

低空复杂风场全天候雷达精细探测技术

沈 淳, 李健兵*, 高 航, 殷加鹏, 王雪松

(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 低空复杂风场通常指距离地面高度600 m以下, 局地风速、风向快速变化的风场。其全天候大范围精细探测是雷达科学、气象学等领域的长期难题。低空复杂风场的全天候雷达精细探测涉及传感器设计、三维风场反演和全天候融合等关键技术。本文从激光雷达探测、微波雷达探测、全天候融合及特征危害提取等方面对风场探测的技术内涵及研究现状进行了梳理, 并分析了发展趋势, 为低空复杂风场全天候精细探测技术发展与应用提供参考。

关键词: 低空复杂风场; 激光雷达; 微波雷达; 精细探测; 全天候

基金项目: 国家自然科学基金(No.62231026)

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)04-1189-16

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230699

Precision Detection of Low-Level Complex Wind Field by Radar Under All-Weather Conditions

SHEN Chun, LI Jian-bing*, GAO Hang, YIN Jia-peng, WANG Xue-song

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Low-level complex wind field usually refers to the wind field below 600 m, with rapidly fluctuating speed and direction. The fine-resolution and large-scale detection under all-weather conditions is a long-term challenge in radar science, meteorology, etc., involving key technologies such as sensor design, three-dimensional wind field retrieval and information fusion. This paper reviews the technical connotation and research status of wind field detection from the aspects of light detection and ranging (LiDAR) detection, microwave radar detection, all-weather data fusion and hazard feature extraction, and finally analyzes its development trend. We believe this work provides reference for the development and application of all-weather precision detection technology in low-level complex wind field.

Key words: low-level complex wind field; light detection and ranging (LiDAR); microwave radar; precision detection; all weather

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62231026)

1 引言

低空是人类生产生活 and 军事斗争最密集的区域。因动力学和热力学的复杂作用, 低空风场呈现复杂的运动和结构特征, 给人类活动带来重要影响^[1]。低空复杂风场一般是指600 m以下风速和风向快速变化的风场。据统计, 飞机尾流、风切变、下击暴流等低空复杂风场是40%以上航空飞行事故的主导因素, 被称为空中“隐形杀手”^[2]。2022年7月17日浙江宁波市奉化区翡翠湾码头突遭下击暴流引发的11级强风, 1艘停靠在码头的休闲渔船及引桥被吹翻, 7人经抢救无效死亡; 2015年6月1日, “东方之星”游轮上行至长江水域湖北

荆州市监利县大马洲水道44号过河标水域处, 遭遇严重垂直切变和水平切变灾害性天气, 导致游轮翻沉, 442人遇难; 2001年纽约肯尼迪机场一架飞机因遭遇前机尾流而坠毁, 事故造成265人死亡, 是美国自“911事件”以来最大的航空事故。航母、两栖舰等大型舰船遂行恶劣天气条件下作战任务时, 因起降通道上复杂风场(“公鸡尾流”、舰岛尾流、飞机尾流、风切变、湍流)等影响, 舰载机起降被称为“刀尖上的舞蹈”^[3]。因此, 低空复杂风场的全天候精细化监测受到世界发达国家和军方的高度重视, 被认为是保障航空器快速安全起降的核心关键要素之一。

低空复杂风场存在爆发突然、演化快速、生存短

暂、结构精细和全天候等特点,给风场的精细探测带来巨大挑战,发展能兼顾上述特点的风场探测手段是学术界和工业界长期追求的目标.当前风场探测手段主要包括激光雷达、微波天气雷达、风廓线雷达、探空气球和测风仪等,这些手段丰富了人们对复杂风场的认识,但在探测机理、应用范围和能力边界等方面各有优劣.

(1) 探空气球,如图1(a)所示,利用经纬仪连续跟踪探空氢气球获得其漂移轨迹上的风矢量信息,具有探测便捷、操作简单等优点,成为高空气象探测和其他方式真值比对的主要手段之一,在国内外气象行业得到了广泛运用^[4],但其仅能获取气球运动轨迹上的风场(或廓线),且可控性等难以保障.

(2) 测风仪,如图1(b)所示,能够准确获取所在位置的实时风矢量信息,如超声波风速仪具有最高测量精度和数据率,基于测风仪的低空风切变告警系统(Low Level Windshear Alert System, LLWAS)^[5]能够有效探测机场跑道附近的风切变情况^[6],但当风场变化复杂时,无法仅仅通过测风仪获取完整终端区特别是起降

通道上的风场分布.

(3) 微波天气雷达,如图1(c)所示,可以适用于雨雾天气的风场探测,主要用于探测微下击暴流和阵风锋面,对湿性风切变探测效果较好,如终端多普勒气象雷达(Terminal Doppler Weather Radar, TDWR)系统^[7,8]能够测量较大范围内风场情况,覆盖机场全部区域,但在利于终端区飞机起降的晴空条件下难以实现有效探测.

(4) 风廓线雷达,如图1(d)所示,通过对大气的湍流进行探测来监视风场随高度变化的廓线信息^[9],提供探测点上空风场随时间和高度的变化情况,但其基于线性风场和湍流各向同性假设得到,分辨率较差.

(5) 激光雷达,如图1(e)所示,利用空气中气溶胶后向散射作用实现风场的探测,具有空间分辨率高和精度高等优点,是晴空条件下最具潜力的风场探测方式^[10].

如上分析,现有风场探测手段如 LLWAS 系统和 TDWR 系统等国际主流业务系统聚焦慢变风场探测,对危害更为隐蔽的小尺度复杂风场的精细观测无能为力



(a) 探空气球

(b) 测风仪

(c) 微波天气雷达

(d) 风廓线雷达

(e) 激光雷达

图1 低空风场探测手段

力,其全天候精细探测是业内长期难题.随着微波雷达和激光雷达体制不断完善发展、时空分辨率不断提升,对小尺度复杂风场的精细观测也逐渐成为可能.激光雷达具有空间分辨率和探测精度高等优点^[11],是晴空条件下复杂风场探测的利器,因此可基于激光雷达开展晴空复杂风场探测技术的研究.在降雨条件下,激光雷达波束衰减剧烈,而微波雷达通过探测空气中的雨滴等大尺度颗粒可实现背景风场的探测反演,因此可基于微波雷达开展降雨条件下风场探测技术的研究.但值得注意的是,激光雷达难以达到低盲区高精度探测需求;而微波雷达示踪物雨滴因强惯性不能完美示踪背景风场,需要突破雨滴速度与背景风场速度的关系解析.二者均面临由退化的一维多普勒速度实时精确反演三维风场速度的难题.另外,基于激光雷达和微波雷达的不同天气适应性特点,开展两种不同体制雷达的融合探测研究,可实现复杂风场的全天候探测,但面临多源传感器体制不同、时空分辨率不同和数据获取率不同等融合难题.

总体来说,低空复杂风场的全天候精细探测是航空器快速安全起降保障、风力勘探及工农业生产安全等方面的关键科学问题,包含激光雷达风场探测技术、微波雷达风场探测技术及微波雷达/激光雷达全天候融合探测3个部分.本文在现有理论和技术的基础上,从上述3个方面对低空复杂风场全天候雷达精细探测技术研究进行了梳理,为本领域的研究工作者提供有益参考.

2 激光雷达风场探测技术

晴空是航空器飞行活动最为密集的天气条件,但是在这种条件下,飞机尾流、风切变这类危害风场较为隐蔽,精细、鲁棒地探测难度极大.晴空大气中气溶胶、雾霾等细小微粒的惯性(描述粒子被背景风驱动能力的参数)较小,是风场的良好示踪物,激光雷达对这类细小微粒具备较好的探测能力.本节针对晴空复杂风场精细探测需求,首先分析了低盲区高分辨激光雷达

的发展现状,进而开展了基于激光雷达探测的风场反演方法研究现状分析.

2.1 高精度长测程激光测风雷达研制

激光雷达通过测量气溶胶、雾霾等细微粒子的多普勒频移来探测复杂风场,具有非接触测量、不影响目标状态、时空分辨率与测量精度高、量程较大等优点,在晴空条件下工作效能较为突出.根据探测体制差异,激光雷达分为相干探测和非相干探测两种体制(图2).其中非相干体制采用大能量发射并对回波信号直接模拟鉴频来实现多普勒频移的测量,存在探测灵敏度低、鉴频精度不高等问题;相干体制通过对拍频后的中频信号进行数字鉴频来实现多普勒频移的测量,具有探测效率高、测量精度高等特点,已在机场、科学考察船等多平台得到广泛应用,如Hon等^[12]在香港国际机场利用激光雷达进行低空风场的探测和危害天气的预警.

基于激光雷达在晴空风场探测的优越性,业界尝试将其应用于舰载、机载和星载等场景的风场探测任务当中,以满足飞机飞行安全、精准空投和大气环境监测等需求.上述探测场景需考虑狭小空间和轻质化等问题,同时还需满足低盲区、长测程、高时空分辨率及高精度的要求,但现有激光测风雷达存在低盲区与长测程无法兼顾的矛盾.比如通过将雷达脉宽变窄可以降低雷达测量的盲区,但其会降低雷达回波载噪比,难以满足长测程的需求.另外,激光测风雷达利用相邻距离区间的回波数据进行快速傅里叶变换获取回波频谱数据,无法兼顾高距离分辨率与高速度精度探测,如图3(a)所示,高精度探测所需的大时宽信号导致距离分辨率下降^[11](脉冲宽度 T_p 越大,距离分辨率越低),而高分辨率探测所需的短时宽信号导致频谱展宽,如图3(b)所示,多普勒频率精度下降.

