

文章编号: 2096-1618(2020)04-0412-07

基于 ADS-B 数据的风矢量反演方法

刘涛^{1,5}, 廖伟², 卿烈华³, 徐自励⁴, 王元楷¹, 王海江^{1,5}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 成都信息工程大学物流学院, 四川 成都 610225; 3. 民航甘肃空管分局, 甘肃 兰州 730087; 4. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041; 5. 中国气象局大气探测重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 在影响航空安全运行的重要因素中, 风场是最重要的航空气象信息之一。现有的风场探测技术如雷达、探空等存在诸多不足; 实时性和高时空分辨率等应用需求对机场风场探测提出了新挑战。基于广播式自动相关监视(ADS-B)数据的风场反演是一种新颖的方法, 能有效地解决机场风场探测和重构的实时性和分辨率问题。风场探测的前提步骤是风矢量的反演, 就此展开研究。对局部空间和时间内的风矢量进行建模和反演方法的研究, 并采用实际的 ADS-B 下行数据进行分析和验证。实验结果证明该方法针对单个飞机的转弯数据或者同一个有限空域内多个飞机数据具有良好的反演效果。

关键词: 广播式自动相关监视; 风场反演; 风矢量

中图分类号: TM413

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.04.008

0 引言

气象与航空密不可分, 而且航空受气象因素特别是极端天气现象(如大风、大雾、大雪)的影响非常大, 轻则影响飞行运行或导致延误, 重则带来安全事故甚至导致严重的空难事故。风是航空气象众多的影响因素中最常见且最危险的一种^[1]。风以及风切变在机场空域无时无刻不在发生, 而且具有高隐蔽性、快速变化、很难预测等特点。在风切变中, 顺风切变、逆风切变、垂直风切变、侧风切变极大地影响飞机的升力、平衡、姿态, 在低空飞行、着陆、起飞过程中严重威胁飞行安全。因此, 通过大气探测系统实时探测机场空域的风场信息和提供风场切变预警, 及时提供给机场安全飞行保障系统, 是机场安全运行工作的重点内容, 也是航空气象研究的热点问题。与常规天气预报不同的是, 航空气象的时空分辨率、实时性要求较高。传统风场探测方法和设备应用于航空气象领域时存在诸多不足和难以解决的困难, 例如: 风廓线雷达只能垂直探测^[2], 水平方向分辨率不足; 多普勒雷达探测需要依赖降水粒子^[3], 如果降水粒子少或无降水粒子时, 性能就不好; 激光雷达必须在晴空条件下探测^[4], 雾、雨、沙尘暴等都会影响探测; 探空气球的探测频次低^[5], 放飞站点少。此外, 多雷达系统波束重叠区域有限、反演算法复杂。这些因素极大限制了传统风场探测手段在机场气象服务的大规模普及应用。

针对这些特点和要求, 基于广播式自动相关监视数据(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)的风场探测反演方法成为近年来出现的一种新颖的专门用于机场风场、温湿度廓线、气压等气象要素的探测方法, 它利用每架飞机的机载传感设备实时采样并发送位置数据和气象数据, 具有很高的空时采样频率和数据更新率, 且性价比很高。国外多名学者对提出利用机载 ADS-B 进行风场反演进行了深入研究^[6-9]。Leege^[6]对单飞机和多飞机 ADS-B 设备的风矢量解算做了深入研究, 其基本思想是假定空间相邻的飞机有近似相同且各向均匀分布的空速, 将风矢量和空速反演建模成圆拟合问题和最小二乘问题, 采用扩展卡尔曼滤波求解。Liou^[7]利用 AMDAR 系统提供的 ADS-B 数据以及其他气象数据(如地面站数据), 送入 CALMET 数值预报模式进行空域 3D 流体风场反演, 并对台湾地区风场进行风场反演和分析。Ting^[8]利用 ADS-B 数据建立了一个异常天气的临近预报软件系统。Huy^[9]结合 ADS-B 和 ModeS 系统对风场进行反演, 针对二者不同的下行数据如何反演得到真空速(TAS)进行了详细分析说明, 取得了良好的效果。基于 ADS-B 的航空气象研究, 包括风场重建与预测、温湿度廓线反演、灾害性极端天气预警等, 虽然国外已研究多年并取得了一定的成果, 但在中国相关研究还处于起步阶段, 成果较少, 目前中国的 ADS-B 相关研究还主要集中在设备研究、航路监控应用研究。在基于 ADS-B 的空域风场探测中, 单点风矢量的反演是基础工作, 是后续的三维风场反演的基础, 将在单点风矢

