

文章编号:1004-9037(2014)04-0496-12

# 机载前视风切变检测气象雷达的研究进展

吴仁彪 卢晓光 李 海 韩雁飞

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津,300300)

**摘要:**机载气象雷达是商业飞机强制安装的机载电子设备,可以称得上是“双眼”,它对于保障飞行安全具有举足轻重的作用。目前,机载气象雷达关键技术尚掌握在国外生产厂商手中。本文从机载气象雷达系统和机载气象雷达涉及的信号处理技术(包括降水目标检测、湍流检测和低空风切变检测、地杂波抑制等)两个方面论述了机载气象雷达的发展历程,指出了其中的关键技术和尚待解决的问题。最后,本文针对下一代具有增强型检测能力的机载气象雷达系统及其相关技术进行了评述。

**关键词:**机载气象雷达;雷达信号处理;相控阵;极化雷达

**中图分类号:**TP2;TP9

**文献标志码:**A

## Overview on Airborne Forward-Looking Weather Radar with Windshear Detection Capability

Wu Renbiao, Lu Xiaoguang, Li Hai, Han Yanfei

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** Compared to the eyes of the aircraft, airborne weather radar is an imperative avionics equipment for commercial aviation, which is important and necessary to ensure the flight safety. At present, the key technology of airborne weather radar is mastered by foreign manufactures. This paper gives a comprehensive overview of airborne weather radar and its related signal processing methods (including precipitation awareness, turbulence detection, wind shear detection and ground clutter suppression). The key technologies and the problems to be solved are also addressed. Finally, the next generation airborne weather radar with enhanced situation awareness and its opening problems are remarked.

**Key words:** airborne weather radar; radar signal processing; phased array; polarimetric radar

## 引 言

作为雷达领域的一个重要分支,机载气象雷达对于民航飞行安全起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。天有不测风云,若飞行员只凭借着飞行前的天气预报,是不足以应付空中千变万化的天气现象。机载气象雷达的作用,正是用来给飞行员提供实时危害天气的方位及强度,作为预警或闪躲的参考。以目前民航机的操作环境及特性,气象雷达的重要性不亚于飞机上任何系统,而没有气象雷达的飞机,就如同失去视力的鸟儿,随时可能飞向无法预测的危

险。机载气象雷达是飞机在风雨中穿梭的千里眼,是飞机能在安全的条件下全天候飞行的必要保障。

目前,机载气象雷达是民航飞机强制安装的机载电子系统。美国联邦航空局规定,截止到1995年底,所有商业飞机必须装配符合标准的风切变探测系统。大多数军用飞机也装有气象雷达。自从1955年民用飞机装备气象雷达以来,经过将近60年的发展,不管是系统的硬件水平还是检测能力,机载气象雷达都得到了很大的发展,其功能已十分先进,各项操作也更加简单便利和自动化。目前,民航飞机装机的机载气象雷达产品主要由Collins和Honeywell等两大生产厂商提供,对技术实行

**基金项目:**国家自然科学基金(61071194)资助项目;国家自然科学基金委员会与中国民航局联合(U1233109)资助项目;中央高校基金中国民航大学专项(3122014D007)资助项目。

**收稿日期:**2014-06-10;**修订日期:**2014-07-08

严格封锁,这对我国国产大飞机项目的顺利实施造成了很大的障碍。

本文从机载气象雷达系统和机载气象雷达信号处理关键技术两方面总结了机载气象雷达的发展历程,并对其未来的发展做出展望,以期能够促进国内相关研究和技术的发展,为国产化机载气象雷达的研制提供参考。

### 1 机载气象雷达系统发展历程

民航定期航班飞机装备气象雷达始于 1955 年。随着硬件、软件和计算机处理技术的发展,机载气象雷达的面貌发生了巨大的变化。严格划分机载气象雷达的发展阶段是比较困难的,但根据雷达功能与性能的发展和所使用的器件来看,机载气象雷达的发展大体上可分为六个不同的阶段,见表

