

文章编号: 2096-1618(2021)05-0479-06

# Meteo-particle 模型在 ADS-B 风场反演中的性能研究

朱嘉慧<sup>1</sup>, 王海江<sup>1</sup>, 李静<sup>2</sup>, 徐自励<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, 飞机传感器数据已成为重要的气象观测信息的来源。将广播式自动相关监视(ADS-B)和二次雷达(SSR)技术获取的航空器数据用于估计风。通过评估反演结果, 探讨了将飞机作为气象信息传感器的可行性。根据 ADS-B 和 Mode S 数据的优势, 利用 Meteo-particle (MP) 模型进行高空风场反演。将反演结果与欧洲中期天气预报模型的 ERA 5 再分析数据进行对比, 分析了反演结果的精度和准确性, 进一步研究 MP 模型在气象模式下的适应性能。此外, 本文将二维的风场结果扩展到三维场进行显示, 使交通管制员更好地监管空域风场情况。研究表明: 将航空器数据用于高空风场的反演具有较高的可行性, 极大提高了高空风场的反演精度。风场反演模型在不同高度和时段的适应性能存在差异, 研究结果对后期模型的改进有一定帮助。

**关键词:**广播式自动相关监视; 二次雷达; Meteo-particle; 风场反演; 航空器

**中图分类号:** TN955

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.05.001

## 0 引言

近年来, ADS-B 技术在中国民航领域得到了飞速发展<sup>[1-2]</sup>。国外也有许多研究学者将 ADS-B 数据用于高空风场导出, 用于飞机运行参数的设置和调整。通过捕捉风场变化调整飞机参数, 达到飞机的最佳运行状态。实际上, 高精度的高空风场资料在中国十分匮乏<sup>[3]</sup>, 相关研究也发展较慢。因此需要大力开展相关研究来推动 ADS-B 技术的发展。随着出行频率的急剧增长, 空中交通日益拥堵, 研究人员需要采取一系列措施提高空域中的飞机容积率<sup>[4]</sup>。掌握空中的气象信息, 有利于更好地制定航班运行机制。进一步减少飞机之间的运行间隔, 增加飞机容量。同时, 相关气象信息也可以减少空中交通事故的发生, 在一定程度上保障飞行安全。因此, 二次雷达(SSR)和自动相关监视广播技术(ADS-B)需要快速发展弥补这一不足<sup>[5-6]</sup>。

在现阶段高空风场研究的基础上, 对现有的高空风场反演方法进行结果评估。并根据评估结果对方法进行调整, 最终得到多元化的风场结果。结果表明, 将航空器数据用于高空风场的反演具有较高的可行性, 极大地提高了高空风场的反演精度。该方法能够为航空、气象等领域提供数据参考, 便于进一步研究。提出一套风场反演准确性的验证方案; 优化反演模型, 改进

算法结果; 将风场结果扩展到三维场显示, 使得结果更加直观。

## 1 研究数据集

实验数据是来自荷兰的代尔夫特理工大学的 ADS-B / Mode-S 数据<sup>[7-8]</sup>。其中, 用于风场反演的数据包括 2018 年 01 月 01 日世界标准时 09:00-10:00、00:00:00、06:00:00、12:00:00 和 18:00:00 前后半小时的 ADS-B 数据与 Mode S 数据<sup>[9-10]</sup>。其余部分数据来自 OpenSky 平台<sup>[11]</sup>。参考数据是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 再分析数据。包括 2018 年 01 月 01 日世界标准时 00:00、06:00、12:00 和 18:00 瞬时风数据, 空间分辨率为 0.25°。

## 2 风场反演及结果评估

### 2.1 风场反演模型

研究了 Sun 等<sup>[7]</sup>提出的风场反演模型, 并对其研究结果进行评估。根据评估结果对模型进行相应调整, 使其更适合气象模式的风场反演。同时为更直观地观测风场结果, 将风场在三维场进行显示<sup>[12]</sup>, 但只存在二维的风场数据, 不计入垂直方向的风分量。

由 ADS-B 和 Mode S 资料得到的风场信息几乎都

分布在航线上,而航路以外的一些区域仍然缺乏风观测<sup>[13-15]</sup>。因此,为了计算低测量密度区域的风场,采用等<sup>[7]</sup>提出的 Meteo-particle (MP) 模型对风矢量信息进行扩展,得到更加丰富的风场资料,图1是MP模型的流程图。MP模型用于气象信息的反演存在一些不足,用于气象领域还需要一定的调整。后期本文将致力于模型参数的改进。