收稿日期: 2020-02-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0809500); 四川省科技计划资助项目(2019YFH0034)

量反演进行研究。

中国的民用航空制造业以及相关配套产业起步晚,基础薄弱,几乎完全依赖进口。从 2019 年底的 C919 航空发动机事件看出,既要引进设备以满足经济发展的需求,也要自力更生。发展自主民航制造业,建立航空制造业生态系统,包括航空发动机、导航、航管、航空电子、航空气象、运维保障等,需要走的路还很长。文中研究涉及航路监控、航空气象相关领域的内容,具有十分重要的现实意义。

1 ADS-B 系统简介

广播式自动相关监视 ADS-B,是飞机通过数据链以广播的方式自动发送/接收身份、位置、速度和其他信息的监视方式^[10],其原理框图如图 1 所示。

当前中国 ADS-B 系统采用 1090ES (1090MHz extended squitter) 标准^[11],也是国际民用航空组织推荐的用于全球商用航空飞机的标准。ADS-B 设备由地面设备和机载设备组成,以网状、多点对多点方式完成视距范围的数据双向通信。地面设备包括地面接收机、天线、数据服务器、显示单元、附属网络和通信设备。机载设备包括 GPS 接收处理单元、ADS-B 收发信机、监视信息处理系统、机舱综合信息显示系统 CDTI 等。机载设备以 GPS 进行实时定位,综合本机其他设备获取的信息,以 0.5 ~ 1 s 间隔广播方式发送,同时也接收其他飞机和地面的广播信息后经过处理送给 CDTI。CDTI 根据收集的其他飞机和地面的 ADS-B 信息、机载雷达信息和导航信息后给飞行员提供飞机周围的态势信息和其他附加信息(例如冲突告警信息、气象信息等)。中国民航大力推动 ADS-B 建设与运行,到 2017 年底基本完成了 ADS-B 地面设施布局并开始初始运行,为民航空管提供了飞行位置监控信息服务。图 1 中,ADS-B 从气象网关获取的外部气象产品信息(包括温、湿、压、风等)来自传统气象系统(或气象官方系统)。

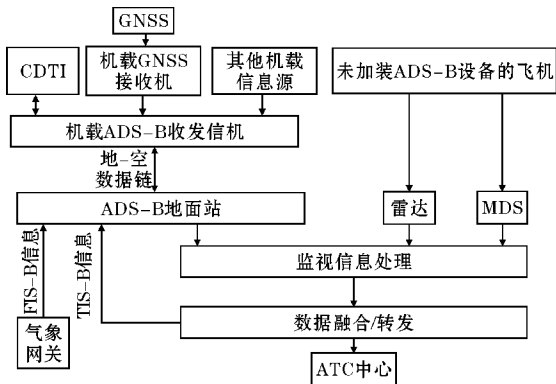


图 1 ADS-B 系统组成结构图

在数据通信方面,ADS-B 采用自主连续广播方式,更新速度快,且报文是公开、非加密方式;而二次监视雷达 SSR 采用的是询问-应答模式,速度较慢。在数据采集方面,除了获取航空器的 GPS 位置外,ADS-B 机载设备还能采集该位置的其他信息^[11]并解算得到风矢量。因此,将多个 ADS-B 设备获取的空域风矢量数据进行综合,反演重建三维空域风场,并提供机场气象信息服务,是一种全新的风场探测反演方案思路,具有很强的新颖性。此外,该方法的优势在于设备简单,可以直接借用现有 ADS-B 系统,具有很高的实用价值。