表 1 机载气象雷达发展历程  
Table 1 The development history of WXR

年代	主要特点	典型设备
第一阶段(1955~1962 年)	电子管、抛物面天线、非相参体制、气象目标的反射率测量	AVQ-10,E-160 PIICH-2H
第二阶段(1963~1967 年)	晶体管化、可靠性明显提高	RDR-IE,E-290
第三阶段(1968~1979 年)	平板天线、彩色显像管、数字处理技术	RDR-IF,PRIMUS-90
第四阶段 (1980~1993 年)	全固态发射机、大规模集成器件、全相参体制、频域处理能力、湍流探测功能、低空风切变检测、地杂波抑制	WXR-700, RDR-4A/4B PRIMUS-708/708A
第五阶段 (1994~2008 年)	液晶显示器、高度集成化、自动化、数字信号处理技术广泛应用、冰晶检测、湍流探测、低空风切变探测、三维气象探测	WXR-2100 RDR-4000
第六阶段 (2008 年~今)	采用多极化天线、极化信息处理、精细化的降水分类功能、精确的雨衰补偿、基于极化信息的地杂波抑制、空地协同气象监视	研制过程中

在机载气象雷达制造方面,国内相关工作开展较晚,目前仅在军用产品上有一定进展。中国航空工业第 607 研究所于 1994 年在无锡建立了机载多普勒气象雷达的生产线,为 Collins 转包生产 WXR-700 及其相关其他型号,承担了国内的机载气象雷达收发机的装配和测试业务。但是,第 607 研究所承担的仅仅是产品生产组装的任务,对于技术含量较高的信号处理等核心部分,Collins 公司则不进行转包合作。2003 年,在前期的研究基础上,607 研究所制造了我国第一部非相参机载气象雷达 YL-70。对于全相参体制的机载前视风切变检测雷达系统,国内尚处于系统样机预研阶段,还未形成成熟产品。

1. 从机载气象雷达的发展过程来看,早期的更新集中于硬件系统和硬件技术的升级<sup>[2]</sup>,是伴随着大规模集成器件和微型计算机技术而发展的。自从 1994 年具有低空风切变探测能力的机载前视风切变气象雷达投入商业运营之后,其发展一直依赖于数字信号处理技术的发展与应用。目前,生产厂商主要有两家公司,Collins 和 Honeywell。Collins 的产品主要有 WXR-270,WXR-300,WXR-700C/X 和 WXR-2100。WXR-2100 是 Collins 在 2006 年推出的采用多扫描技术而具有先进杂波抑制能力的新一代检测技术的机载气象雷达<sup>[3]</sup>。Honeywell 用在民航大型飞机上的产品主要有 RDR-4A/B,RDR-2000 和 RDR-4000,其中 RDR-4000 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<sup>[4]</sup>。

### 2 机载气象雷达信号处理关键技术

目前的机载气象雷达具有气象回避(普通降水目标检测)、湍流检测和风切变检测等功能,其关键技术的发展也是伴随着功能的发展而进步的。

#### 2.1 降水气象目标检测

早期的机载气象雷达采用非相参体制,只能通过回波的功率检测云、雨等降水目标,并通过回波的强度反映降水目标的含水量,最终在显示器上以不同的颜色表征(红、黄、绿、黑四种颜色反映的降水等级逐级降低)。通常,含水量越高的区域越危险,飞行员在飞行时一般会绕过这些区域飞行。

由于反射和吸收,气象目标会对雷达发射的电

磁波造成衰减,即引起回波在降雨路径上能量的衰减而对气象目标的强度误判。工作于 X 波段的机载气象雷达受到的衰减更强,而且随着降雨量强弱有不同程度的衰减,对机载气象雷达对降水目标的危险评估存在很大的影响。曾经发生过一起对一个降雨云团后面的暴雨区域由于衰减而误判引起的飞行事故。不同于用于目标检测的监视雷达,为了定量地测量降水目标的强度,机载气象雷达还需对信号强度进行距离和路径衰减补偿。我们在文献<sup>[5]</sup>中对目前的雨衰补偿技术做了一个综述,指出了雨衰补偿技术的发展方向。目前的机载气象雷达仅能通过增益控制功能进行定性补偿<sup>[3,4]</sup>,尚不能进行精确的雨衰补偿。