针对上述难题,国内外相关机构在雷达信号探测机理、信号处理方法和硬件研发等方面开展了深入的研究攻关,形成了系列激光雷达产品(表1),如法国Leosphere公司的WindCube系列^[13]、英国QinetiQ公司

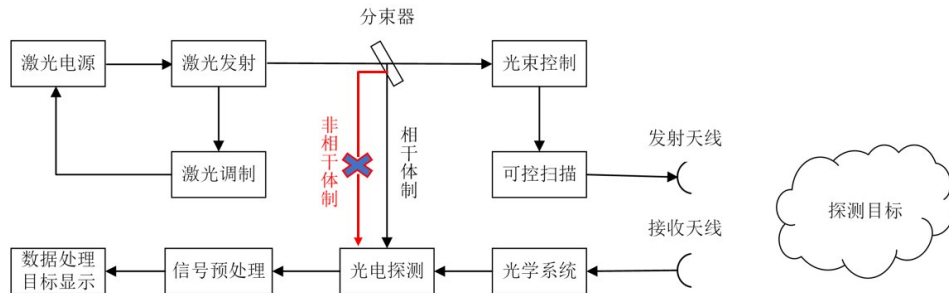
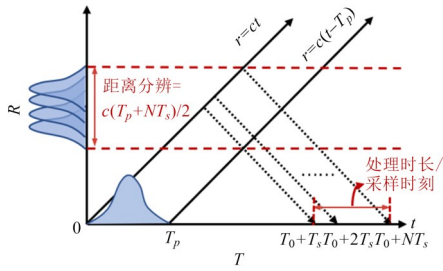
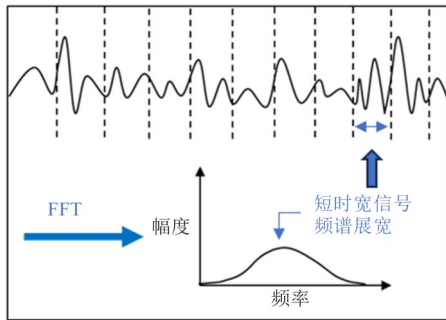


图2 激光雷达风场探测示意图



(a) 距离分辨率



(b) 短时宽信号

图3 高精度探测与高分辨率探测之间的矛盾

的 ZephIR300^[14]、美国 NASA 的 Imager 系列^[15]、俄罗斯 Laser System 公司的 Wind2、日本三菱公司的 Envi 系列等。以美国 NASA 的 WindImager 雷达为例,其采用脉冲相干探测体制,最高距离分辨率可达 7.5 m,盲区约 50 m。国内有兵器工业 209 所、中国科学技术大学和中国海洋大学等开展了相关研究。比如中国海洋大学 2022 年^[16],搭建的高分辨率变焦式连续波激光测风实验系统能实现 2~30 m 测量范围内测量位置的变化,风速测量区间 0~18 m/s,在空间分辨率这一单一指标上实现小于 1 m 的目标;中国科学技术大学 2022 年^[17]提出利用差分相关技术提高雷达空间分辨率,该技术在 700 m 距离上实现 3.3 m 距离分辨率;兵器工业 209 所是激光雷达产业化比较成功的单位,于 2006 年在国内率先提出了柔性全光纤相干激光雷达设计方案^[18]实现雷达系统的小型化^[19];国防科技大学 2023 年提出幅度编码技术^[20],该技术较好地解决了高距离分别与长探测距离的矛盾,兼具脉内子脉冲高距离精度以及整个脉冲的长探测距离,同时提出双频激光雷达^[11]以解决距离精度和速度精度两难的问题。

表1 国内外典型低盲区高分辨激光测风雷达

研究机构	型号	时间	参数
英国 QinetiQ 公司	ZephIR300	2010	连续波相干探测,探测范围 10~200 m,距离分辨率 0.1 m@10 m,8 m@100 m
美国 NASA	Windimager	2010	脉冲相干探测,探测范围 10 km,距离分辨率 7.5 m
法国 Leosphere 公司	WindCube200s	2011	脉冲相干探测,探测范围 50~6 000 m,距离分辨率 25 m
俄罗斯 Laser System 公司	WINDEX300	2011	连续波相干探测,探测范围 3~300 m,距离分辨率为探测距离的 10%
中国青岛华航公司	WindprintS4000	2015	脉冲相干探测,探测范围 45~6 000 m,距离分辨率 30 m
中国牧镭激光公司	Molas B300	2016	脉冲相干探测,探测范围 30~300 m,距离分辨率 30 m
中国兵器工业 209 所	FC-II-A	2022	多体制联合探测,探测范围 10~3 000 m,距离分辨率 30 m(50 m 高度以下可达 10 m)

业界针对舰载、机载和星载等场景的风场精细化探测和狭小空间中设备小型化等需求开展了大量研究。经过多年发展,风场精细化探测激光传感器技术不断改进,国内外相关研究机构在雷达低探测盲区、长测程、高时空分辨率及速度精度等单一或多个指标实现上完成了突破,为小型化激光雷达风场精细探测设备的产业化奠定了基础。基于小型化激光雷达探测设备,可开展舰船和飞机周边以及遥感对地等场景下的低空三维复杂风场的实时精确反演,为低空三维复杂风场的危害评估和预警体系构建提供有力支撑。

2.2 低空复杂风场反演方法研究

上文对激光测风雷达探测能力发展现状进行了分析,接下来在激光雷达探测基础上开展晴空条件下三维复杂风场反演的研究现状分析。时域和空域快速变化的复杂风场是低空风场探测最关注的情况。当风场

示踪物为浮尘、雾霾等细小粒子时,其观测速度与风场在径向上的投影速度近似一致,因此风场反演算法的核心问题转化为由一维径向风速反演获得三维风场的问题(图4)。业界实现风场反演的方法可以分为两类:第一类是基于一定的前提假设,在满足附加条件的基础上获得“近似真实”风场结构;第二类是基于物理模型的方法,引入风场物理模型通过数据同化方法实现精细风场重构。

第一类基于条件假设的方法,包括对风场速度分布假设为均匀、局部均匀、线性和局部线性等四种。基于水平均匀风场假设,速度方位显示方法(Velocity Azimuth Display, VAD)基于雷达平面位置显示器(Plan Position Index, PPI)扫描数据,利用一阶泰勒级数并进行最小二乘拟合获取水平风场信息^[21],具有计算快捷、准确度较高的优点,但只能获取大尺度风场廓线信息,无法获取小尺度复杂风场特征。为进一步提升反演精度,

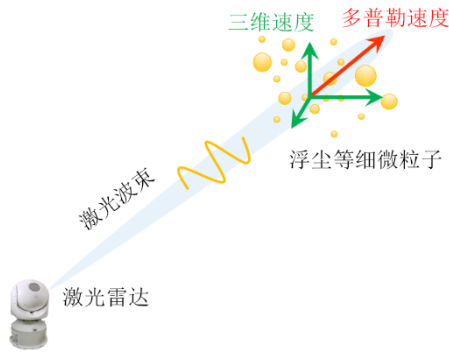


图4 激光雷达一维多普勒速度反演三维风场

陶祖钰^[22]利用相邻方位角上水平径向速度的差异提出了速度方位处理方法 (Velocity-Azimuth Processing, VAP), 实现了局部均匀风场的反演. 在此基础上, 学者们先后提出了扩展 VAP^[23]、非对称 VAP^[24]、积分 VAP^[25]、共轭梯度 VAD^[26] 等方法. 基于线性风场假设下, 速度体积处理方法 (Velocity Volume Processing, VVP) 建立扇形分析体积单元并利用最小二乘法实现了三维风场的反演^[27], 但该方法存在数值解不稳定及求解过程复杂的问题^[28]. 为克服 VVP 求解复杂的问题, 郎需兴等^[29]提出了速度平面处理方法 (Velocity Plan Processing, VPP), 假定分析体积单元内风速分布均匀, 将三维风参数数量由 6 个 (三维平均风速和三维风切变) 减少至 3 个 (三维平均风速). 这一类基于条件假设的方法以较小的计算代价实现一维径向速度到三维风场矢量的反演. 但是需要注意的是, 假定风场分布呈均匀或线性难以适配于复杂风场实际演化情况, 应用场景局限性较大.

第二种基于物理模型的数据同化方法, 可以分为连续数据同化和顺序数据同化两种^[30]. 连续数据同化方法主要包括三维变分法和四维变分法, 通过设定包含背景初始风场、边界条件和动力学模式等作为约束的代价函数, 求解代价函数的最小值反演得到风场. 其中三维变分法通常结合经验或误差协方差确定各约束项的权重, 未考虑风场随时间的演变, 重构得到的风场是一段时间内平均风场信息^[31]; 四维变分法在三维变分法基础上加入了时间维, 应用时间维上的多个观测值并考虑了动力学模型随时间的非线性演变^[32]. 顺序数据同化方法主要包含卡尔曼滤波、粒子滤波、层状贝叶斯等^[30], 包括预测和更新两个部分, 无观测时通过动力学模型前向积分预测风场状态变量, 有观测时对动力学模型和预测状态变量进行迭代更新. 目前已经得到应用的数据同化方法计算量较大, 较难实现变化剧烈的低空复杂风场实时反演.

