

文章编号: 1674-8190(2021)01-113-08

机载气象雷达发展趋势分析

陈娟, 周晔, 高霞, 钱君

(中国航空工业集团有限公司 雷华电子技术研究所, 无锡 214063)

摘要: 作为危险气象感知的重要手段, 机载气象雷达在航空安全保障中发挥着重要作用。本文通过分析机载气象雷达的发展历程和国内外产品及技术, 展望了机载气象雷达的发展趋势, 并对其关键技术与难点进行了梳理, 分析结果可以促进国内相关技术的研究和发展。

关键词: 机载气象雷达; 气象探测; 威胁评估; 发展趋势

中图分类号: V243.2; TN959.73

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development Trend Analysis of Airborne Weather Radar

CHEN Juan, ZHOU Ye, GAO Xia, QIAN Jun

(Leihua Electronic Technology Research Institute, The Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Wuxi 214063, China)

Abstract: As an important means of atmospheric threat awareness, airborne weather radar plays an important role in aviation security. This paper analyzes the development process of airborne weather radar and products and technologies at home and abroad, looks forward to the development trend of airborne weather radar, and combs its key technologies and difficulties in order to promote the research and development of related technologies in China.

Key words: airborne weather radar; weather detection; threat assessment; development tendency

0 引言

气象条件是影响飞机飞行安全的重要因素之一^[1]。为了避免飞行过程中由于恶劣气象导致的飞行事故, 气象雷达成为飞机必备的机载电子设备, 用于实现航路前方的气象实时探测与显示, 使飞行员及时了解航路上的气象分布态势, 辅助规避危险气象, 从而保障飞行安全。

随着航空事业的发展和人们安全意识的提高,

机载气象雷达的功能、性能也随着实际使用需求而不断改进。自 1955 年民用飞机配装气象雷达以来, 经过 60 多年的发展, 机载气象雷达功能已十分先进, 各项操作也更趋于简便和自动化^[2]。同时, 随着硬件技术、大规模集成器件以及数字信号处理技术的发展和飞行安全需求的提升, 机载气象雷达朝着更加精细化探测与精确告警的方向发展。因此, 机载气象雷达未来将面临巨大的商机与挑战, 需要大力开展相关技术的研究。

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(U1633106); 工信部项目(MJ-2018-S-28, MJZ-2016-S-44)

通信作者: 陈娟, chenj037@avic.com

引用格式: 陈娟, 周晔, 高霞, 等. 机载气象雷达发展趋势分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 113-120.

CHEN Juan, ZHOU Ye, GAO Xia, et al. Development trend analysis of airborne weather radar[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 113-120. (in Chinese)

本文简要分析机载气象雷达的国内外现状,对 Rockwell Collins 和 Honeywell 两家公司典型雷达产品的功能性能进行分析,从飞行安全需求的角度出发,梳理出新一代机载气象雷达的关键技术及难点,并对机载气象雷达未来的发展趋势做出展望,以期为国内航空事业的发展提供借鉴。

1 国内外机载气象雷达现状分析

1.1 国外机载气象雷达产品现状

国际上,民用飞机机载气象雷达基本被美国 Rockwell Collins 和 Honeywell 两家公司所垄断,作为商用机载气象雷达领域的“领头羊”,其产品代表了机载气象雷达的先进技术。

(1) Rockwell Collins 公司典型机载气象雷达产品简介

目前, Rockwell Collins 公司的主要机载气象雷达产品有: WXR 系列、TWR 系列、RTA 系列等。其中, WXR-2100 雷达是目前 Rockwell Collins 的主推产品,主要装配空客 A319/320、波音 737NG 等机型。

WXR-2100 多扫描威胁气象雷达^[3-8]是 Rockwell Collins 在 2006 年推出的新一代机载气象雷达产品,该雷达采用多扫描技术抑制地杂波,能够探测 320 n mile (1 n mile=1 852 m) 范围内的气象目标,具有增强型湍流探测、风切变告警、飞越保护、路径衰减补偿和告警、海洋/陆地气象校正、全球地理相关、雷暴单元跟踪、冰雹和闪电预测、边扫描边跟踪等多项先进技术,进一步加强了对雷暴的跟踪以及评估能力,可安全、平稳、高效地探测、分析、显示对飞机的相关气象威胁。该型气象雷达所具备的全面气象分析技术,基于飞行的不同状态和飞行航线,定向连续的危险评估技术都为飞行提供了安全保障。多扫描雷达的一系列突破性核心技术造就了它的自动性和高性能,引领了气象雷达产业的发展。