实际上,不同的降水目标危险不同。随着技术的发展,两家生产厂商在后续的产品均突出了增强的气象态势感知能力,诸如更精细的气象危险等级判断(轮廓线,即等回波强度线;RDR-4000 的垂直气象剖面图)等。概括地讲,目前的机载气象雷达虽然采用了相参体制,但仍仅能通过回波的功率对降水目标的危险级别进行指示。

## 2.2 湍流检测

湍流,是指飞行中遇到的急速多变的气流。湍流会引起颠簸,是巡航阶段飞行安全的最大威胁。

风暴或者暴雨通常会带来湍流,因此反射率可用作指示,早期的非相参雷达正是根据这一特征利用回波强度作为指示检测湍流区域<sup>[6]</sup>。实际上,它们之前不存在本质的联系,因此存在较高的虚警率(达到 0.9 的检测概率,虚警概率可高达 0.4)<sup>[7]</sup>。湍流是通过速度方差定义的,可以利用多普勒雷达来检测。相参体制引入机载气象雷达后,机载气象雷达具有了多普勒处理能力,可以分析回波的多普勒谱宽,作为湍流检测的特征<sup>[8,9]</sup>,较宽的谱宽值通常认为是湍流造成的。

常见的谱宽估计方法是脉冲对方法<sup>[10]</sup>,但是其仅适用于高信噪比的情况<sup>[11,12]</sup>。夹杂较多雨滴的湍流因雷达回波较强可以被机载气象雷达有效检测。但是对于含水量少的湍流,雷达反射率较弱,回波信噪比甚至低于 0 dB,导致脉冲对法性能急剧下降,因此目前的机载气象雷达尚不能有效地探测低信噪比的湍流<sup>[13]</sup>。针对低信噪比的湍流检测问题,可引入参数化模型解决,从统计检测的角度进行检测<sup>[14,15]</sup>。即把湍流检测建模成一个检测问题,根据建立的回波参数化模型,有基于回波幅度的高斯 Markov 模型、基于回波幅度的 AR 模型

两种构建相应的自适应检测器。该类参数化的方法可应用于低信噪比的情况,但是直接基于回波时间域模型的参数化方法需要大量的数据样本。谱宽是气象雷达回波频谱的二阶谱矩,还可以从气象目标回波服从高斯谱的特性出发,构建参数化的估计方法<sup>[16]</sup>。为了进一步提高湍流检测的可靠性,美国国家航空航天局(National aeronautics and space administration, NASA)和联邦航空局(FAA, Federal aviation administration)也在进行新一代自动湍流检测系统的开发,寻找新的湍流度量<sup>[13]</sup>。

## 2.3 低空风切变检测

低空风切变是指发生在靠近地面的在同一高度或不同高度短距离内风向和(或)风速的突然变化。低空风切变具有变化时间短、范围小、强度大等特点,是起降阶段公认最严重的气象危害。