2 信号建模

2.1 风矢量模型

在水平面内,地速矢量 V_g 、空速矢量 V_a 、风速 V_w 矢量三者的矢量关系(图 2)为

$$V_g = V_a + V_w \quad (1)$$

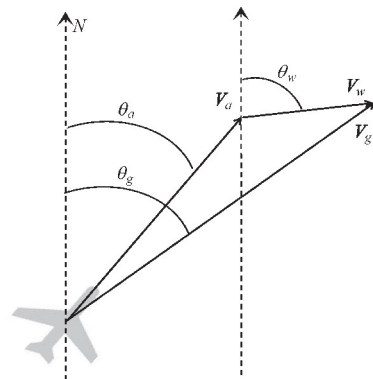


图 2 地速、风速、空速的矢量关系

其中地速指飞机相对于静止地面的速度,风速指风相对于静止地面的速度,空速指飞机相对于风或者空气气流的相对速度,这里特指真空速 TAS^[6],而非指示空速。矢量角度均相对于真北方向,顺时针方向角度增加。

2.2 反演算法

沿地速矢量 V_a 方向进行投影,可得地速^[12]

$$\|V_g\| = V_g = V_a \cos(\theta_g - \theta_a) + V_w \cos(\theta_w - \theta_g) \quad (2)$$

其中 θ_g 为地速矢量角度, θ_a 为空速矢量角度, θ_w 为风速矢量角度。 $\theta_g - \theta_a$ 称为漂移角,一般比较小。以常规客机为例,其巡航速度约为 560 节左右。此外根据 XX 局批准的运行手册中, 0° 、 90° 、 180° 的起飞降落标准中的最大风速均不超过 50 节。因此,在 90° 极端情况下, $\cos(\theta_g - \theta_a) \approx 0.9960 \approx 1$ 。方程可简化为

$$V_g = V_a + V_w \cos(\theta_w - \theta_g) \quad (3)$$

$$V_g = V_a + V_w (\cos\theta_w \cos\theta_g + \sin\theta_w \sin\theta_g) \quad (4)$$

$$\text{又} \quad \mathbf{V}_{wx} = \mathbf{V}_w \cos \theta_w, \mathbf{V}_{wy} = \mathbf{V}_w \sin \theta_w \quad (5)$$

$$\text{则} \quad \mathbf{V}_g = \mathbf{V}_a + \mathbf{V}_{wx} \cos \theta_g + \mathbf{V}_{wy} \sin \theta_g \quad (6)$$

矢量分解时,以正北方向为 x 轴正方向,正东方为 y 轴正方向,顺时针为角度增加方向。

假设在局部空域的较短时间间隔内,风速和风向恒定,也即 \mathbf{V}_{wx} 和 \mathbf{V}_{wy} 恒定^[6]。又假设针对同一种机型有多架飞机,且在该时间空间间隔内空速 \mathbf{V}_a 恒定(但方向不同),方程是关于 \mathbf{V}_{wx} 和 \mathbf{V}_{wy} 的线性方程组,原则上只需要两组已知数据 $(\mathbf{V}_{g1}, \theta_{g1})$ 和 $(\mathbf{V}_{g2}, \theta_{g2})$ 即可求解 \mathbf{V}_{wx} 和 \mathbf{V}_{wy} ,再根据

$$\mathbf{V}_w = \sqrt{\mathbf{V}_{wx}^2 + \mathbf{V}_{wy}^2} \quad (7)$$

$$\theta_w = \arctan \frac{\mathbf{V}_{wy}}{\mathbf{V}_{wx}} \quad (8)$$

可求解该局部空域的风速矢量。实际工作中由于 ADS-B 的采样率很高 (≥ 1 Hz),因此上述方程的已知数据可能有多组,或来自一架飞机的较短时间段内的多次采样序列,也可能来自多架飞机的序列。对于多组数据 $(\mathbf{V}_{gk}, \theta_{gk}), k=1, 2, \dots, K$, 可得超定方程组:

$$\mathbf{A}\mathbf{V} = \mathbf{b} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{b} = [\mathbf{V}_{g1}, \dots, \mathbf{V}_{gK}]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{g1} & \sin \theta_{g1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \theta_{gK} & \sin \theta_{gK} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{V}_{wx} \quad \mathbf{V}_{wy} \quad \mathbf{V}_a]^T$$