(2) Honeywell 公司典型机载气象雷达产品简介

Honeywell 公司的主要机载气象雷达产品有: ART 系列、Primus 系列、RDR 系列以及 IntuVue 系列,其中 RDR-4000 雷达是目前 Honeywell 的主

推产品,主要装配空客 A320/A340/A380 等机型。

RDR-4000 三维自动气象雷达^[9-13]是 Honeywell 于 2008 年推出的具有脉冲压缩功能和三维气象探测能力的机载气象雷达,该雷达使用了立体扫描技术,在巡航阶段进行了 17 个俯仰层的扫描,结合全球地形数据库实现地杂波抑制,3D 存储器中存储了飞机前方 320 n mile 从地平面到海拔 60 000 ft (1 ft=0.304 8 m) 空域中的所有气象目标,能够对立体扫描数据进行合成显示,同时对感兴趣方位的气象目标进行垂直剖面显示,获得更为直观的气象目标强度、高度等信息。该雷达还具有增强型湍流探测、风切变告警、路径衰减补偿等功能,基于垂直多扫描功能的边扫描边跟踪技术实现了云层高度探测、闪电、冰雹预测,可帮助飞行员更容易、更准确地操控飞机绕过或越过雷暴,从而减少航班延误、返航及备降。

IntuVue RDR-7000 气象雷达系统^[14-15]是 Honeywell 现有技术上最先进的雷达。该雷达使用成熟的技术,能够为飞行员提供天气检测、分析和回避功能,具有自动 3D 体积扫描功能、湍流探测距离达 60 n mile、预测式风切变作用距离为 10 n mile、冰雹和闪电检测预警等功能,是第一台提供完整垂直天气视图的雷达,可以更加准确地分析和显示天气,在最安全、最舒适的路线上做出充分明智的战术决策,增强安全性,最大限度减少与天气有关的飞机损坏。该雷达小而轻的特点也使它非常适用于中小型公务机、直升机、支线飞机等机型。

(3) 美国 Garmin 公司典型机载气象雷达产品简介

GWX-80^[16]是美国 Garmin 公司在 2017 年推出的用于商用和军用飞机的、性能先进的多普勒气象雷达,该雷达实现了自动 3D 体积扫描、预测式风切变检测、结冰和闪电预测以及先进的地面杂波抑制功能。新的增强调色板具有比市场上其他机载气象雷达更多的色彩轮廓,同时集成了自动大气威胁评估功能,帮助飞行员分析对流天气威胁,有助于实现态势感知,减少飞行员的工作量,并降低飞机运营成本。

通过对多家公司的典型机载雷达产品进行对比分析发现,虽然各雷达的技术实现细节不同,各

有侧重,但发展理念是一致的,即提高对威胁飞行安全的气象的探测与告警能力。目前,美国 Rockwell Collins、Honeywell、Garmin 以及 Curtiss Wright 公司等四家原始设备制造商正在开展对具有探测距离更远、耐用性更强、人机界面更加友好优点的机载气象雷达新技术的研究^[17],使机载气象雷达探测技术不断地朝更精确、更智能的方向发展。

1.2 国内机载气象雷达技术现状

近年来,国内包括航空工业雷华电子技术研究所、陕西长岭电子科技有限责任公司、西北工业大学、西安电子科技大学、中国民航大学、南京信息工程大学、成都信息工程大学等在内的多所高校、科研院所和企业,积极开展了机载气象雷达的相关技术研究,在雷达气象学、湍流探测、风切变探测、危险气象分析等方面均取得了一定成果,在机载气象雷达产品的研制和开发上,已具备相当功能的雷达产品。

2 机载气象雷达关键技术

机载气象雷达的技术发展一直致力于提高飞行安全性,FAA 飞行规划和 ICAO 业务计划都将飞行安全纳入第一战略目标^[18-20],为使气象雷达充分发挥危险气象感知能力,确保飞行安全,以下关键技术需要重点研究。

