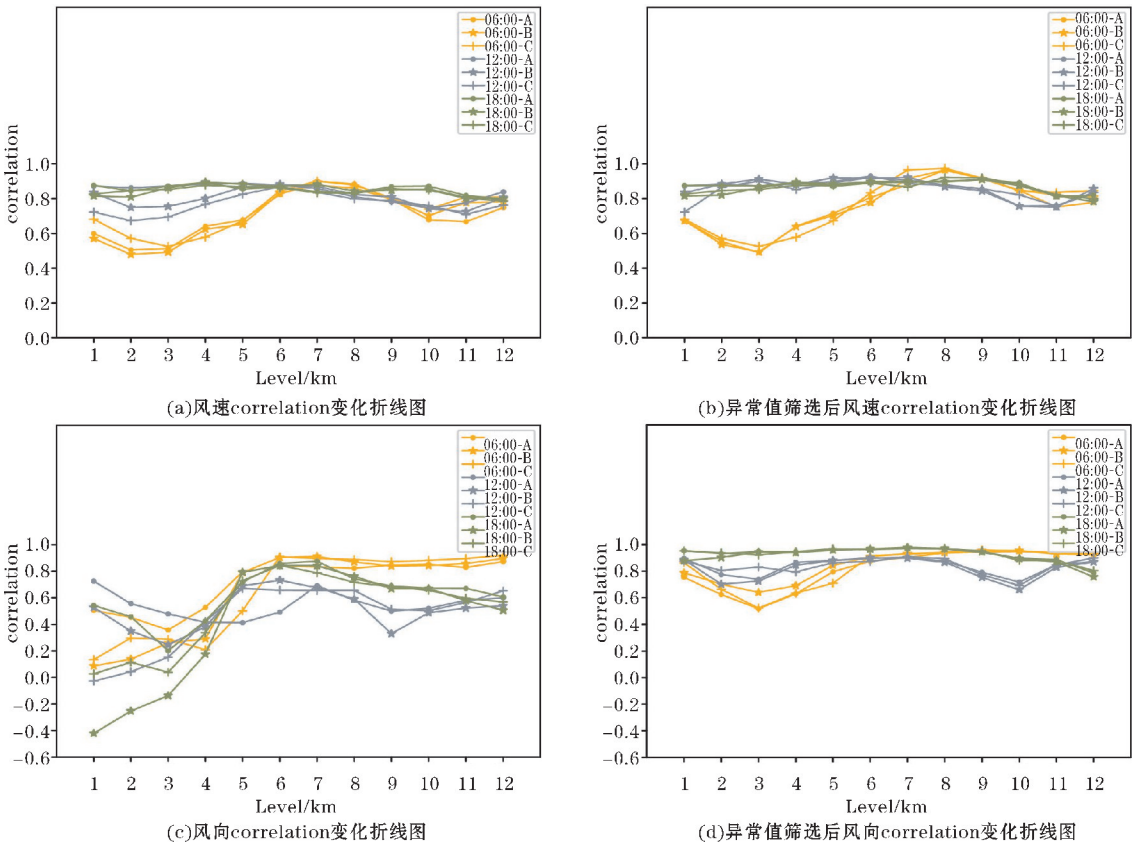


图 6 风速 correlation、风向 correlation 异常值筛选前后对比折线图

4 结束语

针对空域风场资料的数据匮乏问题,研究了高空风场反演方法。利用 MP 模型将 ADS-B 数据用于风场反演,并对其准确性和精度进行评估分析。同时,对比研究了异常值对该模型的影响。结果表明,将航空器数据用于气象信息反演有重大意义,该模型用于风场反演有较高的准确度,可靠性较强。与目前天气预报数值模型相比,反演风场具有更高的精度,能够反映出以前不具备的有用细节。不仅为气象领域高空风场的研究提供了参考资料,还有利于空中交通管理的改善。此外,异常值的存在极大地降低了反演结果的准确性,因此,异常值的处理相当有必要,能够减少一定程度的错误率。

中国正处于大力发展 ADS-B 技术的阶段,研究的方向还有很大的发展空间,未来将集中研究模型的参数优化、在气象领域的适应性等,得到比较完善且准确的反演风场及结果评估系统。

参考文献:

[1] 魏全坤. 浅谈 ADS-B 在空中交通管制中的应用

实践[J]. 通讯世界,2020,27(6):117-118.