矩阵 \mathbf{A} 一般情况下列满秩的,则可以通过矩阵的伪逆 \mathbf{A}^+ 求得最小范数最小二乘解。

$$\tilde{\mathbf{V}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (12)$$

2.3 单个飞机数据

虽然单个飞机在短时间(例如5 s)内有多组采样数据 $(\mathbf{V}_{gk}, \theta_{gk})$, 但是其地速差非常小,方程组(9)的解极不稳定。因此针对单个飞机数据,必须保证数据中地速角(或航迹角) θ_{gk} 具有一定的分散程度,至少保证 $>30^\circ$ 的分散分布。这种大范围的飞机机动转向在进近阶段前,可能由于天气原因、流量控制原因等出现飞机处于保持模式(hold pattern),此时单个飞机会在附近空域进行盘旋,等待进近。保持模式的距离不定,根据 ATC 进行调度。因此这些转弯数据可以用于单个飞机情况的反演。这种盘旋情况在特别繁忙的机场经常出现,这些数据具有很高的利用价值。此外,从各方向飞来的飞机在进近前需要转弯调整对准跑道,短时间大角度($>30^\circ$)转弯情况很常见,可利用的数据较多。

如果单个飞机的转弯角度不大,或者几乎沿着直

线飞行,则方程(9)构成的超定方程组可能退化成欠定方程组,可以求其最小范数最小二乘解。

2.4 多飞机数据

如果局部空域中有多架飞机,且朝向不同的飞行方向,则式(9)超定方程组可以很好地求的最小二乘解。由于考虑飞行安全,飞行中的飞机必须有一定的安全间隔。国际上通用的高度间隔,在6000 m以下每300 m为一个高度层间隔,在6000 m以上的高空中,每600 m为一个高度层间隔。但是飞机的水平间隔较宽,一般是半径20 km。因此,在该区域内在较短时间内同时出现飞机的可能性不大,用多架飞机拟合得到风场数据的质量较差。解决方法是适当加大高度层的间隔和时间间隔,使空域格点内的多飞机数据尽量多。

2.5 质量评估

文献[6]提出 DOP 方法用于反演风矢量的质量评估。结合方程(9)的最小二乘解的误差矢量的范数作为评估准则。

$$\epsilon = \|\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{V} - \mathbf{b}\| \quad (13)$$

3 数据获取与解析

3.1 ADS-B 数据帧解析

ADS-B 采用非应答式的广播方式发送数据,机载 ADS-B 设备自主发送报文给临近飞机或者地面站。当前,中国民航采用的数据链多为 1090ES (1090 MHz extended squitter) 和 Asterix Category 021 报文格式^[13]。Asterix 是欧洲标准雷达数据交换格式(all purpose Structured Euro control radar information eXchange format, ASTERIX)。

数据报文是变长结构,具体格式图3所示。

CAT	LEN	FSPEC	Record1	...	FSPEC	Record N
-----	-----	-------	---------	-----	-------	----------

图3 Category 021 报文格式

其中 CAT 为类型标识符,1 个字节,固定为十进制数 21。LEN 为长度符,固定为 2 字节,表示从 CAT 直到最后的 Record N 的整个帧长度字节数。FSPEC 为字段标识符,多字节可变长度,字节的最低位为 0 表示 FSPEC 结束,其他位的 0/1 状态表示其对应的数据项(item)是否在后续的 Record 中出现。数据项种类以及排列顺序可以参考 Category 021 标准的 user application profile(UAP)表。