2.1 全自动智能化探测技术

严重威胁飞行安全的雷暴等危险气象目标,是在空间范围内尤其是高度上具有一定发展特性和回波特征的体目标,且不同的发展状态和发展高度都会对飞行产生不同的影响。机载气象雷达常规气象探测技术无法获取其立体分布信息,影响危险性判断。RDR-4000 雷达采用了立体扫描技术来获取全量程范围内的立体气象信息,但涉及到的扫描层数多,机械扫描条件下数据更新速度慢,对于发展变化迅速的气象信息不能及时获取。

全自动智能化扫描技术,将根据载机实时飞行信息、雷达参数等,结合地形信息及气象目标特性,调配合理的雷达探测方式,实现气象目标的快速有效探测,获取载机前方大范围气象分布态势,并能

够根据探测结果自动调度雷达资源,实现对重要气象的立体扫描与跟踪,不仅提高了气象探测更新率,还能够存储气象三维回波信息,作为后期危险气象识别的数据基础。

2.2 危险气象识别技术

普通降水云和雷暴在某些条件下具有相似的回波反射率强度,但其对飞行安全的影响差异很大,后者才是严重影响飞行安全的元凶。因此,判断气象是否危险,仅根据雷达反射率强度是不够的,还需识别威胁飞行安全的危险气象,如雷暴、闪电、冰雹、湍流、风切变、冰晶、晴空湍流、火山灰等,在确保飞行安全的前提下,可降低航空公司的运营成本、减少旅客出行延误等情况。

气象目标可看作是一个具有体积连续性的三维立体结构。目前,国内外雷达气象领域的研究人员在地基天气雷达危险气象识别与预测领域做了大量工作,其中雷暴单体识别与跟踪(SCIT)^[21]、雷暴识别跟踪分析与预报(TITAN)^[22]等是较为经典的雷暴识别算法,国内一些研究人员在以上两种算法的基础上进行了改进,得到较多类别的雷暴分类识别算法^[23-24]。多因子冰雹云判别方程、冰雹检测算法(HAD)^[25]等是目前研究较多的冰雹识别算法,同时,也有根据雷暴与冰雹、闪电的内在联系,在雷暴识别的基础上,提取相应的回波特征来实现冰雹、闪电的预测,也可以基于闪电数据实现雷暴的识别、追踪与外推^[26]。

另外,有别于传统单极化雷达需在气象三维立体数据基础上进行危险气象识别,双极化雷达可通过信号处理提取气象回波的双极化特征参量,用来估计气象目标内部粒子大小、相态等微物理特征,实现对降水、冰雹、雪等威胁飞行安全的气象目标的分类识别^[27-28]。极化气象目标识别技术是另一种有效的识别手段,已应用于地面天气雷达信号处理系统。

对于机载气象雷达而言,危险气象识别可借鉴地基天气雷达的研究成果,但由于雷达体制、波段、天线波束宽度、雷达探测视角等差异,以上算法在机载气象雷达上应用还需要通过大量的试验进行调整与优化。

2.3 气象威胁评估技术

飞行过程中,由于气象目标特性、飞机特性和飞行环境等因素影响,雷达探测到的气象反射率强弱并不能准确表征气象对飞行的威胁程度,还需要综合考虑以下因素:

(1) 地理信息:包括平原、高山、盆地、江河、湖泊等;

(2) 气候环境:包括大陆性气候,季风气候,高原山地和海洋气候等;

(3) 飞机类型:包括不同翼载的固定翼飞机和旋翼飞机;

(4) 飞机状态:包括起飞、降落、低空飞行和空中巡航等不同阶段。

气象威胁评估主要实现复杂多变的气象目标对处于不同飞行阶段的飞机飞行安全的影响分析,并以醒目的符号对危险区域进行标识与告警,使飞行员在任何时间、任何地点都能获得最真实的气象威胁感知。该技术的难点在于:①不同地理、气候条件下气象目标的统计特性,这需要对各区域大量典型气象数据进行分析与总结;②气象条件对不同飞机类型、飞行阶段的飞行安全影响分析,这需要对各类飞机的气动特性进行建模仿真,获取可靠的告警门限,涉及飞行气象学、空气动力学等多个领域,研究难度较大。