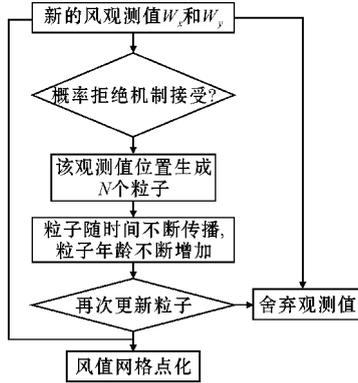


图1 MP模型流程图

### 2.1.1 随机游走模型

为将风场信息扩展到航线以外的区域,采用随机游走模型。首先在接受的观测值位置生成  $N$  个携带风矢量状态的粒子对象,风矢量状态与原始观测值存在细微的偏差。且每个粒子在生成时被赋予年龄参数,每个粒子遵循不同的模型随时间传播和衰减。每次更新会剔除年龄参数超过阈值范围和传播位置超出边界的粒子。随机游走模型如式(1)、(2)所示。

$$\begin{pmatrix} x_{p,i,t+1} \\ y_{p,i,t+1} \\ z_{p,i,t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p,i,t} \\ y_{p,i,t} \\ z_{p,i,t} \end{pmatrix} + \Delta P_t \quad (1)$$

$$\Delta P_t \sim N \left[ \begin{pmatrix} K_2 u_p \\ K_2 v_p \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sigma_{p_x}^2 & \sigma_{p_{xy}} & 0 \\ \sigma_{p_{xy}} & \sigma_{p_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{p_z}^2 \end{pmatrix} \right] \quad (2)$$

其中,  $t$  表示当前时刻,  $t+1$  表示下一时刻,  $u_p, v_p$  分别是风矢量的水平分量和垂直分量。在水平位置上风分量以比例系数  $K_2$ , 沿风向以较小的偏差  $\sigma_p^2$  执行随机游走,  $K_2$  可控制传播方向。在垂直方向上,传播遵循零均值高斯游走。

随机游走模型中产生的每个粒子被分配一个初始值为 0 的年龄参数,并且粒子的年龄随着粒子传播增加。每次更新结束时,所有当前粒子都将重新采样。首先剔除传播到边缘区域以外的粒子,并计算剩下粒子的年龄概率  $p(\alpha)$ , 定义如式(3)所示,最后留下年

龄概率较高的粒子。

$$p(\alpha) = e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma_\alpha^2}} \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  是粒子的年龄,  $\sigma_\alpha$  是控制参数。

### 2.1.2 验证指标

为了定量衡量风场反演的误差,引入评价指标,从多方面分析误差大小及误差来源。结合 ADS-B 和 Mode S 数据反演风场的特点,其高精度的数据资料使风场具有比验证数据更多的细节。因此,对于许多精细的风场信息无法通过单一指标反应。为了解决这个问题,减少该因素的影响,本文引入一个综合评价指标 Combine, 该指标旨在平衡皮尔逊相关系数 (COR) 和余弦相似系数 ( $R$ ) 的单一性,可以更好地反映出结果的准确性,相关定义如式(4)~(6)所示。

$$\text{COR} = \frac{\sum (\bar{V}_{\text{Retr}} - \bar{V}_{\text{Retr}}) (\bar{V}_{\text{True}} - \bar{V}_{\text{True}})}{\sqrt{\sum (\bar{V}_{\text{Retr}} - \bar{V}_{\text{Retr}})^2} \sqrt{\sum (\bar{V}_{\text{True}} - \bar{V}_{\text{True}})^2}} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum \bar{V}_{\text{Retr}} \cdot \bar{V}_{\text{True}}}{\sqrt{\sum \bar{V}_{\text{Retr}}^2} \cdot \sqrt{\sum \bar{V}_{\text{True}}^2}} \quad (5)$$

$$\text{Combine} = \frac{1}{2} \cdot \text{COR} + \frac{1}{2} \cdot R \quad (6)$$