低空风切变目标的速度随距离呈现反 S 型特性,机载气象雷达是利用多普勒效应估计气象粒子的速度随距离变化这一特性来进行低空风切变检测,这种特性使得粒子速度随距离的变化梯度很大,低空风切变检测的  $F$  因子<sup>[16,17]</sup>正是基于梯度计算的。当  $F$  因子大于一定门限(FAA 的标准为 0.13),即认为存在低空风切变。具有风切变检测功能的机载前视气象雷达于 20 世纪 90 年代研制成功,相关研究也是集中在这一时期,具有低空风切变检测功能是机载气象雷达发展史上的里程碑。从 20 世纪 70 年代到 90 年代的 20 多年时间里,在 NASA 和 FAA 的推动下,先后举办了五次有关机载风切变检测与预警系统的专题会议,来商讨相关的技术问题<sup>[18-22]</sup>。NASA Langley Research Center, Collins, AlliedSignal, Westhouse 等科研单位 and 生产厂商也进行了大量的研究和实验。文献<sup>[23]</sup>从信号处理的角度,归纳总结了低空风切变检测需要解决的几个关键问题,包括地杂波抑制、风速估计和风切变危险检测等。地杂波抑制方法在后面叙述,风速估计采用的是频域估计法<sup>[24]</sup>,风切变危险检测则利用的是  $F$  因子。1994 年机载前视风切变检测雷达商业化运营后,由于商业利益,有关风切变检测的研究几乎没有见诸于文献中。

在在低空风切变回波的平均风速估计时,采用的是频域估计法,假设条件是频谱中只能包含风切变的回波,因此必须要进行杂波抑制。文献<sup>[25]</sup>提出了利用气象雷达回波的高斯谱参数化频谱模型的最大似然谱矩估计方法,在不抑制杂波直接估计

低空风切变回波的平均风速,最大程度地降低了杂波抑制对气象目标回波的影响。但该方法由于涉及多维参数估计运算量较大,这一问题可应用作者等提出的基于非线性最小二乘的气象雷达回波谱矩估计方法<sup>[26]</sup>解决。利用参数化的估计方法同时估计多个高斯谱叠加时的谱矩,为低空风切变检测时的杂波抑制提供了可行性的解决途径。

干性低空风切变由于信噪比较低,机载气象雷达还不能有效检测。目前,一般依靠地面检测手段来补充,如机场测风系统和激光气象雷达等<sup>[27,28]</sup>。

## 2.4 地杂波抑制

在机载前视风切变气象雷达中,地杂波的影响是非常严重的,是长期以来一直困扰机载气象雷达的问题,这也是两大厂商在宣传新产品时突出的地方(WXR-2100 通过多扫描技术得到无杂波的气象态势显示,RDR-4000 采用三维技术消除地杂波)。机载气象雷达安放在飞机的前部,前下视情况雷达扫描时不可避免的接收到大量的地物回波,弱气象目标常常会淹没在成片的杂波中而不能被探测到,或者杂波被当成虚假目标而影响飞行员的判断。因此在气象探测必须对地杂波或海杂波进行抑制,以提高气象雷达的检测性能。机载气象雷达在飞机起飞和降落阶段、飞机巡航阶段的工作模式不同,雷达发射的脉冲波形也不同,地杂波处理的方式也不同。

### 2.4.1 巡航阶段

巡航阶段气象雷达一般工作于气象模式时,为了远距离气象探测(可高达 320 nm),雷达发射的相干脉冲数较少,脉冲重复频率较低。此时,由于频率的混叠和较低的频谱分辨率,在频域地杂波和气象目标在频域是分不开的。但此时,通常认为气象和地杂波位于不同的距离单元。气象模式的杂波抑制一般采取的是杂波剔除策略,即检测地杂波的存在性,判别为地杂波的单元直接剔除。

早期,一般通过手工调整天线俯仰角的办法尽可能地减少地面回波。Kirkpatrick 提出了手动调节天线的方法<sup>[29]</sup>,但是操作不当会导致探测不到远距离的气象目标,且对飞行员要求较高,需要判断回波是否为杂波,并定期调整天线俯仰角以适应飞机状态的变化,增加了飞行员的负担。后续陆续出现了自动的俯仰角调整方法,即通过程序自动控制雷达天线的俯仰角来避免地杂波<sup>[30]</sup>,同时扫描获取最感兴趣的气象信息。2004 年,Honeywell 公司 Roland 在存储器中增加地形数据库,提出基于