2.4 机载毫米波雷达气象探测技术

毫米波雷达已经广泛应用于直升机载战场侦查和监视、火控和跟踪、防撞、高分辨率成像和敌我识别等领域。毫米波对微小粒子具有较强的散射特性,能够探测云内部的精细结构,提高对气象目标形成的微物理过程的认知,在气象观测领域有着重要的研究意义。国内外已研究出多型地基、机载和星载毫米波测云雷达^[29-31]。

将毫米波雷达装载于飞行平台,作为危险气象探测与导航用途时,采用前视探测的方式获取飞行前方范围内的气象分布情况。严重的空间传输衰减及其使用场景和需求使得毫米波雷达在气象探测时作用距离近,仅能适用于直升机、支线飞机等航行速度较慢的机载平台。美国 FLIR 公司(原加拿大 Amphitech)研制的 OAsys 毫米波障碍物感

知雷达系统,其气象探测距离达 40 n mile。航空工业雷华电子技术研究所利用研制出的毫米波雷达实现了气象模式的试飞,录取了大量的气象数据。一个扫描扇区地杂波抑制后的气象反射率因子探测结果如图 1 所示,横坐标为扫描方位角,天线扫描范围 $\pm 45^\circ$,纵坐标为探测距离,显示量程 45 km。

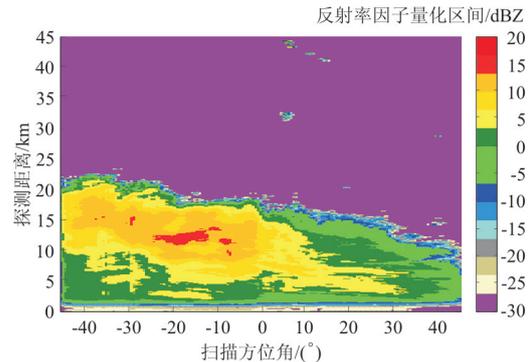


图 1 机载毫米波雷达气象探测结果

Fig. 1 The reflectivity detected by airborne millimeter-wave radar

从图 1 可以看出:毫米波雷达能够实现气象目标的有效探测,虽然探测距离较近,但是能够满足直升机平台的使用需求。除此之外,机载毫米波雷达还能够通过波形设计和信号处理等方式获取气象目标速度和谱宽信息,以辅助实现危险气象区域的识别。因此,研究毫米波雷达气象探测技术,可解决已安装毫米波雷达的直升机加装气象雷达带来的成本和装机空间问题,保障直升机低空飞行安全。

但是,利用毫米波雷达实现气象探测告警的应用尚存在较多的技术难点,如毫米波雷达进行气象探测时,云雨等气象目标衰减大,若要获取准确的回波反射率强度,需要对毫米波雷达回波衰减订正技术进行深入研究;另外,衰减影响将导致气象回波信息不完整,需考虑如何设计毫米波气象探测方式以获取更多的目标信息、并在有限的目标信息的基础上实现危险气象的识别。以上都是毫米波雷达气象探测技术亟需解决的问题。

3 机载气象雷达发展趋势

全自动智能化、气象威胁评估与精确告警等方

向是机载气象雷达的发展方向。随着机载气象雷达技术的发展和器件的升级换代,机载气象雷达可借助双极化、相控阵雷达、多传感器联合探测等技术来增强对危险气象目标的探测、识别、评估与告警能力。

3.1 双极化雷达

双极化雷达除了能够获取常规单极化雷达得到的宏观气象参量外,还能够通过信号处理等方式提取出微观气象参量,如图 2 所示,在定量测量降水、准确探测目标物理特性、气象目标精细化识别等方面具有重要意义^[32]。