为突破低空复杂风场高精度实时反演问题, 国防科技大学李健兵、王雪松团队^[33]从风场运动必须遵循

流体力学基本规律的前提出发, 提出了机器学习和数据同化相结合的三维复杂风场反演方法, 方法流程如图 5 所示, 具体步骤如下.

首先分析激光雷达探测和气象站点观测数据的异质性. 激光雷达观测分布密集但仅能提供一维多普勒径向速度, 气象站点观测如测风仪、风杯等可获得站点处二维或三维速度, 但观测通常分布稀疏且不均匀, 因此分别使用监督回归和半监督回归方法在三维风场分析网格空间上估计插值激光雷达探测和气象站点观测数据, 激光雷达和站点观测的插值计算公式分别为式(1)和式(2):

$$\mathbf{H}_{ri}^{\dagger} \mathbf{Y}_r = \hat{\mathbf{Y}}_r = [\hat{V}_{LOS,g}^1, \dots, \hat{V}_{LOS,g}^q, \dots, \hat{V}_{LOS,g}^{N_g}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{si}^{\dagger} \mathbf{Y}_s = [\hat{\mathbf{u}}_g^j \quad \hat{\mathbf{v}}_g^j \quad \hat{\mathbf{w}}_g^j] = \begin{bmatrix} \hat{u}_g^1 & \hat{v}_g^1 & \hat{w}_g^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{u}_g^{N_g} & \hat{v}_g^{N_g} & \hat{w}_g^{N_g} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, 矩阵 \mathbf{Y}_r 和 \mathbf{Y}_s 分别包含激光雷达和站点观测值; $\mathbf{H}_{ri}^{\dagger}$ 和 $\mathbf{H}_{si}^{\dagger}$ 分别是 \mathbf{H}_{ri} 和 \mathbf{H}_{si} 的 Moore-Penrose 伪逆矩阵, 表示与传统三维变化中插值过程相反的逆过程; \mathbf{H}_{ri} 和 \mathbf{H}_{si} 为观测算子; $N_g = m \times n \times q$ 是分析网格的格点总数; m, n 和 q 分别对应于三维风场 x, y, z 方向上的网格尺寸; 下标“g”表示分析网格; $V_{LOS,g}^i$ 为第 i 个激光雷达插值观测值; $(\hat{u}_g^j, \hat{v}_g^j, \hat{w}_g^j)$ 为第 j 个站点插值观测值.

其次使用激光雷达和站点观测插值观测值及常用的平滑项构建代价函数, 如式(3)所示.

$$J(\mathbf{X}) = J_r(\mathbf{X}) + J_s(\mathbf{X}) + J_{sm}(\mathbf{X}) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{N_g \times 3}$ 表示待反演的三维风场, $J_r(\mathbf{X})$ 用于衡量激光雷达观测和分析的径向速度之间的差异, $J_s(\mathbf{X})$ 衡量站点观测和分析的三维速度之间的差异, $J_{sm}(\mathbf{X})$ 是平滑项. 利用激光雷达和站点的插值观测值并通过对代价函数即式(3)最小化求解得到低空三维风场速度. 基于上述过程实现低空复杂三维风场的反演, 突破了非线性风场精细反演的长期难题, 反演准确率较传统三维变分方法提升 30% 以上^[34].

3 微波雷达风场探测技术

降水往往伴随着强对流等复杂天气现象而产生, 这是对航空飞行极不利的天气条件, 极大影响了机场的起降安全和通行效率, 同时对电力供应和农业生产等关系国计民生的领域影响巨大. 在降水条件下, 水凝物是风场观测的主要示踪物, 具备较强的雷达散射特性, 但水凝物是惯性较强的粒子, 在粒子尺度谱、重力、表面张力和风场曳力等综合作用下, 呈现出复杂的运动、空间分布、姿态指向和形变特性, 这使雷达观测到的多普勒速度与背景风场差异较大, 如图 6 所示 (D 为水凝物颗粒的直径, 图中原点为雷达, 横坐标为水平距

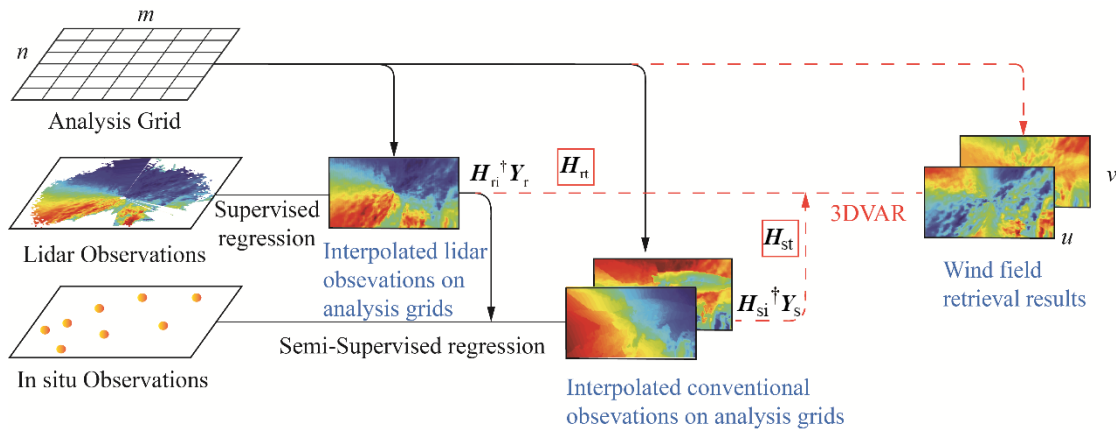


图5 三维风场反演方法框架

离,纵坐标为高度),不同尺寸的雨滴受风场影响下落轨迹有明显差异.雷达极化是描述水凝物形状和尺寸等属性的有力工具,通过雷达极化参数的测量可有效区分水凝物颗粒的类型,进而基于可表征背景风场的水凝物颗粒开展背景风场的反演.本节首先分析极化微波测风雷达的发展现状,进而基于极化微波雷达探讨从雷达回波多普勒速度谱中反演三维风场的研究进展.

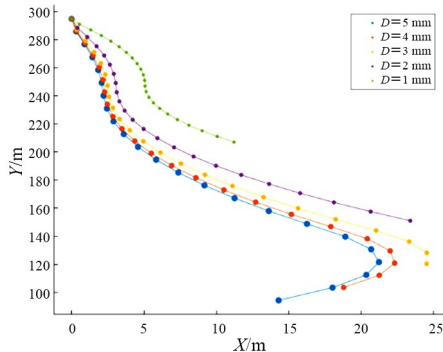


图6 不同尺寸雨滴下降过程中随风场变化的差异

3.1 全极化高分辨微波雷达研制

在降雨条件下,极化微波雷达可通过差分反射率等极化参量来获取雨滴的形状和大小等目标属性,是一种通过测量雨滴示踪粒子雷达特性来反演风场的有效传感器^[35]. 21世纪初期,美国在其多普勒天气雷达WSR-88D上开展极化改造并进行应用^[36],至2013年升级改造工作全部完成,至此美国的双极化多普勒雷达网络广泛投入气象业务使用.与美国发展双极化多普勒雷达的过程同步,欧洲、日本等地也先后发展了双极化多普勒雷达并投入业务使用^[37,38].国内极化雷达发展始于20世纪80年代末^[39].1989年中国科学院对713型C波段天气雷达开展双极化升级改造,并开展了相应的探测应用研究^[40].进一步,中国科学院研制了X波段

双极化多普勒天气雷达,此外成都中电锦江、北京敏视达等厂家相继研制了各类型双极化多普勒雷达^[41].在此基础上,中国新一代天气雷达网布局完成,极大提升了对气象灾害的监测和防范能力^[42].

从上述研究分析可以看出,目前国内外的极化雷达主要应用于大尺度气象天气预报,针对中小尺度低空复杂风场的极化雷达探测方面的研究尚少.对于低空、小尺度、变化复杂的风场,现有极化雷达探测存在雷达分辨率不高、探测扫描速度慢、极化通道幅度一致性和相位误差较大以及大尺度分布式目标精确测量难等技术难题.

针对上述难题,国防科技大学王雪松教授团队针对低空、小尺度、变化复杂的风场,研制了全极化高分辨微波雷达(如图7所示,雷达工作频率为 9420 ± 250 MHz,探测距离不低于150 km,距离分辨率为75 m,差分反射率因子精度为0.1 dB,差分传播相移精度为 0.1° ,差分传播相移率精度为 -0.1 ($^\circ$)/km),并设计开发了国内首套自主可控软硬件平台的天气雷达信号处理系统,解决了雷达系统参数(如功率、频率、极化)快速迭代设计的难题.他们发明了点状标校体双GPS协飞的精密校准装置^[43],利用无人机挂飞标校器(图8(a)),设计双GPS系统准确定位标校器(图8(b)),利用无人机的编程飞行模式,使标校器在雷达远场的某一高度的不同位置做悬停运动(图8(c)),悬停位置的轨迹可以设计为“左副瓣-主瓣-右副瓣”,通过改变无人机的飞行高度获得完整的天线方向图的测量数据.该方法解决了传统端对端校准技术强依赖地物地貌和特定天气的问题,首次实现了对全极化雷达天线方向图的精细重构,极化通道幅度一致性误差小于0.5 dB,相位误差小于 3° ,与美国WiBEX等世界先进极化雷达水平相当.他们提出了多尺度波形设计与多域信号联合处理方法^[44,45],针对极化气象雷达的地杂波以及窄带动态环境干扰的抑制问题,设计了3种不同的杂波抑制算法适用于单极

化,双极化以及全极化等不同体制的雷达.该方法解决了强杂波条件下弱信号鲁棒探测的难题,突破了传统的尺寸巨大、复杂运动目标难以实现极化信息精确测量的瓶颈,实测结果表明信号恢复处理后多普勒速度估计精度、反射率估计精度和差分反射率估计精度较主流 GMAP(Gaussian Model Adaptive Processing)算法分别提升了2倍、1.2倍和1.2倍.