在 ADS-B 报文数据中,对风速反演有直接或间接

作用的数据列于表 1 所示。

表 1 对风矢量反演算法有关的数据项

编号	名称	字段名
I021/073	报文时间(精确到秒)	time of message reception for position
I021/074	报文时间(纳秒)	time of message reception for position-high precision
I021/130	经纬度	position in WGS-84 co-ordinates
I021/160	地速矢量	airborne ground vector
I021/145	高度层	flight level
I021/140	几何高度	geometric height
I021/170	目标 ID	target identification
I021/090	质量指标	quality indicators
I021/020	飞行器类型	emitter category

3.2 空速 Airspeed

式(1)中风矢量求解至关重要的空速矢量 V_a 、磁航角 Magnetic Heading 等信息并未出现在 ADS-B 报文中。因此,需要通过式(9)进行反演,间接求解。

空速分为真空速(TAS)、指示空速(IAS)、或马赫数(Mach)。在上述模型(1)中,真空速(TAS)是求解风速矢量必需的量。但根据文献[6]及研究过程中分析的若干数据表明,目前很少有机载 ADS-B 设备下发了 TAS/IAS/Mach 数据,不能直接求得。根据以往学者的研究结果^[6-9],可假设不同的高度层,相同类型的飞机的真速近似相等。

3.3 高度层 flight level

高度层(flight level, FL),代表了垂直方向一个大范围的高度层区域。根据民航局有关规定,直航角 0~179°,高度由 900~8100 m,每隔600 m每一个高度层,高度在9000 m以上,每隔1200 m为一个高度层。直航角 180~359°,高度由 600~8400 每600 m为一个高度层,高度在8400 m以上的每隔1200 m为一个高度层。ADS-B 中 FL 的精度为 1/4。

文中,高度层数据用于如下两个作用:

(1)判断飞行阶段,例如起飞、降落、巡航;

(2)对空域进行高度分层分组,通过统计方法从历史数据中求空速 $V_a(k,c)$,其中 k 为高度层, c 为飞机类型或者目标 ID。

3.4 数据更新率

根据对实采的 ADS-B 数据帧解析后的高精度时间、经纬度、高度等数据进行分析可以发现,接收数据有若干重复,如表 2 的帧片段所示,解析后数据按照 target identification 分组,并按照时间排序,相邻两行的

时间差<1 ms甚至<10 ns,且重复具有随机性,但是 1 ms内其经纬度并未发生变化。因此数据预处理过程中,将多余数据行剔除,1 ms内的数据只保留 1 条。

此外还发现,经纬度、地速等信息的更新率大概是 500 ms,高于国外 ADS-B 研究成果中声称的1 s^[6]。根据常规巡航速度 560 节换算,可知 ADS-B 的空间采样间隔小于125 m,在下降阶段可降至100 m以内,该数据与常规风廓线雷达的距离库精度相当。但是 ADS-B 的采样范围远远高于雷达覆盖,即使在10000 m的平流层的高度和上和远离城市区域,也能保证上述时间和航迹上的采样精度,基本不受距离和高度的限制。

表 2 ADS-B 部分采样数据

	UTC	经度	纬度
0	09:52:10:600363	97.308784	38.998632
1	09:52:10:600446	97.308784	38.998632
2	09:52:10:600447	97.308784	38.998632
3	09:52:10:600447	97.308784	38.998632
4	09:52:11:120351	97.310157	38.998396
5	09:52:11:120434	97.310157	38.998396
6	09:52:11:120434	97.310157	38.998396
7	09:52:11:120434	97.310157	38.998396
8	09:52:11:670339	97.311637	38.998160
9	09:52:11:670422	97.311637	38.998160
10	09:52:11:670423	97.311637	38.998160

3.5 数据质控

在 ADS-B 下行数据中,变长数据项 quality indicators(I021/090)为数据质量指示,标明速度、经纬度、气压高度、几何高度等数据的数据质量。其中,NUC_r或 NAC_v对应速度数据质量指标,NUC_p或 NIC 对应经纬度数据质量指标,取值 0~9,数值越低表明测量数据可靠性越差。通过对大量数据进行分析表明大多数数据集中在≥5 的区间,因此将 5 作为质控阈值,抛弃低于 5 的数据。ADS-B 部分采样数据质量分析如表 3 所示。