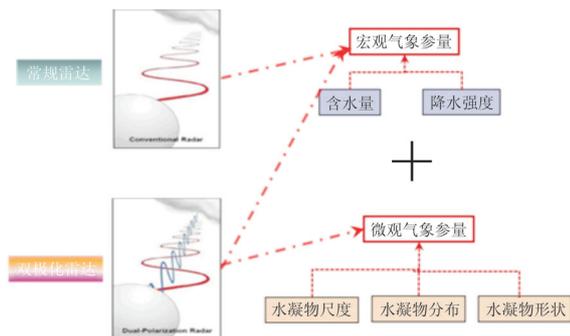


图 2 双极化雷达与常规气象雷达探测参数对比

Fig. 2 Comparison of detection parameters between dual-polarization radar and conventional weather radar

将双极化技术应用于机载气象雷达,可获取更丰富的气象目标回波信息,通过对极化参量信息的分析,可提高雷达测雨精度,同时获取水凝物大小、形状、相态等特征,实现精细化的气象目标分类^[33],并能够有效区分气象回波和地杂波^[34-35],解决机载气象雷达地杂波抑制难题。目前极化技术已在 S 波段和 C 波段的地基天气雷达上成功部署和应用,基于极化特征的气象目标分类技术已经在地基双极化气象雷达上进行了较充分地研究与验证,这些技术都为机载双极化气象雷达的研制奠定了基础。

但由于装机空间和重量的限制,机载双极化气象雷达还需考虑天线尺寸、发射功率、扫描方式、极化参数测量、极化校准等雷达系统技术、偏振雷达反射率因子衰减订正技术以及飞行场景下的极化特征提取、气象目标分类等信号处理技术的适应性问题^[36]。

3.2 相控阵雷达

相控阵雷达具有波束灵活、捷变特性,能够提高获取信息的时间分辨率,大幅缩短扫描时间,节省雷达资源。将相控阵技术应用于机载气象雷达领域,可以更加灵活地控制收发波束形状、波束扫描速度和目标驻留时间,采用边扫描边跟踪方式,通过资源管理、自适应探测、先进信号处理等技术实现全空域气象探测与重要气象立体扫描,不仅能够更快地获取更丰富的气象回波信息,改善地杂波抑制性能,还可以高效地完成航路上的气象态势分析,大幅提高目标的更新率,提前对危险气象进行预警。对于高巡航速度的飞机而言,也意味着提高了飞行的安全性。相控阵雷达是机载气象雷达的发展趋势,其在机载火控、预警领域的成功应用,也为相控阵天线在机载气象领域的应用奠定了工程技术基础。

3.3 系统架构一体化

机载气象雷达由于装机空间等条件限制,对雷达系统的体积、重量、功耗等都提出了较高要求。雷达系统架构的一体化设计,不仅能够简化设备、缩小体积、减轻重量、降低成本,而且功能更强、可靠性更高。

同时,机载综合监视系统(ISS)是未来机上监视设备的发展方向,它将机载气象雷达与空中交通告警和防撞系统、应答机、近地告警系统等机上其他相互独立的监视设备更加紧密的集成化^[37-38]。ISS 将各种告警信息进行综合处理,给飞行员提供实时高效且全面准确的态势感知,避免恶劣气象环境、邻近空域内的与本机距离过近的飞机以及可控飞行撞地事故等威胁对飞行安全造成影响。机载气象雷达作为 ISS 的重要组成部分,其一体化架构降低了多系统集成的难度,提高了系统的稳定性和可靠性。

因此,机载气象雷达系统架构的一体化设计是机载气象雷达发展的必然趋势。

3.4 多传感器联合探测

为了提升雷达对航路前方气象的准确探测、识别、预测与威胁分析能力,同时降低飞行员的工作强度,通过机载气象雷达与机上其他相互独立的传

传感器的交联,实现基于多传感器的气象联合探测,同时借助地面天气雷达、星载气象雷达以及其他机载气象雷达等强大的气象探测网络和高速大容量的航空数据链路的支撑,丰富航路前方危险气象信息,在数据融合的基础上实现气象目标的精细化分析、高精度综合显示与告警,并辅助航路规划,如图 3 所示。主要实施途径如下:

(1) 将闪电探测仪与机载气象雷达探测结果进行融合,不仅能够提高闪电定位精度,还能预测强对流的存在及演变;

(2) 晴空湍流探测器、火山灰探测器等传感器的探测结果,与机载气象雷达实现数据融合与综合显示;