图7 全极化高分辨微波雷达

现有极化微波雷达及其风场探测体系普遍使用机械扫描抛物面雷达,但是低空复杂风场存在演化尺寸较小、时间和空间上快速变化、生消迅速等特点,其体扫周期长、空间分辨率不足等问题在一定程度上影响了对低空复杂风场的实时探测与反演,未来风场探测微波雷达将向全极化、相控阵体制转变^[46,47].全极化相控阵雷达可显著提升雷达的时间和空间分辨率,针对风场示踪物特性,开展雷达的数字波束形成、极化校准和交叉解耦合等方面的研究,增加风场示踪物如雨滴尺寸、密度和大小等探测信息量,可实现低空复杂风场



(a) 无人机挂载标校器示意



(b) 双GPS系统定位标校器内部结构示意图



(c) 标校器悬停运动示意

图8 极化雷达校准硬件和实验场景设置

的实时精细探测.利用多部全极化相控阵雷达组网探测有望得到高时空分辨率的强度场和三维反演风场,可为低空复杂危害风场的演化分析提供更好的技术支撑.

3.2 降雨条件下风场反演方法研究

降雨条件下,微波雷达通过探测雨滴的回波来反演背景风场,但从雷达多普勒速度回波反演三维背景风速存在两个技术难题.首先,雨滴自身质量较重,下降过程中呈现较强的惯性,背景风场的速度与作为示踪物的雨滴速度不一致,同时不同尺寸的雨滴重量和形状亦不尽相同,在一个雷达探测分辨单元内存在大量不同尺寸的雨滴,导致雷达回波的多普勒谱出现展宽(图9).因而如何解析雷达探测到的雨滴速度与背景风场速度的关系,是第一个技术难题.其次,与激光雷达类似,极化微波雷达回波多普勒速度仅能表示雨滴速度在雷达波束方向上的投影.如何由退化的一维径向速度反演完备的背景风场三维速度,是第二个技术难题.

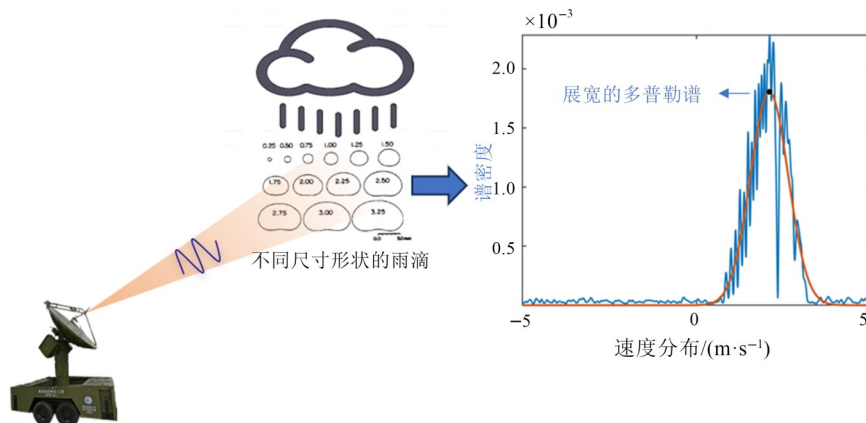


图9 极化雷达探测降雨条件下风场示意

传统雷达仅通过单极化特征进行目标探测,而双极化和全极化雷达则可通过发射和接收水平及垂直极

化电磁波,基于差分反射率、差分相移等极化参数来对雨滴的属性和运动等特征进行刻画.降雨时雷达探测

分辨单元内雨滴以雨滴群的形式存在,因此对雨滴尺寸的测量通常采用雨滴谱形式即单位空间内各尺寸雨滴的数目分布,目前广泛使用的雷达探测雨滴谱分布模型为 Gamma 分布模型^[48]和标准化 Gamma 分布模型^[49]. 基于上述模型,Atlas 等^[50]基于垂直指向多普勒雷达研究了多普勒谱与雨滴尺寸的关系,形成了平均多普勒速度与雷达反射率因子的经验公式. 在此基础上,彭红等^[51]研究了单部多普勒雷达反演流场结构的相关技术,得到与降水回波演变匹配的垂直流场结构. 马建立等^[52]基于风廓线雷达开展了背景风场垂直速度分量的反演研究. 当前对降雨条件下风场反演技术的研究主要集中在由雷达径向速度反演二维或三维速度场这一方面,对降雨条件下多普勒雷达探测资料(主要与雨滴速度有关)与背景风场的速度之间的关系的研究尚少.

针对降水条件下风场与水凝物电磁特性、运动学特性之间的耦合复杂难题,国防科技大学王雪松、李健兵团队提出了基于极化信息的背景风场精细反演方法^[53].

首先,在下落过程中雨滴形变程度与尺寸的依赖关系^[54]基础上(图 10),研究了雨滴受背景风场影响形状轮廓的变化,探明了雨滴形变与背景风场之间的作用机理.

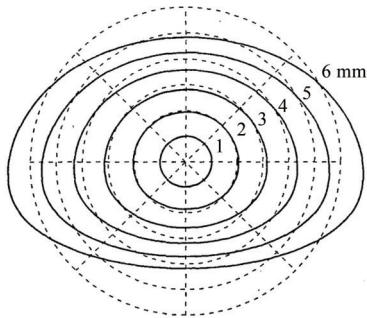
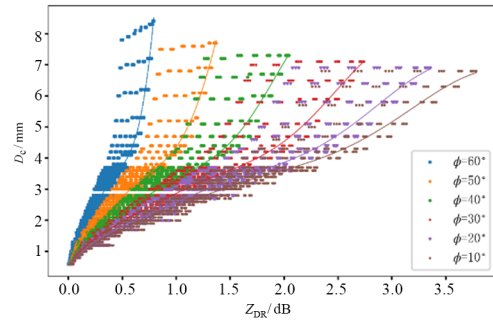
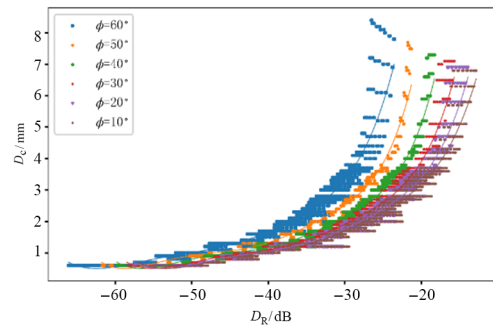


图 10 不同尺寸雨滴在平衡状态下的形状

其次,基于非球形雨滴粒子姿态指向的圆退极化系数稳定性^[55],提出雷达极化参量融合的雨滴特征散射尺寸获取方法,结合差分反射率和退极化比等两种雷达探测特征参数来实现雨滴特征尺寸(对电磁散射占主导作用的雨滴尺寸)的回归反演(图 11),图中 ϕ 为雷达扫描仰角, Z_{DR} 为差分反射率, D_R 为退极化比, D_c 为雨滴特征尺寸. 从图 11 可以看出, Z_{DR} 和 D_R 都与雷达仰角密切相关, Z_{DR} 与 D_c 之间存在近似线性关系, D_R 与 D_c 之间存在近似指数关系. 从函数关系角度来看 Z_{DR} 似乎可以更好地表征 D_c ,而 Z_{DR} 对雨滴倾斜角的敏感程度要强于 D_R , D_R 受雨滴倾斜角的影响要小得多. 从函数关系和对雨滴倾斜角的敏感程度两个方面,结合两种雷达极化参量的优势,可更好地反演雨滴特征尺寸.



(a) 基于差分反射率的雨滴特征尺寸反演



(b) 基于退极化比的雨滴特征尺寸反演

图 11 基于雷达极化参量的雨滴特征尺寸反演

最后,结合雷达极化参量反演的雨滴特征尺寸与低雷诺数条件下的特征雨滴动力学运动规律,构建雷达回波多普勒速度与背景风场之间的关联模型,如式(4)所示:

$$\frac{\partial Z_{Ray}}{\partial t} + (\mathbf{U}_{wind} \cdot \nabla) Z_{Ray} + \frac{\partial \left(\frac{(\mathbf{U}_{wind} \cdot \vec{r}) - \overline{v_D}}{\sin(\phi)} Z_{Ray} \right)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

其中,雷达反射率 Z_{Ray} 和多普勒速度的加权平均值 $\overline{v_D}$ 可以基于雷达回波直接计算,雷达波束方向单位向量 \vec{r} 和雷达仰角 ϕ 都为可控可预知参量,背景风场速度 \mathbf{U}_{wind} 为未知量. 基于上述构建雷达回波多普勒速度与背景风场之间的关联模型,利用变分同化求解方法实现降水条件下三维背景风场的精确反演.