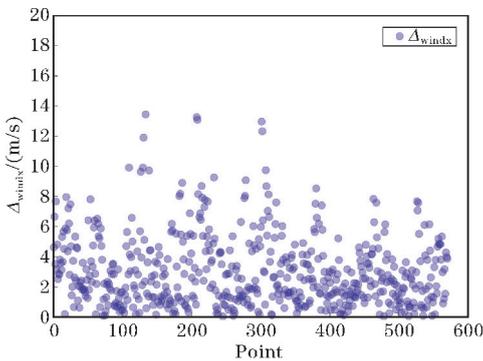
## 2.2 实验与结果验证

选取 2018 年 01 月 01 日世界标准时 00:00、06:00、12:00 和 18:00 的 ADS-B 和 Mode S 数据进行风场反演。在空间建立水平分辨率为  $60 \times 60$  km, 垂直分辨率为 1 km, 总规格为  $600 \times 600 \times 12$  的均匀网格点。进行一次 17:59:10-18:00:50 时段的风场反演,为验证反演风场和 MP 模型的正确性,选取 ECMWF ERA5 再分析数据中的瞬时风作为参考数据。初步比较两个风场结果发现,风场的分布基本一致。而 ECMWF ERA5 再分析数据是平滑后的数据,缺少风场变化细节。用 ADS-B 数据反演得到风场具有更高的精度,包含的细节变化更多。同时,为了解风信息的水平分量和垂直分量误差的具体分布情况,统计散点分布图(图2)<sup>[16-17]</sup>,其中图2(a)是  $u$  分量差值散点分布图,图2(b)是  $v$  分量差值散点分布图。结果表明风速结果优于风向,风速差主要集中于  $[0, 4]$ , 风向差主要分布在  $[0, 8]$ , 整体效果理想。从风速和风向的角度分析,风速和风向的变化趋势比较一致,其中风向一致程度高于风速,反演数据反映较多的细节波动,风速存在部分较大的突变,有可能是异常值,也有可能是原本就存在风速的突变,具体原因有待进一步研究。为更好地反映反演误差的实际情况,计算了误差分析的相关评价指标,结果如表1所示。

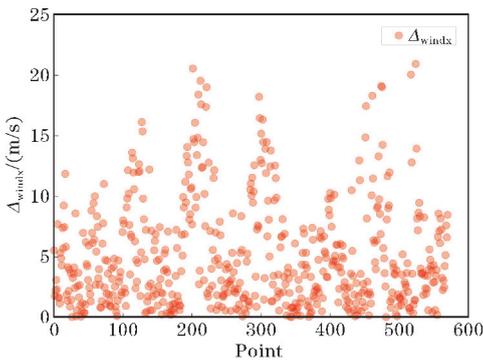
表 1 各时间段  $u, v$  误差对比表

时间段	COR	R	Combine
23:56:40-00:03:20	0.34	0.99	0.67
05:56:40-06:03:20	0.82	0.98	0.90
11:56:40-12:03:20	0.74	0.97	0.86
17:56:40-18:03:20	0.79	0.97	0.88
23:56:40-00:03:20	0.23	0.94	0.58
05:56:40-06:03:20	0.84	0.88	0.86
11:56:40-12:03:20	0.40	0.72	0.56
17:56:40-18:03:20	0.77	0.77	0.77

观察结果发现,从每组数据中反演风矢量的  $u, v$  分量是可靠的,总体精度基本在 60% 以上。其中,00:00:00 前后反演结果的 COR 指标低于 40%,进一步分析发现,主要原因是与其他时段相比,00:00:00 前后的数据量非常小,反演中的粒子数只占其余时段的小部分。总体上,MP 模型在高空风场反演中效果理想,准确率较高。通过对比反演结果,发现本文反演的风场与 ERA5 风场具有一致的风场剖面,前者风场更为细致,捕捉到的变化更细微,对航空运行安全和气象研究具有重要意义。



(a)  $u$  分量



(b)  $v$  分量

图 2 差值散点分布图

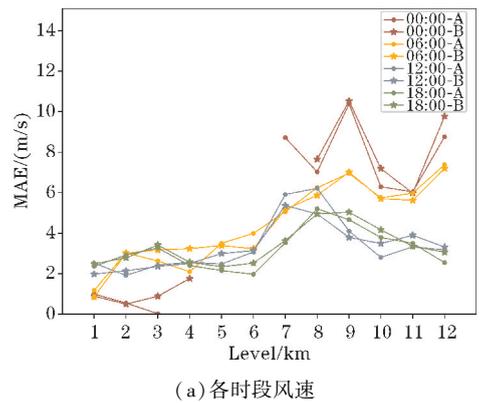
### 3 不同时段和不同高度层下的误差分析

上述评估结果表明,不同时段和不同高度层的风

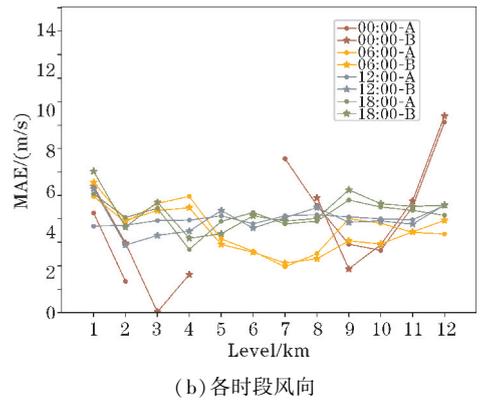
观测样本数量差别较大,因此反演效果也存在较大差异。为进一步分析 MP 模型在不同时段和不同高度下的适用性,本文在两种情况下分别进行反演实验,并对误差结果进行比较分析。