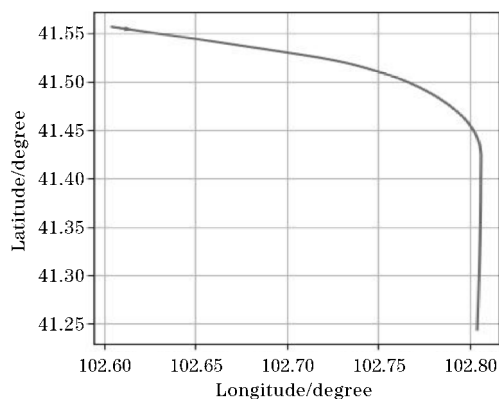
表 3 ADS-B 部分采样数据质量分析

NUC _p	质量限/nm	数据占比/%
9	< 0.004	0
8	< 0.013	3.5
7	< 0.1	79.8
6	< 0.2	10.2
5	< 0.5	6.4
4	< 1.0	0.1
3	< 2.0	0
2	< 10.0	0
1	< 20.0	0
0	> 20.0	0

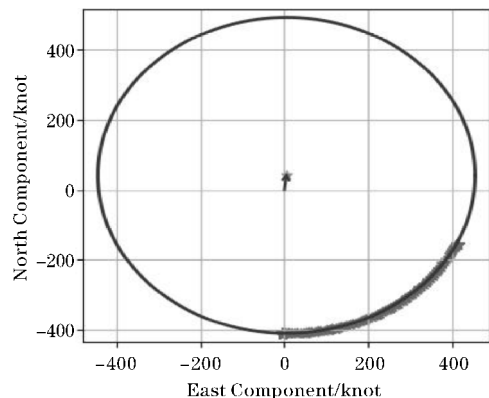
4 实验结果与分析

4.1 单飞机实验数据

实验1选择了数据集中处于巡航阶段某飞机的转弯状态的数据,数据点753个,时间约3 min (UTC 09:52:10–09:55:36),航迹角从正东偏南逐渐转为正南,转弯角度约 70.44° ,几何高度9616 m,高度变化为0,水平位移为20.84 nmi。航迹如图4(a)所示。根据反演公式(12)求得空速为450.49节,风速为41.76节,风向 6.89° ,拟合误差为4.37。



(a) 飞行航迹

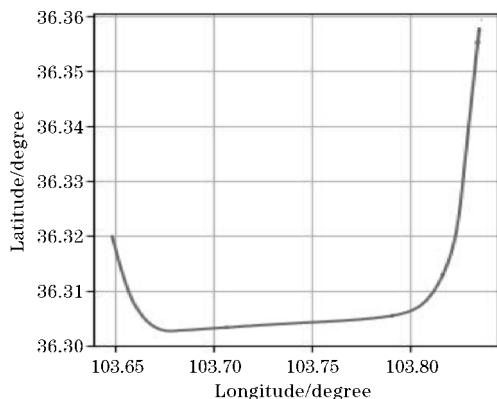


(b) 地速分量分布及拟合圆

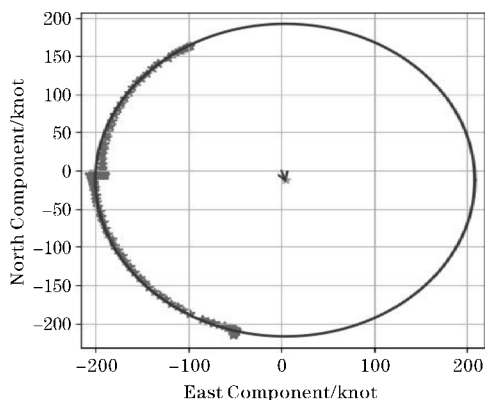
图4 实验1 单个飞机飞行数据风速拟合

根据文献[6]的思路,地速应该拟合得到一个圆,这个圆偏离坐标原点,圆心就是风速的分量,原点指向圆心的矢量就是拟合得到的风速矢量 \mathbf{V}_w ,圆的半径就是真空速 \mathbf{V}_a 。图4(b)是实验1的地速数据的分量分布及最后拟合得到的圆。圆心的矢量对应反演的风速矢量。圆周附近的*对应各地速分量,这些分量很好地分布在圆周上,没有出现较大偏离,实验结果验证了文献[6]地速分布规律,说明研究的反演算法针对单个飞机大范围转弯情况下的反演结果是可信的。