4 低空复杂风场全天候探测及危害特征提取

低空复杂风场全天候精细探测及危害识别是民用航空、风力资源勘探等领域需要着力解决的问题. 微波雷达和激光雷达分别是降水和晴空条件下有利的风场探测传感器,然而自然大气中如小雨/薄雾/轻霾等条件下,存在气溶胶和雨滴粒子同时存在且可测的情况,且在气溶胶浓度足够大的条件下(城市污染区域、沙尘暴区域、低空海面区域等),即使没有降水,微波雷达也有

一定探测能力. 在一些对探测范围要求不大的场景如舰载机起降的下滑道探测, 激光雷达与微波雷达存在重叠覆盖范围, 二者联合探测有利于提高信息增益. 但当前的探测方案主要采用单一微波雷达或激光雷达, 数据之间缺乏有机融合, 全天候精确观测能力显著不足. 本节首先介绍激光雷达和微波多源数据融合的研究现状, 进而分析低空复杂风场危害方面的研究进展.

4.1 低空复杂风场全天候探测

在探测低空复杂风场时, 由于激光雷达和微波雷达工作原理不同, 其探测出的目标对象可能会出现分辨率、时空尺度都不匹配的情况. 为了探测到更加准确、真实的风场, 往往会采用数据融合的方法^[56]来综合不同的雷达观测数据. 数据融合方法一方面能够让数据来源更加可靠, 另一方面也可以让数据具有更大的时空尺度.

国内外运用于风场数据融合的算法主要有逐步订正法^[57]、时空加权分析法^[58]、最优插值法^[59]、变分同化法^[60]以及近年来在气象领域发挥显著作用的机器学习方法. Kako 等^[61]将再分析数据和卫星反演数据利用最优插值方法进行融合, 制作出高精度风矢量数据集. 许遐祯等^[62]将遥感风场资料与沿岸气象站风场资料进行融合, 得到我国近海高时空分辨率风场. 杨璐等^[63]将雷达四维变分分析系统临近预报风场与自动气象站风场

观测资料进行融合, 用于开展三维风场在强对流天气临近预报中的研究. Vaccaro 等^[64]采用自适应的有监督学习方法对欧洲中期天气预报中心模式资料和气象站风场观测资料进行融合, 用于风电功率的预测.

微波雷达和激光雷达在天候适应性、工作频段、时空分辨率和数据更新率等方面都存在差异. 充分挖掘不同传感器的探测潜能, 实现不同传感器探测数据的有效融合是业界关注的重难点问题. 针对上述难题, 国防科技大学李健兵团队提出了利于全天候风场信息反演的微波雷达/激光雷达分置布站方案和联合扫描策略(图 12), 开展激光雷达和微波雷达探测能力边界分析, 基于舰船、机场等实际场景研究多源传感器探测和数据融合的信息增量, 实现风场扫描时空覆盖度及风场特征获取能力的最大化^[65]. 基于微波雷达和激光雷达在探测范围、时空分辨率与探测精度等方面的差异及互补性, Gao 等人提出了多源数据融合的三维风场变分同化反演技术, 彭芸莉开展了变分同化代价函数中不同传感器探测数据权重值的研究分析^[66], 在海军某基地进行飞机起降风场信息保障, 融合模型的精确性、稳定性和连续性较单传感器全面提升, 在小雨、薄雾、轻霾等两种传感器皆可探测的条件下可达到双视线交会观测的高精度, 有效解决了复杂风场全天候精细探测的难题. 具体步骤如下.

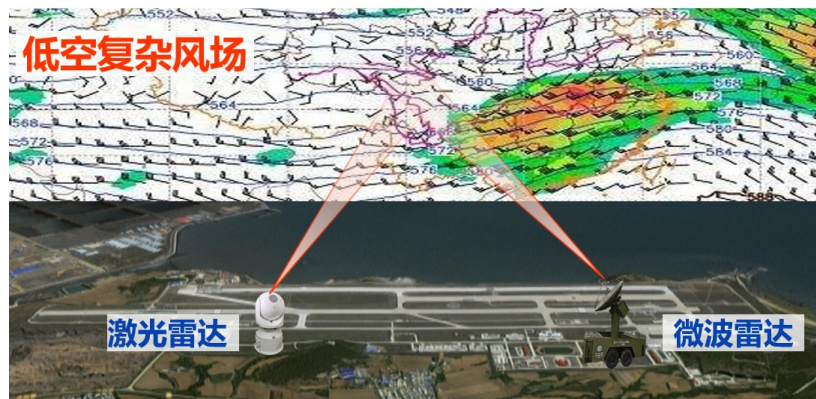


图 12 微波/激光雷达分置布站和联合扫描示意图

首先, 开展基于高阶级数展开的初始背景风场求解, 将风场的时空非线性特征通过高阶泰勒级数^[67]展开进行表征, 以流体力学运动规律、观测算子为约束, 以波束扫描获取的风场一维径向速度为输入, 结合“分解-迭代”与“岭回归”技术提高反演鲁棒性, 变分反演得到初始三维风场.

其次, 构建预测模型与流体力学规律结合的变分同化约束条件模型. 一是构建风场非穿越约束模型. 风场在流动过程中, 障碍物将会改变风场的方向和大小. 风场不能“穿越”障碍物, 即在障碍物表面, 风场应满足 $\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$, 其中 \vec{n} 为障碍物表面的法向量. 传统变

分法中忽略了边界条件的限制, 但是对于低空风来说, 风场的流动受到附近建筑的严重影响, 特别是机场、舰面等的建筑物将会对风场产生很大的扰动. 为了对低空风的精细结构进行反演, 在传统三维变分法的基础上, 通过非穿越约束将风场的边界条件作为一种信息同化进来可获得更准确的三维风场. 二是构建基于连续性方程的流体力学规律约束, 即

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (5)$$

其中, ρ 为空气密度, $\nabla \cdot \mathbf{V}$ 表示速度散度, 这一方程被称为连续方程, 它表示空气微团密度的变化是由速度的

辐散辐合引起的. 实际计算中, 还综合使用平滑约束条件, 避免出现反演奇异值.

最后, 进行三维变分同化反演. 在上述初始背景风场和约束模型基础上, 基于三维变化同化方法建立目标方程, 构建代价函数及其权重系数矩阵, 三维变分代价函数为

$$f(u, v, w) = \arg \min (W_B J_B + W_O J_O + W_C J_C + W_S J_S + W_n J_n) \quad (6)$$

其中, u, v, w 表示待反演的三维风场, 变分同化过程中迭代初值 u, v, w 为初始背景场反演结果; J_B 为初始背景风场约束; J_O 为多源观测数据约束, 包含激光雷达、天气雷达、风廓线雷达、测风仪、遥感卫星和气象台等多源融合数据; J_C 为风场连续性方程约束; J_S 为平滑条件约束; J_n 为风场非穿越条件约束; W_B, W_O, W_C, W_S 和 W_n 是各约束模型权重系数矩阵, 它们分别为 J_B, J_O, J_C, J_S 和 J_n 的权重系数矩阵, 用于决定各项约束条件的重要性, 权重系数矩阵中的每一个元素分别表示分析网格点上的权重值. 其中, W_O 为各传感器观测数据权重系数矩阵, 其取值受多传感器对复杂风场观测的观测机理和能力边界的共同影响. W_B, W_C, W_S 和 W_n 这四个权重系数矩阵的取值根据网格位置和高效高精度模型的模型统计误差而定.

4.2 低空复杂风场多危害特征提取

低空复杂风场危害如飞机尾流、低空急流、下击暴流和风切变等因其复杂的随机性和不确定性, 容易引发飞行员的耦合连锁反应, 从而引发飞行风险或导致飞行事故. 对低空复杂风场多危害特征进行提取, 可为军民航空安全提供有效支撑. 接下来详细分析相关低空复杂风场危害的研究现状.

4.2.1 飞机尾流的特征参数反演

飞机尾流是飞机飞行时产生的反向旋转的强烈旋涡^[68], 其雷达探测是机场容量提升和航空安全极为关注的问题, 关键在于尾流涡心位置和强度即速度环量的反演^[69,70]. 国内外关于飞机尾流特征参数反演的研究可以分为两类. 一类是速度包络匹配算法. Holzappel 等^[71]使用尾流切向速度来估计涡心位置和速度环量 (Tangential Velocity, TV) 方法, 该方法计算量小, 但容易受到复杂背景和噪声的影响. Rahm 等^[72,73]基于确定门限值使用多普勒谱包络来估计涡心位置和速度环量, 但结果仍会受到不同噪声环境条件影响. 为增加实用性, Wassf 等^[74]使用浮动门限值的方法. 另一类是模板匹配算法, Frehlich 等^[75]提出基于速度模型和多普勒谱的最大似然估计算法. 该算法比较鲁棒但所需计算量较大. Jacob 等^[76]基于多普勒谱匹配滤波器和最大似然估计器来估计涡心位置和速度环量. Hallermeyer

等^[77]从速度包络估计涡心位置并应用最大似然算法估计速度环量. Yoshikikawa 等^[78]在此基础上对尾流回波信号进行建模并提高特征参数估计的准确度. Smalikhov 等^[79]从多普勒速度中估计出初步的尾流涡心位置, 再通过比较测量得到的多普勒速度和理论计算速度估计得到环量.