地形数据库的地杂波抑制方法<sup>[31]</sup>。2006 年,Honeywell 将以上方法应用于 RDR 系列气象雷达中,提出了自动的气象雷达系统和方法<sup>[32]</sup>。Collins 公司在这方面的研究也处于领先的地位,2000 年,文献<sup>[33]</sup>提出了机载气象雷达自动杂波抑制方法和多扫描方式。2006 年,Collins 公司将上述方法改进,加入了多扫描 Multiscan,应用于其新推出的产品 WXR-2100 中<sup>[34]</sup>。

地杂波是雷达波束和地面存在截交而引起的,因此还可以利用飞机位置、雷达波束信息和地面信息以及雷达与地面的几何关系判断杂波存在的单元。文献<sup>[35]</sup>利用这一特点提出了结合地形可视性分析和地形高程数据的地杂波剔除方法。气象模式的杂波抑制本质是地杂波的检测,研究的关键在于对杂波进行有效的识别。

### 2.4.2 起飞降落阶段

起飞着陆阶段,对飞行最大的威胁是低空风切变,此时雷达工作于风切变模式。风切变模式时,需要估计回波信号的平均多普勒频率,因此雷达发射的相干脉冲数较多,脉冲重复频率较高。由于接近地面,地杂波和有用回波叠加在相同的距离单元,此时不能直接剔除存在杂波的单元。在风切变模式下,采用频域滤波器抑制地杂波。文献<sup>[23]</sup>给出了风切变模式时地杂波抑制可采用的策略,其中最有效的是频域滤波的方法。

20 世纪 90 年代初,NASA 与 Clemson university radar systems laboratory 联合对低空风切变杂波进行了系统的理论研究,结合 Philadelphia, Denver 和 Orlando 机场的实际地杂波回波数据,分析了杂波谱的显著特性<sup>[36]</sup>,进而提出了几种抑制方法。当时的几种低空风切边杂波抑制方法包括:基于复数形式 LMS 算法的自适应噪声消除器(Least mean square-adaptive noise canceler,LMS-ANC)<sup>[37,38]</sup>,可保证主瓣杂波的有效滤除,而且可以消除离散杂波的影响(通过自适应地形成很窄的零陷滤波器);实时的低阶的自适应杂波抑制滤波器<sup>[39]</sup>,在雷达回波信噪比较低或者气象信息和杂波在多普勒谱上区分度较低时,解决地杂波导致的脉冲对方法估计的风速值产生偏差的问题;基于模式分类器的杂波去除方法,利用雷达数据建立自回归模型,进行模式分析,建立了一个两类的模式识别分类器,对模型的极点进行分类<sup>[40]</sup>,分为气象信息和杂波,这样就实现了杂波和有用气象信息的分离,从而实现了地杂波的去除。

NASA 等提出的杂波抑制方法的本质是设计

最佳的滤波方法,在滤除杂波的同时尽可能降低对低空风切变回波信号的影响。机载气象雷达在飞机起降阶段进行风切变检测时,下视的天线波束与地面杂波区域截交面积相对较大,这使得地杂波强度远大于风切变信号强度。而机载平台的运动又造成地杂波的频谱展宽,使得风切变回波和地杂波可能在频域混叠。地杂波的抑制性能直接决定了风速的估计精度和后续的检测概率,若杂波抑制后的残余较大,则极易引发风切变检测的虚假告警。在地杂波很严重的情况下(比如机场周围的高建筑物),严重影响低空风切变的检测,目前的低空风切变雷达在一些特殊环境下可能存在较多的虚警。文献[41]对强杂波背景下的低空风切变检测方法进行研究,提出了利用压缩感知的处理方案,验证了压缩感知在机载气象雷达信号中应用的可行性。