#### 3.1 不同时段下的误差分析

首先选取 00:00、06:00、12:00、18:00 及其附近时段的数据进行风场反演,图 3(a)、(b) 所示的结果分别是 4 个时段风速和风向的 MAE 变化折线图,结果表明 00:00 时段风速和风向估计的稳定性较低,在许多高度层上均没有反演值。产生这些问题的可能原因:对于 MP 模型,数据点越多,反演效果越好。与其他高度层相比,00:00 时段各个高度层的数据点太少,有的高度层甚至没有观测值,因此结果可能不理想。鉴于以上原因,00:00 时段的结果对分析模型的适用性和准确性有很大影响,因此本文拟剔除 00:00 时段的数据结果。



(a) 各时段风速



(b) 各时段风向

图 3 MAE 指标变化折线图

图 3 表明,风速反演的准确性要高于风向反演,其中,各时段风速的 MAE 指标变化基本一致,MAE 值在 [1,8],低空层的结果优于高空层。风向 MAE 值在 [4,14],随高度变化波动较大,但均在较小可接受范围内波动。结合风速和风向的分布,18:00 时段的结果最稳定,波动相对较小,00:00 时段效果不佳,波动极大。通过对比发现,18:00 的数据量最多,相应地反

演结果也最准确、最稳定,可见,MP模型不适合用于数据量过少的风场反演。总体上,除了00:00时段,风速和风向的反演结果是理想的,且比较稳定。总体稳定性是18:00>12:00>06:00>00:00。

### 3.2 不同高度层下的误差分析

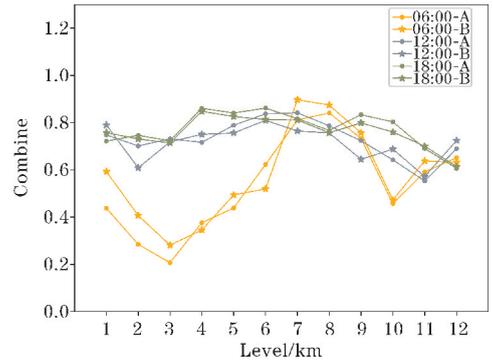
选取18:00时段的数据,计算各个指标在不同高度水平下的分布,表2列出了各项指标值。由于反演方法得到的风场精度高于ECMWF ERA5再分析数据,现有指标不能完全说明问题。为了更好地评价反演结果,本文引入皮尔逊相关系数和余弦相似性的组合作为综合指标Combine。它从数值变化的相对幅度和方向的同步变化两个方面来衡量结果,弥补了单一指标的不足。

表2 不同高度层误差对比表

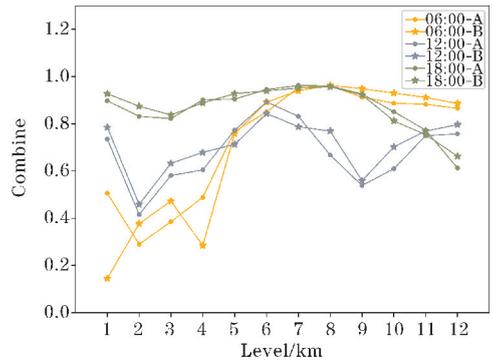
	高度层/km	MAE/(m/s)	COR	R	Combine
wind	1	2.42	0.58	0.95	0.76
	2	2.79	0.55	0.93	0.74
	3	3.49	0.46	0.92	0.69
	4	2.55	0.73	0.96	0.85
	5	2.35	0.68	0.98	0.83
	6	2.63	0.62	0.97	0.80
	7	3.73	0.64	0.97	0.81
	8	4.89	0.56	0.96	0.76
	9	5.13	0.62	0.96	0.79
	10	4.15	0.55	0.98	0.77
	11	3.40	0.42	0.99	0.70
	12	3.10	0.24	0.99	0.61
direction	1	11.63	0.95	0.93	0.94
	2	7.67	0.86	0.87	0.87
	3	8.87	0.87	0.85	0.86
	4	6.54	0.88	0.89	0.89
	5	6.80	0.92	0.92	0.92
	6	8.45	0.93	0.93	0.93
	7	7.77	0.94	0.96	0.95
	8	7.96	0.95	0.96	0.96
	9	10.55	0.93	0.91	0.92
	10	9.32	0.79	0.82	0.81
	11	9.23	0.73	0.76	0.75
	12	9.23	0.65	0.67	0.66