(3) 利用温度传感器获取的温度信息,结合雷达探测结果,区分常温层、低温层和超低温层,评估不同温度层的水凝物相态,辅助判断气象目标的危险性;

(4) 通过空地协作的方式,融合上传的卫星云图和地面多普勒天气雷达图像,实现气象信息共享,提高飞行员对危险气象的感知能力。

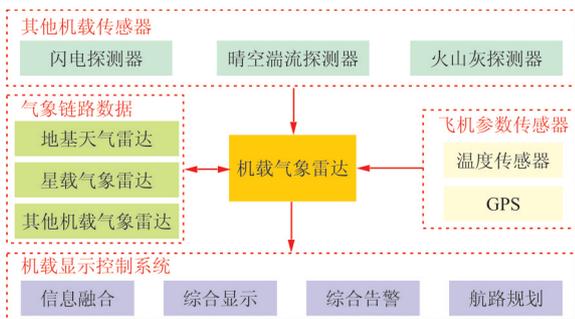


图 3 气象雷达与多传感器联合探测

Fig. 3 Combined detection of airborne weather radar and multi-sensor

3.5 雷达功能扩展

随着航空安全问题的日益突出,机载气象雷达的安全导航能力也在不断地改善,可开发扩展以下功能:

(1) 结冰区探测。飞机飞过结冰区,可能导致飞机积冰,对飞机的失速特性,起飞、爬升、续航、着陆等性能、发动机性能以及稳定性等造成很大的影响^[39]。

(2) 尾流探测。飞机尾流是飞机经过后引起

的空气不规则运动,会危及跟进的后机飞行安全^[40]。尾流体积小,回波强度弱,现有雷达体制下难以探测,需针对尾流的特点,研制出适用于尾流探测的雷达系统及其探测方式。

(3) 空中小目标监测。近年来,飞机在起降和飞行过程中与鸟类、无人机等飞行物相撞的事件日益增多,是航空安全的重大隐患。利用高分辨雷达识别鸟类、无人机等空中目标,建立预警模型,有针对性地驱散和避开鸟群、无人机等,是降低空中目标相撞危害的有效途径^[41]。

(4) 气象信息服务。气象信息服务的关键是异源数据的融合和大数据量的实时传输。通过地面天气雷达网络和空中机载气象雷达数据的双向信息共享,机载气象雷达及时获取地面采集的气象信息,与机上雷达获取的气象信息进行融合处理;地面气象信息网络也可以结合机载气象雷达获取的气象信息,实现地面雷达盲区 and 远距离的气象监测。两者的信息共享,互相弥补,实现更大范围和更精确的气象预测。

4 结束语

机载气象雷达实时探测载机航路前方的气象目标,并以醒目的方式进行提示与告警,是保障飞行安全的重要机载电子设备。随着航空事业的快速发展和人们对飞行安全需求的日趋增高,机载气象雷达正朝着气象的精细化探测、精确告警和友好的人机交互方向发展,这对目前体制下的雷达系统和技术提出了新的要求。

新一代机载气象雷达可通过对气象目标的智能化探测、识别与威胁评估等技术的研究,借助新体制、多传感器联合探测等方式,不断与机载航电设备集成,在提升自身技术水平的基础上利用集成系统的共享信息进一步增强危险气象探测和告警能力,为飞行员提供全面而精确的气象态势,引导飞行员规避危险气象,保障飞行安全。

参考文献

- [1] 张建荣. 气象条件对飞机及其飞行的影响分析[J]. 航空科学技术, 2014, 25(5): 54-56.
ZHANG Jianrong. Impact analysis of weather conditions on aircraft and its flight[J]. Aeronautical Science and Technology, 2014, 25(5): 54-56. (in Chinese)
- [2] 吴仁彪, 卢晓光, 李海, 等. 机载前视风切变检测气象雷达