在机载气象雷达理论方面,国内也是近 10 年才开展了相关研究,主要围绕基本功能相关的信号处理算法等开展。目前,国内开展相关理论研究的机构包括中国航空工业第 607 研究所、西北工业大学、中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室和中国电子工业集团第 14 研究所等。607 研究所与西北工业大学合作在湍流、低空风切变检测涉及的信号处理技术进行了一些研究工作<sup>[42-45]</sup>,取得了一些初步成果,包括简单工程化的低空风切变风场仿真、基于 Von Karman 模型的湍流风场仿真与回波信号仿真、利用频域和脉冲对方法的风速估计等。中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室在南京电子技术研究所和国家自然科学基金项目的资助下,系统性地开展了研究工作,在机载气象雷达回波信号仿真、谱宽估计、湍流检测、地杂波抑制、低空风切变检测、路径衰减补偿等方面<sup>[3,16,26,35,41,46-66]</sup>取得了一系列研究进展。

### 3 机载气象雷达发展趋势

纵观雷达技术的发展,雷达性能的飞跃和质的提升借助于新的体制或者先进的信号处理技术得以实现,机载气象雷达的发展也遵循这一规律。危险天气引起的飞行灾难是推动机载气象雷达技术发展的另一个动力。NASA 在 2007 年 10 月 28 日发表的研究报告中指出:“风切变引发的灾难是前视机载气象雷达于 20 世纪 90 年代研制成功的催化剂”。目前,航空运输量需求井喷式的增长,空域日益繁忙,由于天气带来的航班延误问题日趋严重。因此,如何尽早地精确探测航路上的天气现象并给予飞行员提示和选择最佳的飞行路径,是飞机

安全运行和正点运行的必要保障。

#### 3.1 新体制机载气象雷达系统

目前装机的机载气象雷达仍采用的是单极化机械扫描天线,仅能获得某一特定极化(垂直或者水平极化)方式下目标的散射特性,天线扫描速度慢、扫描方式不灵活。在 2012 年美国国家公务航空协会(National business aviation association, NBAA)召开的年会上,Collins 航电市场部主管 Craig Peterson 在谈及机载气象雷达未来应具有的功能时,指出气象雷达新功能可借助多极化工作模式、电子扫描天线和空地协同气象探测(借助地面和卫星气象数据源)等实现<sup>[50]</sup>。与机载气象雷达仅采用单极化机械扫描天线不同,多极化天线和相控阵天线在许多其他雷达系统中得到了应用<sup>[67,68]</sup>。目前,Honeywell 和 Collins 已经开始了相应技术的开发,2012 年 Collins 申请了适用于机载气象雷达系统的双极化天线专利<sup>[69]</sup>。2013 年,美国开始研制专门用于气象观测和研究的机载相控阵气象雷达<sup>[70]</sup>,其采用多种极化方式和相控阵体制以获得更丰富的目标极化信息,且具有快速的扫描速度和灵活的多波束扫描方式。2013~2014 年,Collins 公司连续申请了利用毫米波雷达探测气象目标和利用地面网络协同探测的湍流检测等专利<sup>[71,72]</sup>。借助多极化技术和相控阵技术以及空地协同增强机载气象雷达气象目标检测能力,必将是机载气象雷达技术未来的发展方向。

(1)多极化天线。机载气象雷达天线技术经历了早期的抛物面天线到现在广泛采用的波导缝隙天线阶段,目前采用的还是机械扫描方式。未来会引入多极化天线,具有极化信息处理功能的雷达将能够获得更多的气象目标的精细信息<sup>[73]</sup>。目前的机载气象雷达仅能通过雷达反射率对降水目标的含水量予以检测,并用不同的颜色来区分不同的降水等级。一般认为,雷达反射率越高的区域越危险。实际上,只有会造成飞机结冰和存在湍流的高反射率区域才是危险的。目前的机载气象雷达尚不具备降水类型区分功能,飞行员只能采取绕行的方式避开雷达指示的高反射率区域。因为检测到的高反射率区域中大约有 70%并不是真正危险的区域,不加区分的绕行会给航空公司的运行成本、旅客出行和环境污染带来负面影响<sup>[74]</sup>。采用极化体制后,机载气象雷达能够区分冰雹、雨和雪等,将能够给飞行员提供前方全面的气象信息,便于选择最佳的飞行路径。机载极化气象雷达必将能够提