图4为各时段风速、风向Combine指标变化折线图。结果表明,大部分时段风速Combine都在50%以上,而且其中多数时段高于70%,结果有很强的相关性;小部分时段的相关性小于50%,反演效果不太理想。风向的Combine大多在70%以上,效果较好,小部分在50%以下,结果稍差。进一步分析发现,较低

时段基本出现在06:00,原因与上述相同,数据点相对较少,结果较差。综合各个时段的结果来看,中高度层的准确度相对稳定,普遍高于其他层,而低高度的稳定性则相对较低,主要还是受到数据量的影响。



(a) 各时段风速



(b) 各时段风向

图4 Combine指标变化折线图

## 4 三维结果可视化

MP模型实际上是为研究飞机性能而提出的粒子模型,如果要将其应用于气象和航空气象领域,需要对模型进行一些调整。为加强空中目标监视,增加空域流量、将反演的风场应用于空中交通管制和预警、填补高空区域风场探测资料的空白,需要更精细、更可观的风场信息。二维的显示不能直观地反映风场的空间结构分布,因此将其扩展到三维空间,以便以后的直接应用。针对上述问题,本文进行了以下三维可视化实现。

将反演得到的共12层风场信息在三维空间中共同显示。三维空间场是600×600×12 km的网格场,将12层的风场数据信息集中显示,更具有空间感。三维显示能够让交通管制人员更加直观地观察整个区域的风场分布情况,从而对空中交通做出及时的指示。图5和图6是三维可视化的结果,反演的风场信息主要是西东风,这符合荷兰地区的风场分布情况,因为荷兰的西东风非常稳定且占主导地位。根据观察图5发

现,相比低海拔区域的观测值,高海拔区域的观测值有很大的数量优势。从图6的视角可以清楚地观察风速和风向随高度和位置变化的情况,在低海拔区域风速一般较低。随着高度的上升,风速逐渐开始增大,而风向也有一定的变化。未来可以把空中交通定位技术和气象信息结合起来,完善空中交通监视机制,将高精度的高空风场变化情况和飞机的飞行情况进行整合,能够实时地显示出来。

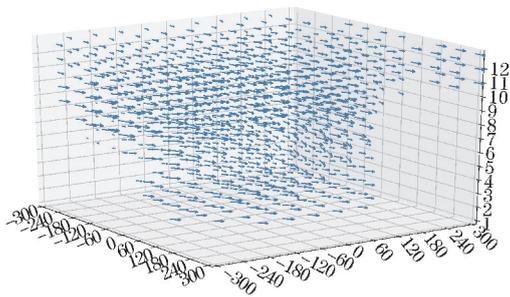


图5 风场三维可视化结果

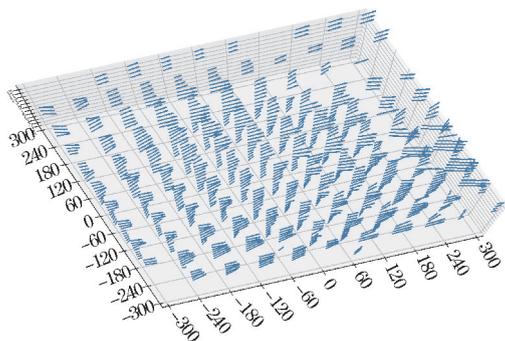


图6 风场三维可视化结果

## 5 结束语

利用 Sun 等提出的 MP 粒子模型,利用飞机传感器获得的 ADS-B 和 Mode S 数据反演高空风场,对反演结果的准确性与精度进行研究,提出模型结果的评估方法,具有重要的参考意义。新的评估方法弥补了之前单个指标评估的单一性,从多角度评估结果,能更加真实地反应结果的准确性。目前研究反演得到的风场覆盖范围不完整,通常会以较大的局部精度进行滤波来过滤较大的区域,而引入航空器数据之后,对高空风场精度的提高有很大帮助。高精度的高空风场信息对航空和气象领域的相关研究都有一定的参考价值。同时,本文对模型在不同高度和时段下的性能进行研究。结果发现,模型在低高度层的准确性明显低于较高层,在 00:00 时的准确性也明显低于 18:00 时的性能。进一步分析原因发现,上述结果与参与风场反演