国防科技大学李健兵团队^[80]结合飞机尾流涡旋速度场的对称性特征, 提出了 Gabor 滤波和多普勒速度极差相结合的两步涡心定位技术, 定位效果如图 13(a) 所示. 在精确的飞机尾流涡心定位基础上, 结合尾流涡核内旋度均匀特征, 进而提出了基于路径积分的尾流速度环量反演方法^[81], 如图 13(b) 所示. 当激光雷达波束在俯仰角 α_n 处扫描到飞机尾流时, 在波束上的路径测量单元为 $l_n = \overline{A_n B_n}$, l'_n 为以左涡心 O_{c1} 为圆心的一段弧线, l''_n 为连接点 A_n 和 C_n 的半径上一段直线, S_n 为线段 l'_n, l''_n 和 l_n 围成的闭合积分区域, 根据 Stokes 理论, 关于左涡速度分量 V_L 的路径积分公式如下:

$$\int_{l'_n + l''_n + l_n} V_L \cdot dl = \iint_{S_n} \nabla \times V_L \cdot dS \quad (7)$$

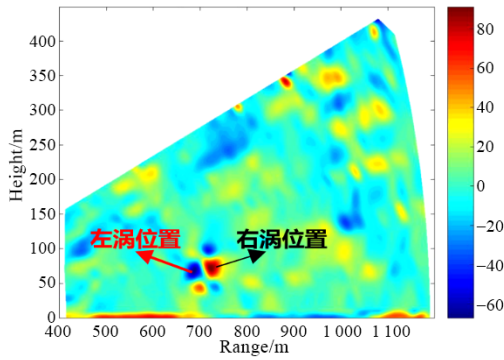
进而通过对飞机尾流左涡速度分量 V_L 、右涡速度分量 V_R 、背景切向风 V_c 和大气湍流速度 V_e 等速度矢量分量的路径积分推导可得到飞机尾流速度环量与多普勒速度之间的关系式. 该算法充分利用观测区域多普勒速度信息, 反演误差较经典模板匹配方法^[71] (TV 方法) 降低 15% 以上, 是当前国际上精度和鲁棒性综合性能最优的方法之一. 相关飞机尾流特征反演技术应用于香港国际机场航空安全管制已逾 3 年, 为机场的尾流间隔调控提供了辅助决策, 支撑吞吐量提升 2%.

4.2.2 低空风切变的识别与预警

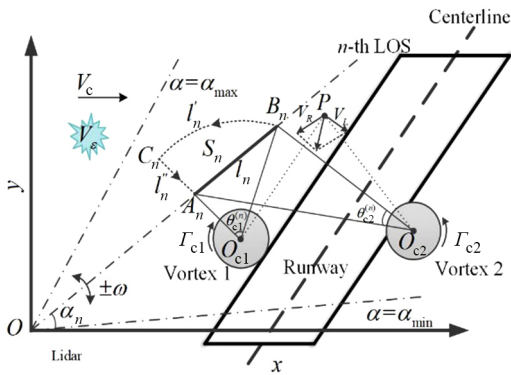
低空风切变危害具有突发性强、生命期短、空域低、尺度小、强度大等特点, 当飞机在空速小、距地高度低的起降阶段遭遇低空风切变时, 在短时间内飞机的稳定飞行状态可能会发生改变 (图 14), 因此飞机起降受低空风切变影响巨大. 国内外关于低空风切变等危害方面做了大量研究, NASA 率先提出基于飞机在风场中总能量 (动能和势能) 的变化率判断当前风切变程度是否威胁飞机安全的评估方法^[82]. Bowles 在该方法基础上, 首次引入了评估飞机在风切变下危险性的 F 因子^[83], 其计算公式如式 (8) 所示:

$$F = \frac{1}{g} \frac{d}{dt} U - \frac{w}{V_a} \quad (8)$$

其中, g 为重力加速度, U 为飞机飞行方向上的迎风速, t 为时间, w 为垂直风速, V_a 为飞机速度. F 因子反映了变化风场对飞机飞行过程中飞机总能量的影响. 当 $F < 0$ 时, 表明飞机可能遭遇逆风或上升气流; 当 $F > 0$ 时, 表明飞机可能遭遇顺风或者下沉气流. F 因子的数



(a) 尾流涡心的 Gabor 滤波定位示意图^[82]



(b) 尾流环量计算的路径积分示意图^[83]

图 13 飞机尾流的两步涡心定位和路径积分速度环量计算方法示意图

值越大,表明风切变对飞机飞行的危害越大, F 因子阈值的取值当前在国际上尚未形成统一标准。

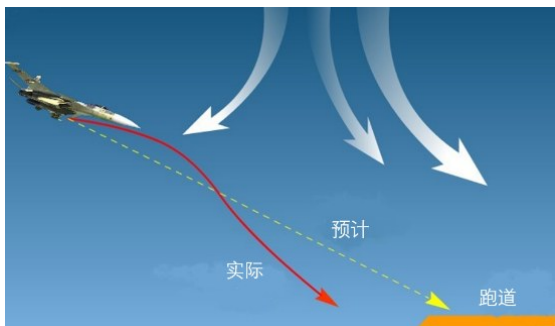


图 14 飞机遭遇风切变危害飞行轨迹变化示意图

国内研究学者在上述研究的基础上,也对风切变危险评估做了一系列研究.周洲^[84]采用关联度分析方法分析了 F 因子与实际危险之间的关系,证实了 F 因子可用于判断变化风场的危险程度;武虎子等^[85]对大型飞机在风切变环境中的飞行安全尺度进行了详细分析,并指出飞行安全尺度可以由风切变的危险尺度和速度危险尺度两部分构成.Chan^[86]提出基于激光雷达

的 F 因子低空风切变预警算法.蒋立辉等^[87]基于香港机场提出的风切变预警算法,提出了对多普勒激光雷达回波信号进行单-双斜坡联合检测的方法.兵器工业209所周鼎富研究团队基于风切变的气象学特征,结合风场脉动的时间空间分布,提出了基于K邻域滤波的最小二乘拟合低空风切变识别算法^[88],通过分析机场地形地貌特点和飞机进场规范,合理规划低空风切变重点监测区域,提出PPI扫描模式下水平风场风切变值,有效提升了风切变的有效识别命中率.国防科技大学李健兵团队^[89]提出基于斜坡改进的激光雷达风切变预警算法,应用最大最小值代替传统算法的斜坡首尾风速差,弥补了现有 F 因子算法虚警太高、斜坡算法会产生漏报的不足,为机场风切变预警能力的提升提供了有效解决途径。

总体而言, F 因子算法等航空安全中使用较多的风切变预警方法受复杂风场的影响计算结果波动比较剧烈,虚警率过高是其面临的长期难题.基于现有飞机尾流特征反演和风切变危害识别模型,利用深度学习等人工智能方法,在大数据基础上开展物理模型与数据驱动相结合的风场危害综合体系构建,是实现低空复杂风场危害有效识别和预警方面潜力较大的发展方向。

5 总结

低空复杂风场对飞机起降安全影响极大,是实现民航机场容量提升和飞机安全快速起降的关键要素.低空复杂风场的全天候精细探测涉及雷达传感器设计、三维风场反演和多源数据融合等关键技术,是雷达探测领域的新兴方向.总体来看,在相关学术研究和硬件升级发展的支撑下,低空复杂风场的全天候探测研究得到了长足进步,风场探测逐渐由通常的廓线模式向精细探测跃升,相关成果也逐步应用于航空安全保障.未来的研究方向包括:

(1) 针对高超声速目标等扰动形成的复杂风场,研究更高分辨率、更大测量范围的探测系统,从更加精细的层次上刻画低空复杂风场,使之成为流体力学及相关科学研究的利器;

(2) 当前对复杂风场的危害刻画主要是从飞机尾流、风切变、下击暴流等角度分别进行,业内仍缺乏统一和通用的风场危害刻画手段,可以将目前快速发展的人工智能技术应用于风场危害评估,结合大量飞机测控数据和风场探测数据形成更为全面的低空复杂风场航空危害综合指标体系;