供更加智能化的气象态势感知和预警功能,为进一步降低天气引起的航班延误提供技术支撑。

(2)相控阵天线。相控阵天线在机载预警雷达已经获得了成功的应用。机载气象雷达面临的严重杂波问题类似于机载预警雷达。在机载预警雷达空时二维自适应信号处理的研究中,该领域第一本专著《Space-time adaptive processing: principles and applications》的作者 Klemm 博士在该书序言中将国内的工作和美国相提并论<sup>[75]</sup>。将相控阵天线引入机载气象雷达,引入空间维处理能力,势必会大大提高机载气象雷达的地杂波抑制能力,提高目标检测性能。文献<sup>[76]</sup>考虑到系统复杂度的问题,提出了利用和差双通道的机载气象雷达原型,并利用其进行湍流检测。

(3)空地协作。空地协作式系统也是未来机载气象雷达发展的方向,借助地面强大的气象探测网络和未来高速大容量的航空数据链,可进一步提升机载气象雷达探测的能力。文献<sup>[50]</sup>展现了 Collins 具有空地协作的增强型机载气象雷达的初步研究产品(Pro-line fusion),可融合上传的卫星云图和地面多普勒气象雷达图像实现气象信息共享。

(4)系统构架小型化。机载气象雷达是机载监视系统的组成部分,未来它将和其他机载监视系统实现更加紧密的集成化,构成机载综合监视系统<sup>[77]</sup>(Integrated surveillance system,ISS)。空客和波音推出的新一代大型客机均采用了机载综合监视系统,A380 采用了 Honeywell 的 AESS(Aircraft environment surveillance system),B787 采用了 Rockwell Collins 的 CISS(Configurable integrated sSurveillance system)。ISS 将气象雷达、机载应答机、空中交通防撞系统和近地警告系统,结构更加紧凑,重量可减少 50%。Collins 空中运输系统部副总裁兼总经理 Kelly Ortberg 提到:“CISS-2100 大大提高了飞行安全、降低航空公司运营成本,使监视和危险气象检测功能在未来无缝集成成为可能。”

## 3.2 信号处理技术

机载气象雷达信号处理技术的发展对机载气象雷达功能更新和性能提升起着重要作用。未来的机载气象雷达系统突破了现有的单极化等体制,新型体制雷达的研制离不开相关信号处理技术的研究,这也必将推动机载气象雷达信号处理技术迈入一个新的发展阶段。

### 3.2.1 极化机载气象雷达回波仿真

回波仿真对研究雷达信号处理算法至关重要,是分析和验证算法性能的重要工具。尤其是研究一些危险气象的检测方法时,比如低空风切变,由于持续时间短、危害大而不易获取其雷达回波信号。过去由于计算机运算量的限制,常用的回波仿真方法是基于回波统计特性<sup>[78,79]</sup>利用随机信号生成的办法产生的,仅仅能生成某一距离门的相干脉冲回波。实际上,气象目标是分布式立体目标,在空间和时间上都存在相关特性,基于回波统计的回波仿真方法由于不能体现空间上的相关性此时不再适用。随着计算机技术和气象目标模型的发展,基于气象目标微物理特性的回波仿真方法<sup>[80]</sup>在气象雷达研究领域得到了日益广泛的关注。该方法因为是模拟雷达工作过程进行回波仿真,可以称为高保真回波仿真。美国 Oklahoma 大学的等所在的团队利用提出的 ARPS(Advanced regional prediction system)模型<sup>[81]</sup>进行了地基气象雷达、机载气象雷达回波仿真研究,这也是解决实际机载气象雷达回波数据获取难的重要途径。Lupidi A 等在研究机载极化气象雷达时,提出了结合 WRF(Weather research forecast)模型的机载极化气象雷达回波仿真<sup>[82]</sup>,用于解决 X 波段机载极化气象雷达实际数据缺乏的问题。我们利用流体力学软件仿真风切变目标来得到低空风切变目标的回波信号<sup>[83]</sup>,还利用地形数据结合机载数据参照这一思路实现了飞行各阶段的地杂波高保真仿真<sup>[46]</sup>。