- 的研究进展[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 496-507.
- WU Renbiao, LU Xiaoguang, LI Hai, et al. Overview on airborne forward-looking weather radar with windshear detection capability[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2014, 29(4): 496-507. (in Chinese)
- [3] Rockwell Collins. Collins WXR-2100 multi-scan™ radar fully automatic weather radar operator's guide[R]. USA: Rockwell Collins, 2003.
- [4] Rockwell Collins. Collins WXR-2100 multi-scan™ radar fully automatic weather radar[EB/OL]. [2020-09-14]. <http://www.smartcockpit.com>.
- [5] Rockwell Collins. WXR-2100 multi-scan hazard detection system product information[EB/OL]. [2020-09-14]. <http://www.rockwellcollins.com>.
- [6] Rockwell Collins. Multi-scan hazard detection™ radar operational competitive analysis[R]. USA: Rockwell Collins, 2009.
- [7] Rockwell Collins. WXR-2100 component maintenance manual[R]. USA: Rockwell Collins, 2012.
- [8] Rockwell Collins. WXR-2100 multi-scan threat track™ weather radar[EB/OL]. [2020-09-14]. <http://www.rockwellcollins.com>.
- [9] Honeywell. 3D visionary RDR-4000[R]. USA: Honeywell, 2006.
- [10] Honeywell. Pilot's guide for RDR-4000 weather radar system with forward looking windshear detection[R]. USA: Honeywell, 2006.
- [11] Honeywell. IntuVue 3-D weather radar product information[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://aerospace.honeywell.com>.
- [12] Honeywell. RDR-4000M 3D weather radar system[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://aerospace.honeywell.com>.
- [13] Honeywell. IntuVue RDR-4000 3D weather radar system[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://aerospace.honeywell.com>.
- [14] Honeywell. Honeywell's IntuVue RDR-7000 weather radar system[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://aerospace.honeywell.com>.
- [15] Honeywell. IntuVue™ RDR-7000 weather radar for business aircraft and helicopters[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://aerospace.honeywell.com>.
- [16] Garmin. Garmin GWX 80 weather radar for cessna longitude[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://www.garmin.com>.
- [17] 全球无人机网. 美国原始设备制造商探索提高机载气象雷达性能的新技术[EB/OL]. (2019-07-12) [2020-09-14]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201907/12/59607.html>.
- Global UAV network. US OEMs explore new technologies to improve the performance of airborne weather radar[EB/OL]. (2019-07-12) [2020-09-14]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201907/12/59607.html>. (in Chinese)
- [18] Federal Aviation Administration. FAA flight plan 2009-2013[EB/OL]. (2010-03-20) [2020-09-14]. https://www.faa.gov/about/plans_reports.
- [19] Federal Aviation Administration. NextGen implementation plan 2018-2019[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://www.faa.gov/nextgen>.
- [20] ICAO. ICAO annual report of the council-2018[EB/OL]. [2020-09-14]. <https://www.icao.int/about-icao/Pages/annual-reports.aspx>.
- [21] 汤玉杰, 余勇. 基于 SCIT 算法的天气雷达回波风暴识别跟踪方法[J]. 雷达与对抗, 2014, 34(1): 19-21, 57.
- TANG Yujie, SHE Yong. Storm identification and tracking of weather radars based on SCIT algorithm[J]. Radar & ECM, 2014, 34(1): 19-21, 57. (in Chinese)
- [22] 刘海. 强对流天气识别与预报方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LIU Hai. Research on recognition and forecast methods of severe convective weather[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [23] 王萍, 高毅, 李聪. 50 km 以内雷暴系统的分类识别方法研究[J]. 气象, 2016, 42(2): 230-237.
- WANG Ping, GAO Yi, LI Cong. Method study of classification and recognition of thunderstorm system less than 50 km[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(2): 230-237. (in Chinese)
- [24] 刘学谦, 刘娟. 基于网格的雷暴识别与追踪技术[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(1): 254-257.
- LIU Xueqian, LIU Juan. Thunder storm identify and tracking technology based on grids[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(1): 254-257. (in Chinese)
- [25] 郑建琴. 基于 GIS 的雷达冰雹识别算法及应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- ZHENG Jianqin. The hailstorm identification algorithm and application based on radar data and GIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [26] 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法[J]. 应用气象学报, 2016, 27(2): 173-181.
- ZHOU Kanghui, ZHENG Yongguang, LAN Yu. Thunderstorm identification, tracking and extrapolation based on lightning data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(2): 173-181. (in Chinese)
- [27] 郭凤霞, 马学谦, 王涛, 等. 基于 X 波段双偏振天气雷达的雷暴云粒子识别[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1231-1244.
- GUO Fengxia, MA Xueqian, WANG Tao, et al. An approach to the hydrometeors classification for thunderclouds based on the X-band dual-polarization doppler weather radar[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1231-1244. (in Chinese)
- [28] 李海, 任嘉伟, 尚金雷. 一种基于模糊神经网络——模糊 C 均值聚类的双偏振气象雷达降水粒子分类方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 809-815.