(3) 航空领域需要考虑极端恶劣天气等条件的影响,这些情况下的低空风场异常复杂,探测和反演的难度极大,当前技术还难以完全适应,亟需针对极端恶劣

条件下航空飞行安全的需求,开展大气动力学和雷达科学等领域的融合创新研究,突破极端恶劣天气条件下复杂风场精细探测的难题。

参考文献

- [1] OUDE NIJHUIS A C P, THOBOIS L P, BARBARESCO F, et al. Wind hazard and turbulence monitoring at airports with lidar, radar, and mode-S downlinks: The UFO project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(11): 2275-2293.
- [2] CROFT J. Taming loss-of-control: Solutions are elusive[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2002, 157(9): 50-52.
- [3] 李唐. 刀尖上的舞蹈[J]. *政工学刊*, 2013(1): 81.
LI T. Dance on the blade tip[J]. *Journal of Political Engineering*, 2013(1): 81. (in Chinese)
- [4] WILKERSON T D, MARCHANT A B, APEDAILE T J. Wind field characterization from the trajectories of small balloons[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(9): 1236-1249.
- [5] KESSLER E. Low-level windshear alert systems and Doppler radar in aircraft terminal operations[J]. *Journal of Aircraft*, 1990, 27(5): 423-428.
- [6] 王晓蕾, 郭俊, 陈晓颖, 等. 两种测风仪的动态比对试验及分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 15(3): 283-289.
WANG X L, GUO J, CHEN X Y, et al. Introduction and analysis of dynamic comparison test between two wind sensors[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 15(3): 283-289. (in Chinese)
- [7] TSE S M, HAGIO M, MAEDA Y. Windshear detection by terminal Doppler weather radar during tropical cyclone Mujigae in 2015[J]. *Meteorological Applications*, 2019, 26(4): 620-631.
- [8] SHUN C M, LAU S Y, LEE O S M. Terminal Doppler weather radar observation of atmospheric flow over complex terrain during tropical cyclone passages[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(12): 1697-1710.
- [9] 戈书睿. 风廓线雷达探测垂直气流和大气边界层高度方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
GE S R. Study on the Method of Detecting Vertical Airflow and Atmospheric Boundary Layer Height by Wind Profiler Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] BESSON C, DOLFI-BOUTEYRE A, CANAT G, et al. Doppler LIDAR developments for aeronautics[J]. *Aero-spaceLab Journal*, 2016(12): 1-16.
- [11] XU H, LI J. Performance analysis of dual-frequency lidar in the detection of the complex wind field[J]. *Opt Express*, 2021, 29(15): 23524-23539.
- [12] HON K, CHAN P. Aircraft wake vortex observations in Hong Kong[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(6): 709-718.
- [13] STEPHAN A, WILDMANN N, SMALIKHO I N. Effectiveness of the MFAS method for determining the wind velocity vector from windcube 200s lidar measurements [J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, 32(5): 555-563.
- [14] GUTIERREZ-ANTUNANO M A, TIANA-ALSINA J, SALCEDO A, et al. Estimation of the motion-induced horizontal-wind-speed standard deviation in an offshore Doppler lidar[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2037.
- [15] LINDENSTEIN J. Mission: Watching the wind[J]. *Mission: Watching the Wind*, 2014, 15(10): 17.
- [16] 崔桐, 陈相成, 戴光耀, 等. 高分辨率变焦式连续波测风激光雷达设计与实验[J]. *大气与环境光学学报*, 2022, 17(4): 393-408.
CUI T, CHEN X C, DAI G Y, et al. Design and experiment of varifocal CW-wind lidar with high resolution[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2022, 17(4): 393-408. (in Chinese)
- [17] LIANG C, WANG C, XUE X, et al. Meter-scale and sub-second-resolution coherent Doppler wind lidar and hyper-fine wind observation[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(13): 3179-3182.
- [18] 冯力天, 郭弘其, 陈涌, 等. 1.55 μm 全光纤多普勒测风雷达系统与试验[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 844-847.
FENG L T, GUO H Q, CHEN Y, et al. Experiment of all fiber Doppler lidar at 1.55 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 844-847. (in Chinese)
- [19] 周杰, 杨泽后, 宋帅, 等. 应用于区域三维风场测量的船载激光测风雷达[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 49-55.
ZHOU J, YANG Z H, SONG S, et al. Ship-borne laser wind radar applied to regional three-dimensional wind field measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 49-55. (in Chinese)
- [20] XU H, SUN D F, WU Y C, et al. Detection range/spatial resolution enhancement of coherent Doppler wind lidar based on improved simplex coding[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 3295085.
- [21] CAYA D, ZAWADZKI I. VAD analysis of nonlinear

- wind fields[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1992, 9(5): 575-587.
- [22] 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法[J]. *气象学报*, 1992, 50(1): 81-90.
TAO Z Y. The vap method to retrieve the wind vector field based on single-doppler velocity field[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, 50(1): 81-90. (in Chinese)
- [23] SMALIKHO I N, BANAKH V A. Measurements of wind turbulence parameters by a conically scanning coherent Doppler lidar in the atmospheric boundary layer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(11): 4191-4208.
- [24] BANAKH V, SMALIKHO I. Lidar estimates of the anisotropy of wind turbulence in a stable atmospheric boundary layer[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2115.
- [25] WILDMANN N, BODINI N, LUNDQUIST J K, et al. Estimation of turbulence dissipation rate from Doppler wind lidars and in situ instrumentation for the Perdigão 2017 campaign[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(12): 6401-6423.
- [26] 冯长中, 吴松华, 刘秉义. 相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0410001.
FENG C Z, WU S H, LIU B Y. Research on wind retrieval method of coherent Doppler lidar and experimental verification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0410001. (in Chinese)
- [27] WALDTEUFEL P, CORBIN H. On the analysis of single-doppler radar data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(4): 532-542.
- [28] HUANG T J, TIAN Y H, LI J, et al. Salient region detection and segmentation for general object recognition and image understanding[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(12): 2461-2470.
- [29] 郎需兴, 魏鸣, 葛文忠, 等. 一种新的单多普勒雷达风场反演方法[J]. *气象科学*, 2001, 21(4): 417-424.
LANG X X, WEI M, GE W Z, et al. A new method of retrieving windfield using single Doppler radar[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2001, 21(4): 417-424. (in Chinese)
- [30] 马建文, 秦思娴, 王皓玉, 等. 数据同化算法研发与实验[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
MA J W, QIN S X, WANG H Y, et al. Research and Experiment of Data Assimilation Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [31] GAO J D, XUE M, BREWSTER K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(3): 457-469.
- [32] 张洪芹. 非线性最小二乘集合四维变分同化方法的发展与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
ZHANG H Q. Development and Application of Four-dimensional Variational Assimilation Method for Nonlinear Least Squares Sets[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [33] GAO H, ZHOU J, CHAN P W, et al. A hybrid method for fine-scale wind field retrieval based on machine learning and data assimilation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 3155662.
- [34] 高航, 周洁, 胡健, 等. 基于激光雷达探测的三维风场变分反演算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2028002.
GAO H, ZHOU J, HU J, et al. Variational retrieval algorithm for three-dimensional wind field based on lidar detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2028002. (in Chinese)
- [35] SELIGA T A, BRINGI V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15(1): 69-76.
- [36] DOVIK R J, BRINGI V, RYZHKOV A, et al. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(3): 257.
- [37] ZRNIC D S, RYZHKOV A V. Polarimetry for weather surveillance radars[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(3): 389-406.
- [38] RYZHKOV A V, SCHUUR T J, BURGESS D W, et al. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(6): 809-824.
- [39] 刘黎平, 胡志群, 吴翀. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和應用[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 28-33.
LIU L P, HU Z Q, WU C. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(3): 28-33. (in Chinese)
- [40] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. CINRAD/SA 雷达天线的辐射特性分析及其支持双线偏振升级的可行性研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(6): 699-708, 819.
LIANG H H, XU B X, LIU L P, et al. Cinrad/sa radiation pattern and feasibility for dual polarization upgrades[J].

- Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(6): 699-708, 819. (in Chinese)
- [41] 刘黎平, 葛润生. 中国气象科学研究院雷达气象研究 50 年[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 682-689.
- LIU L P, GE R S. An overview on radar meteorology research in Chinese academy of meteorological sciences for a half century[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 682-689. (in Chinese)
- [42] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. 双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法[J]. 大气科学, 2006, 30(4): 635-644.
- LIANG H H, XU B X, LIU L P, et al. An improved method on the simultaneous transmission scheme of dual polarimetric weather radar[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(4): 635-644. (in Chinese)
- [43] YIN J P, HOOGEBOOM P, UNAL C, et al. UAV-aided weather radar calibration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(12): 10362-10375.
- [44] YIN J P, UNAL C, SCHLEISS M, et al. Radar target and moving clutter separation based on the low-rank matrix optimization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(8): 4765-4780.
- [45] YIN J P, CHEN H N, LI Y Z, et al. Clutter mitigation based on spectral depolarization ratio for dual-polarization weather radars[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 6131-6145.
- [46] PALMER R, BODINE D, KOLLIAS P, et al. A primer on phased array radar technology for the atmospheric sciences[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(10): E2391-E2416.
- [47] KOLLIAS P, PALMER R, BODINE D, et al. Science applications of phased array radars[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(10): E2370-E2390.
- [48] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. Journal of Applied Meteorology, 1983, 22(10): 1764-1775.
- [49] WILLIS P T. Functional fits to some observed drop size distributions and parameterization of rain[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984, 41(9): 1648-1661.
- [50] ATLAS D, SRIVASTAVA R C, SEKHON R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1973, 11: 1.
- [51] 彭红, 葛润生. 单部多普勒天气雷达对降水中垂直流场结构的探测研究[J]. 应用气象学报, 1995, 6(4): 422-428.
- PENG H, GE R S. Study on detection of vertical flow field structure in precipitation by single Doppler weather radar[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1995, 6(4): 422-428. (in Chinese)
- [52] 马建立, 阮征, 黄钰. 风廓线雷达估测降水云中大气垂直速度的一种方法[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 825-831.
- MA J L, RUAN Z, HUANG Y. Method of WPR getting air vertical velocity in precipitation cloud[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(3): 825-831. (in Chinese)
- [53] PENG Y L, LI J B, YIN J P, et al. Retrieval of the characteristic size of raindrops for wind sensing based on dual-polarization radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 9974-9986.
- [54] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V. Polarimetric Doppler Weather Radar[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [55] RYZHKOV A, MATROSOV S Y, MELNIKOV V, et al. Estimation of depolarization ratio using weather radars with simultaneous transmission/reception[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56(7): 1797-1816.
- [56] 张东翔. 多源卫星海面风场产品检验及融合研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- ZHANG D X. Research on Product Inspection and Fusion of Multi-source Satellite Sea Surface Wind Field[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [57] KALNAY E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability[M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [58] EVENSEN G. Data Assimilation: The Ensemble Kalman filter[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2009.
- [59] 乔方利. 现代海洋/大气资料同化方法的统一性及其应用进展[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(4): 79-93.
- QIAO F L. The unification and application reviews of modern oceanic/atmospheric data assimilation algorithms [J]. Advances in Marine Science, 2002, 20(4): 79-93. (in Chinese)
- [60] 邹晓蕾. 资料同化理论和应用:上册[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- ZOU X L. Theory and Application of Data Assimilation: Volume I[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009. (in Chinese)
- [61] KAKO S, ISOBE A, KUBOTA M. High-resolution AS-