[2] De Jong PM, Laan JV, Veld AI, et al. Wind-profile estimation using airborne sensors [J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(6):1852-63.

[3] 唐勇,何东林,朱新平. 广播式自动相关监视与二次雷达的数据融合及应用[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(2):159-162.

[4] 马兰,高永胜. 基于 ADS-B 数据挖掘的 4D 航迹预测方法[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(4):1-4.

[5] 周波,曹博,唐鹏,等. 基于 ADS-B 的新型跟踪监视算法[J]. 光电与控制, 2014, 21(7):41-45.

[6] 李洪伟,章学锋,易东,等. ADS-B 被动监视防撞告警系统设计[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(6):6-11.

[7] Schäfer M, Strohmeier M, Smith M, et al. OpenSky report 2018: assessing the integrity of crowdsourced mode S and ADS-B data. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC) [C]. IEEE, 2018:1-9.

[8] Sun J, Vũ H, Ellerbroek J, et al. Ground-based wind field construction from mode-s and ads-b data with a novel gas particle model[J]. In Proceedings of the

- Seventh SESAR Innovation Days,2017,28:30.
- [9] Hrastovec M, Solina F. Obtaining meteorological data from aircraft with Mode-S radars [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,2013, 28(12):12–24.
- [10] Sun J, Vû H, Ellerbroek J, et al. pymodes: Decoding mode-s surveillance data for open air transportation research[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2019,21(7): 2777–2786.
- [11] 张鹏,何光亮. 1090ES 关键信息解码算法优化及实现[J]. 现代电子技术,2018,41(3):30–35.
- [12] 王菲. 基于 1090MHz ES 数据链 ADS-B 关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.
- [13] 刘涛,廖伟,卿烈华,等. 基于 ADS-B 数据的风矢量反演方法[J]. 成都信息工程大学学报, 2020,35(4):412–418.
- [14] Sun J, Vû H, Ellerbroek J, et al. Weather field reconstruction using aircraft surveillance data and a novel meteo-particle model [J]. PloS one. 2018,13(10).
- [15] de Haan S. An improved correction method for high quality wind and temperature observations derived from Mode-S EHS[M]. KNMI,2013.
- [16] De Leege A M P, Van Paassen M M, Mulder M. Using automatic dependent surveillance – broadcast for meteorological monitoring[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(1): 249–261.
- [17] de Haan S. High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by Mode-S air traffic control radar [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2011,116(D10).
- [18] Strajnar B. Validation of Mode-S meteorological routine air report aircraft observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D23).

## Research on Wind Field Retrieval based on ADS-B and the Influence of Outliers

ZHU Jiahui<sup>1</sup>, WANG Haijiang<sup>1</sup>, XU Zili<sup>2</sup>, LI Jing<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** At present, the main detection methods of aerial wind field still rely on sounding balloons, radiosondes and anemometers. The coverage of wind field data obtained by these methods is relatively sparse, and the accuracy of the data can not meet the research needs of mesoscale meteorology and aeronautical meteorology. In view of the low accuracy, small monitoring range and low spatial resolution of the wind field in the high altitude area, the wind field is retrieved with ADS-B data. The Meteo-Particle model is used to estimate the wind vector to obtain the wind field distribution outside the aircraft route, and the influence of outliers is analyzed. The results show that: it is of great significance to apply aircraft data to meteorological information retrieval, and the model has high accuracy and reliability in wind field retrieval. Compared with the current weather forecast numerical model ECMWF, the retrieval wind field has higher accuracy and can reflect the useful details which are not available before. In the wind field inversion, the existence of outliers seriously affects the accuracy of the results, and the screening of outliers can significantly improve the accuracy of wind direction results. The overall change trend of the wind direction has been greatly improved, especially in the low altitude, the root mean square error of the wind direction changes steadily and fluctuates little, and is basically stable in the region [6,10].

**Keywords:** aerial wind field; mesoscale meteorology; ADS-B; Meteo-Particle; ECMWF