的航空器的数据量有很大关系。数据量偏低会使模型的准确性偏低,这对模型的进一步改进有参考意义。此外,本文将二维的风场结果扩展到三维场进行显示,使交通管制员更好地监管空域风场情况。

致谢:感谢民航专业项目(ASSA2021-61)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 吕春利. 民航航空运行对 ADS-B 技术的应用[J]. 科技资讯,2015,13(5):24.
- [2] 崔盟霞,王杰. 自动相关监视(ADS-B)在民航的应用前景分析[J]. 大众科技,2011(4):15.
- [3] 崔世锋,程正飞,吴月友. 安徽省安庆地区高空风特征分析[J]. 安徽农业科学,2010,38(22):11803-11805.
- [4] 黄成涛,王立新,钟伯文. 高空风对大型客机航线性能的量化影响[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(7):1348-1354.
- [5] 王洪,刘昌忠,汪学刚. 二次雷达 S 模式综述[J]. 电讯技术,2008(7):113-118.
- [6] 许凡. ADS-B 技术在我国通用航空中的发展与前景研究[J]. 科技展望,2016,26(22):154.
- [7] Sun J, Vù H, Ellerbroek J, et al. Weather field reconstruction using aircraft surveillance data and a novel meteo-particle model[J]. PloS one,2018,13(10).
- [8] de Haan S, de Haij M, Sondij J. The use of a commercial ADS-B receiver to derive upper air wind and temperature observations from Mode-S EHS information in The Netherlands[M]. KNMI,2013.
- [9] Strajnar B. Validation of Mode-S meteorological routine air report aircraft observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2012,16:117.
- [10] 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.
- [11] Schäfer M, Strohmeier M, Smith M, et al. OpenSky report 2018: assessing the integrity of crowd sourced mode S and ADS-B data[C]. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference(DASC),2018:1-9.
- [12] Liou GJ, Jan SS. Using on air UAT/ADS-B signal to simulate 3D aviation weather information[C]. In Proceedings of IEEE/ION PLANS 2014,2014:671-679.

- [13] De Haan S, Stoffelen A. Assimilation of high-resolution Mode-S wind and temperature observations in a regional NWP model for nowcasting applications[J]. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(4): 918-937.
- [14] 熊菁, 秦子增, 程文科. 回收过程中高空风场的特点及描述[J]. *航天返回与遥感*, 2003(3): 9-14.
- [15] Huy V. ADS-B and Mode S Data for Aviation Meteorology and Aircraft Performance Modelling[D]. MS thesis, Fac. Aerosp. Eng., Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, 2018.
- [16] Amidror I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey[J]. *Journal of electronic imaging*, 2002, 11(2): 157-76.
- [17] Stead SE. Estimation of gradients from scattered data[J]. *The Rocky Mountain Journal of Mathematics*, 1984, 14(1): 265-279.

## Study on the Performance of the Meteo-particle Model in Wind Field Retrieval with ADS-B

ZHU Jiahui<sup>1</sup>, WANG Haijiang<sup>1</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, XU Zili<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, aircraft has become an important source of meteorological observation information. The aircraft data obtained by automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) and secondary Surveillance Radar (SSR) technology are used to estimate the wind. By evaluating the retrieval results, this paper discusses the feasibility of using aircraft as a meteorological information sensor. According to the advantages of ADS-B and Mode S data, the Meteo-particle (MP) model is used to retrieve the high-altitude wind field. The retrieval results are compared with the ERA5 reanalysis data of the European medium-range weather forecast model, the precision and accuracy of the retrieval results are analyzed, and the adaptive performance of the MP model in the meteorological model is further studied. In addition, this paper extends the results of the two-dimensional wind field to the three-dimensional field for display, so that the traffic controllers can better supervise the airspace wind field. The results show that it is feasible to use aircraft data to retrieve the high-altitude wind field, which greatly improves the retrieval accuracy of high-altitude wind field. The adaptive performance of the wind field retrieval model is different in different heights and periods, and the research results are helpful to the improvement of the later model.

**Keywords:** automatic dependent surveillance broadcast; secondary surveillance radar; Meteo-particle; wind field retrieval; aircraft data