实验2同样采用单个飞机的大角度转弯的飞行数据,如图5所示。在约10 nmi水平位移内航迹角变化约 135.13° ,数据点421个,高度层FL为107.5。



(a) 飞行航迹



(b) 地速分量分布及拟合圆

图5 实验2 单个飞机大角度转弯飞行数据风速拟合

与实验1不同的是,该数据段的几何高度从3352.8 m减少了655.32 m,从FL107.5减少了21。反演结果,真速为204.51节,风速为13.05 nmi,风向为 161.70° 。拟合误差为8.897,略比实验1的数据高,原因可能有:根据几何高度估计,该飞机正处于下降阶段的进近阶段,一般处于手动模式,飞行员调整速度的操作比较频繁,空速变化相对较大;垂直高度(或高度层FL)变化较大,带来的风速风向变化也相对较大。改进方法是可以将大范围转弯(例如 $>90^\circ$)分为多个部分,图5(a)的 135.13° 转弯分为2个阶段,分别拟合。图5(b)显示了地速分量分布图及拟合圆,拟合效果理想。

表4列举了另外几组单飞行段数据及其拟合结果。每一行数据对应的是同一个飞机的3 min的转弯数据及反演得到的风速、风向和空速。按照飞行过程中飞机的几何高度变化进行排序。从表4中可以看出,各组数据分别拟合反演得到的风速风向效果都比较理想。

表 4 多组单个飞机拟合结果

	几何高度/m	几何高度变化/m	转弯角度/(°)	水平位移/nmi	风速/节	风向/(°)	空速/节	拟合残差/节
1	11254.74	7.62	35.15	23.29	44.19	76.07	442.58	7.28
2	8763.00	7.62	37.30	20.45	60.33	90.86	480.82	2.91
3	8077.20	30.48	37.84	24.98	4.68	250.26	442.54	4.85
4	9075.42	411.48	62.31	23.38	26.63	1.45	428.60	4.46
5	3352.80	655.32	135.13	9.31	13.05	161.70	204.51	8.90
6	7421.88	662.94	49.88	21.16	17.53	283.18	396.32	5.76
7	7536.18	830.58	52.53	21.76	37.11	78.57	381.88	9.26

4.2 多飞机实验数据

在处于直线飞行或者转弯角度很小的情况下,对某个空域的风矢量反演需要该空域内多个方向平飞的飞机的数据进行联合反演。实验 3 选取了在高度层内

间隔较近的 3 个飞机的较近时段的数据,如表 5 所示。3 段数据分别来自 3 架不同飞机,均处于巡航平飞阶段,航迹角变化都很小。单独用 1 段数据进行拟合,必然带来结果不稳定,实验 3 反演结果如图 6 所示。

表 5 实验 3 多飞机联合反演的参数情况

	几何高度/m	几何高度变化/m	高度层	航迹角/(°)	航迹角变化/(°)	采样点数
1	7764.78	0	246	263.20	0.03	19
2	8138.16	7.62	256	58.85	0.13	101
3	8077.20	0	256	238.66	9.43	82