- LI Hai, REN Jiawei, SHANG Jinlei. Hydrometeor classification method in dual-polarization weather radar based on fuzzy neural network-fuzzy C-means[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 809-815. (in Chinese)
- [29] 唐顺仙, 吕达仁, 何建新, 等. 天气雷达技术研究进展及其在我国天气探测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 1-13.
- TANG Shunxian, LYU Daren, HE Jianxin, et al. Research of weather radar technology and application on Chinese weather observation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 1-13. (in Chinese)
- [30] 李勇, 高仲辉, 黄兴玉. 机载测云雷达探测模式分析[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(2): 121-126.
- LI Yong, GAO Zhonghui, HUANG Xingyu. Detection mode analysis of airborne cloud radar[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(2): 121-126. (in Chinese)
- [31] 苏涛, 高仲辉, 黄兴玉. 94 GHz 机载测云雷达总体技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(6): 574-577.
- SU Tao, GAO Zhonghui, HUANG Xingyu. Research on airborne cloud radar system[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(6): 574-577. (in Chinese)
- [32] VIVEKANDNDAN J, LEE W C, LOEW E, et al. The next generation airborne polarimetric Doppler weather radar[J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions, 2014, 4(1): 1-42.
- [33] 闫世强. 雷达极化技术与极化信息应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- YAN Shiqiang. Radar polarimetry and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [34] 曹杨, 苏德斌, 周筠珺, 等. 基于双线偏振多普勒雷达识别地物回波[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(5): 509-515.
- CAO Yang, SU Debin, ZHOU Junjun, et al. Recognition of ground object echo based on dual polarization Doppler radar[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2014, 29(5): 509-515. (in Chinese)
- [35] 吴欢. X 波段双线偏振雷达资料的衰减订正和地物消除以及降水物类型判别研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- WU Huan. Study on attenuation correction and ground clutter cancellation and precipitation type classification of X-band dual-polarization weather radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [36] 周晔, 高霞, 陈娟. 极化技术在机载气象雷达探测中的应用[C]// 2017 年(第三届)中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2017: 122-131.
- ZHOU Ye, GAO Xia, CHEN Juan. Application of polarization technique in airborne weather radar detection[C]// The 3rd China Aeronautical Science Technology Conference. Beijing: CSAA, 2017: 122-131. (in Chinese)
- [37] AirLines Electronic Engineering Committee. Integrated surveillance system (ISS), ARINC characteristic 768-1[S]. Annapolis, Maryland: Aeronautical Radio Inc., 2006.
- [38] 陈晨. 面向 AESS 仿真系统的视景生成及其相关算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- CHEN Chen. Scene generation and related algorithm research oriented to AESS simulation system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [39] 李哲, 徐浩军. 结冰对飞机飞行安全的影响激励与防护研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(4): 10-14.
- LI Zhe, XU Haojun. Research on flight safety effect mechanism and protection for aircraft icing[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(4): 10-14. (in Chinese)
- [40] 冯志勇. 尾流对飞行的影响及安全间隔研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- FENG Zhiyong. How wake vortexes affect the flight and safety separation research[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [41] 宁焕生, 刘文明, 李敬, 等. 航空鸟击雷达鸟情探测研究[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2232-2237.
- NING Huansheng, LIU Wenming, LI Jing, et al. Research on radar avian detection for aviation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2232-2237. (in Chinese)

作者简介:

陈娟(1985—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:机载气象雷达及信号处理技术。

周晔(1982—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:机载气象雷达及信号处理技术。

高霞(1984—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:机载气象雷达及信号处理技术。

钱君(1985—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:机载气象雷达系统。

(编辑:马文静)