- CAT wind vector data set gridded by applying an optimum interpolation method to the global ocean[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2011, 116 (D23): D23107.
- [62] 许遐祯, 高健, 张康宇, 等. 基于多源数据的中国近海风场融合方法研究[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 15(3): 325-330.
XU X Z, GAO J, ZHANG K Y, et al. Fusion method of China's offshore wind field based on multi-source data [J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 15(3): 325-330. (in Chinese)
- [63] 杨璐, 陈敏, 陈明轩, 等. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究[J]. *气象学报*, 2019, 77(2): 243-255.
YANG L, CHEN M, CHEN M X, et al. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2019, 77(2): 243-255. (in Chinese)
- [64] VACCARO A, MERCOGLIANO P, SCHIANO P, et al. An adaptive framework based on multi-model data fusion for one-day-ahead wind power forecasting[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(3): 775-782.
- [65] 周洁. 基于激光雷达探测的风场特征反演技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
ZHOU J. Retrieval of Wind Field Characteristics Based on Lidar Measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [66] 彭芸莉. 基于极化雷达探测的风场反演技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
PENG Y L. Wind Field Retrieval Based on Dual-polarimetric Radar Detection[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [67] GAO H, ZHOU J, SHEN C, et al. High-order Taylor expansion for wind field retrieval based on ground-based scanning lidar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 3170990.
- [68] 沈淳, 李健兵, 高航, 等. 基于数据同化的飞机尾流行为预测[J]. *雷达学报*, 2021, 10(4): 632-645.
SHEN C, LI J B, GAO H, et al. Aircraft wake vortex behavior prediction based on data assimilation[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(4): 632-645. (in Chinese)
- [69] SHEN C, LI J, GAO H. Two parameter-retrieval algorithms of aircraft wake vortex with Doppler lidar in clear air [C]//29th International Laser Radar Conference (ILRC29). Hefei: Curran Associates, Inc., 2019: 08024.
- [70] 沈淳, 高航, 王雪松, 等. 基于激光雷达探测的飞机尾流特征参数反演系统[J]. *雷达学报*, 2020, 9(6): 1032-1044.
SHEN C, GAO H, WANG X S, et al. Aircraft wake vortex parameter-retrieval system based on lidar[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(6): 1032-1044. (in Chinese)
- [71] HOLZÄPFEL F, GERZ T, KÖPP F, et al. Strategies for circulation evaluation of aircraft wake vortices measured by lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(8): 1183.
- [72] RAHM S, SMALIKHO I, KÖPP F. Characterization of aircraft wake vortices by airborne coherent Doppler lidar [J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(3): 799-805.
- [73] RAHM S, SMALIKHO I. Aircraft wake vortex measurement with airborne coherent Doppler lidar[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(4): 1148-1155.
- [74] WASSAF H, BURNHAM D, WANG F. Wake vortex tangential velocity adaptive spectral (TVAS) algorithm for pulsed lidar systems[C]//16th Coherent Laser Radar Conference 2011. Huntsville: Universities Space Research Association, 2011: 206-217.
- [75] FREHLICH R, SHARMAN R. Maximum likelihood estimates of vortex parameters from simulated coherent Doppler lidar data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(2): 117-130.
- [76] JACOB D, LAI D, DELISI D, et al. Assessment of Lockheed Martin's aircraft wake vortex circulation estimation algorithms using simulated lidar data[C]//Proceedings of the 3rd AIAA Atmospheric Space Environments Conference. Reston: AIAA, 2011: 2011-3196.
- [77] HALLERMEYER A, DOLFI-BOUTEYRE A, VALLA M, et al. Development and assessment of a wake vortex characterization algorithm based on a hybrid lidar signal processing[C]//Proceedings of the 8th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston: AIAA, 2016: 2016-3272.
- [78] YOSHIKAWA E, MATAYOSHI N. Aircraft wake vortex retrieval method on lidar lateral range-height indicator observation[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(7): 2269-2278.
- [79] SMALIKHO I N, BANAKH V A, HOLZÄPFEL F, et al. Method of radial velocities for the estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured by coherent Doppler lidar[J]. *Opt Express*, 2015, 23(19): A1194-A1207.
- [80] SHEN C, LI J B, ZHANG F L, et al. Two-step locating

method for aircraft wake vortices based on Gabor filter and velocity range distribution[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(12): 1958-1967.

- [81] LI J, SHEN C, GAO H, et al. Path integration (PI) method for the parameter-retrieval of aircraft wake vortex by Lidar[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4286-4306.
- [82] JOPPA R G. Wind Shear Detection Using Measurement of Aircraft Total Energy Change[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1976.
- [83] BOWLES R L. Windshear detection and avoidance: Airborne systems survey[C]//29th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE, 1990: 712-714.
- [84] 周洲. 飞机在风切变场中的危险性评估及预警时间的确定[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(4): 458-463. ZHOU Z. A Determination of hazard and alert time for an aircraft flying in wind-shear field[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1994, 26(4): 458-463. (in Chinese)
- [85] 武虎子, 耿建中, 罗振谊, 等. 大型飞机在风切变环境中飞行安全尺度分析[J]. 飞行力学, 2013, 31(4): 305-307, 312. WU H Z, GENG J Z, LUO Z Y, et al. Analysis of flight safety scale in windshear for large aircraft[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(4): 305-307, 312. (in Chinese)
- [86] CHAN P W. Application of LIDAR-based F-factor in windshear alerting[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2012, 21(2): 193-204.
- [87] 蒋立辉, 闫妍, 熊兴隆, 等. 基于斜坡检测的多普勒激光雷达低空风切变预警算法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0106001. JIANG L H, YAN Y, XIONG X L, et al. Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0106001. (in Chinese)
- [88] 范琪, 郑佳锋, 周鼎富, 等. 基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(4): 462-472. FAN Q, ZHENG J F, ZHOU D F, et al. Research on airport low-level wind shear identification algorithm based on laser wind radar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(4): 462-472. (in Chinese)
- [89] 张千千, 沈淳, 高航, 等. 基于激光雷达的斜坡改进风切变预警算法[J]. 激光与红外, 2023, 53(8): 1186-1195. ZHANG Q Q, SHEN C, GAO H, et al. Ramp-improved al-

gorithm in low-level wind shear alerting based on lidar[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(8): 1186-1195. (in Chinese)

作者简介



沈淳 男, 1985年8月出生于福建诏安. 现为国防科技大学电子科学学院助理研究员. 获军队科技进步奖、电子学会科技进步奖等奖项3项. 主要研究方向为雷达探测与电子对抗. 中国电子学会会员编号: E190085199M. E-mail: chunshen@nudt.edu.cn



李健兵 男, 1979年9月出生于湖南邵东. 现为国防科技大学电子科学学院教授、博士生导师. 主要研究方向为新体制雷达. 主持173基础加强重点项目、国家自然科学基金重点项目等多项重要科研项目. 中国电子学会会员编号: E190014801S. E-mail: jianbingli@nudt.edu.cn



高航 女, 1995年10月出生于四川雅安. 现为国防科技大学电子科学学院博士. 主要研究方向为雷达信号处理. 中国电子学会会员编号: E190086279M. E-mail: gaohang108@163.com



殷加鹏 男, 1990年5月出生于浙江苍南. 现为国防科技大学电子科学学院副研究员、硕士生导师. 获中国电子学会一等奖. 主要研究方向为雷达探测与电子对抗. E-mail: yinjiapeng@nudt.edu.cn



王雪松 男, 1972年10月出生于内蒙古包头. 现为国防科技大学电子科学学院教授、博士生导师. 主要研究方向为雷达、精确制导、电子对抗等. 建立了瞬态极化雷达信号处理的理论与方法, 主持研制成功国际首部瞬态极化雷达, 带领团队突破了宽带雷达极化精密测量、极化识别抗干扰、极化域变焦超分辨等一系列关键技术, 成功用于我国多型雷达. 在国内电抗领域最早提出“间歇采样转发干扰”“SAR微动调制干扰”等原创性技术, 带领团队成功研制我国成像雷达对抗领域首套灵巧自卫对抗设备. 相关成果获国家科技进步二等奖2项, 军队/省部/学会一等奖8项, 荣获中国发明协会创业奖特等奖, 并被授予“当代发明家”荣誉称号. 出版专著9部、教材2部, 发表论文300余篇, 入选全球前2%顶尖科学家, 拥有授权专利20余项. 中国电子学会会员编号: E190003370F. E-mail: wxs1019@vip.sina.com