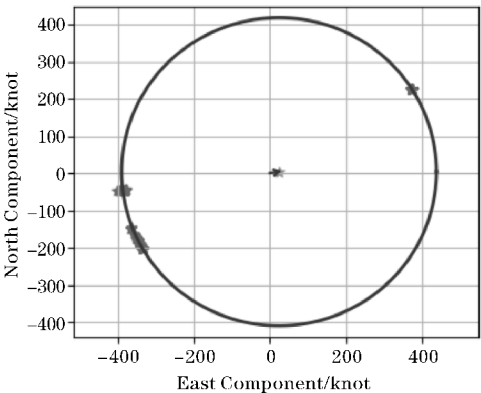


图 6 实验 3 多个飞机平飞数据分布及风速拟合

5 结论

对 ADS-B 反演单个空域区域的风矢量进行研究,根据有关文献推导和讨论了详细的数学模型和反演算法,并采用实采数据对算法进行验证,实验结果表明,在一定时间间隔和一定空域间隔内飞机的空速大小基本恒定,在此假设的基础上可以根据单个飞机的大角度转弯数据或者多个平飞飞机的数据反演得到该空域的风速和风向,反演结果可信度高。

参考文献:

[1] 李璇. 风切变时进近管制区域运行安全风险分

析[J]. 安全,2019,40(11):25-29.
[2] 许波,周红根,肖晨,等. 基于最小二乘法的风廓线雷达风场合成技术[J]. 气象水文海洋仪器,2019,36(1):51-55.
[3] 刘雪佳. 多普勒天气雷达在航空气象服务中的应用[J]. 科技风,2015(10):89.
[4] 杨茂胜. 机场激光雷达风切变监测系统[D]. 成都:电子科技大学,2014.
[5] 冒晓莉,张加宏,肖韶荣,等. 基于流体动力学的探空仪 GTS1 湿度测量误差修正研究[J]. 地球物理学报,2016,59(12):4791-4805.
[6] Leege A M P De, Mulder M, Paassen M M V. Novel Method for Wind Estimation Using Automatic Dependent Surveillance-broadcast [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(2): 648-653.
[7] Guan Jhih Liou, Shau Shiun Jan. Using on air UAT/ADS-B signal to simulate 3D aviation weather information[P]. Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014 IEEE/ION, 2014.
[8] Ting Wen Yao, Jan Shaushiun. Development of An Aviation Unusual Weather Now-casting System based on Aircraft Automatic Dependent Surveillance-broadcast(ADS-B) Data[C]. Proceedings of 18th Conference on Ariation, Aange, and Meteorol-

- ogy, Seattle, Washington, 2017:1–4.
- [9] Vũ, Huy. ADS-B and Mode S Data for Aviation Meteorology and Aircraft Performance Modelling [D]. Netherlands: Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2018.
- [10] 郝星. 广播式自动相关监视技术的应用探析[J]. 通讯世界, 2016(3):69.
- [11] 付立. 民用航空广播式自动相关监视数据输出标准研究[J]. 交通建设与管理, 2014(18):235–237.
- [12] Hurter Christophe. Wind parameters extraction from aircraft trajectories [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2014, 47:28–43.
- [13] 冯建锋, 鱼佳欣, 刘明菊, 等. ADS-B Category 021 报文解析软件的设计与实现[J]. 计算技术与自动化, 2017, 36(4):115–118.

Wind Vector Inversion Method of based on ADS-B Data

LIU Tao^{1,5}, LIAO Wei², QIN Liehua, XU Zhili, WANG Yuankai¹, WANG Haijiang^{1,5}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of Logistics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. Civil Aviation Gansu Air Traffic Control Sub Bureau, Lanzhou 730087, China; 4. Second Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China; 5. CMA. Key Laboratory of Atmospheric Sounding-KLAS, Chengdu 610225, China)

Abstract: Among the important factors affecting aviation safe operation, wind field is one of the most important aviation meteorological information. The existing wind field detection techniques, such as radar, air exploration and so on, have many inherent defects. The inversion method based on Automatic Dependent Surveillance-broadcast (ADS-B) system is a novel one, which can effectively solve the real-time and resolution problems of wind field detection and reconstruction in the airport region. The first step of this novel method is the inversion of wind vector, which is the research aim of this paper. The wind vector in local space and time is modeled and the inversion method is studied, and the actual ADS-B downlink data is used to analyze and verify. The experimental results show that the method has a good inversion effect for single aircraft turning data or multiple aircraft data in the same local airspace.

Keywords: automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); wind field inversion; wind vector