随着计算速度和存储量等不再制约回波仿真,基于气象目标微物理特性的仿真方法在机载气象雷达回波仿真中必将得到进一步的应用,为研究机载极化气象雷达信号和数据处理算法提供更加可靠和真实的数据。

### 3.2.2 利用极化信息的气象目标精细化分类

2012 年 Collins 航电市场部主管 Craig Peterson 提出未来的机载气象雷达增强型目标检测技术,即精细化的降水目标分类识别<sup>[50]</sup>,提供更全面的气象态势。

目前的机载气象雷达系统采用的都是单极化雷达,仅能提供气象目标的反射率和单极化多普勒信息。地基双极化雷达(双线性偏振雷达)由于增加了极化通道(水平和垂直极化),能够提供更多的气象目标信息(差分反射率因子、退偏振比、差分传播相移率、零滞后互相关系数和极化多普勒谱)<sup>[84]</sup>等,可以实现精细化的气象目标分类(毛毛雨、雨、湿霰、干霰、小雹、大雹、雨加雹、湿雪、干雪、冰晶

等)。利用极化信息增强机载气象雷达的目标检测能力需要研究降水目标的极化特征、基于极化信息的气象目标分类方法等。近几年,国外已经开展了相关理论研究,包括极化机载气象雷达回波仿真、极化特征分类等,文献[82]对这一问题进行了初步研究,指出了研究方向。极化传播相移率是一个与衰减无关的量<sup>[85,86]</sup>,可用来实现精确补偿,因此未来还需开展基于极化传播相移的雨衰补偿方法研究。

基于极化特征的气象目标分类技术已经在地基双线偏振气象雷达有了较充分的研究,可在此基础上针对机载气象雷达的特性(诸如工作在 X 波段、多工作模式等)提出合理的处理方法。将双极化技术引入机载气象雷达,实现更精细的气象危险等级判别<sup>[87]</sup>,将可以提供更加优化的飞行路径,进一步降低天气造成的航班延误。

3.2.3 极化多普勒处理

目前的极化处理大部分是针对极化反射率特性进行的,极化多普勒信息(极化谱)同样包含目标的重要特征<sup>[88]</sup>。利用极化多普勒特征进行湍流检测、低空风切变检测<sup>[89]</sup>,地杂波抑制技术<sup>[90]</sup>。

3.2.4 基于空时二维处理的地杂波抑制

空时二维自适应处理技术是机载预警雷达的关键技术,通过空时二维处理将杂波和目标信号变换到空时二维谱域,增强了二者的可区分性,使得在强杂波背景下仍具仍能较好地检测目标。

国内在方面的研究一直紧盯国外技术,以西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室为代表的研究单位在空时二维自适应信号处理方面取得了大量的研究成果,对正侧阵、非正侧阵和前视阵等多种情况下的杂波抑制方法都进行了较深入的研究<sup>[91-94]</sup>。在前视工作模式下,地杂波空时二维频谱具有距离依赖性,需通过杂波补偿解决<sup>[94]</sup>。与监视雷达检测的点目标不同,气象目标是分布式目标,并不能简单地将空时二维自适应处理技术<sup>[91]</sup>直接应用过来。分布式目标中包含大量的速度不同的散射粒子,每个雷达分辨单元的回波是这些散射粒子回波的叠加。此时,目标回波信号的协方差矩阵是满秩的<sup>[95]</sup>,即不存在确定性的目标导向矢量,空时最优处理器中基于确定性的无失真约束条件失效。研究引入适用于分布式目标检测的空时二维处理技术,需要解决杂波距离依赖性和分布式目标空间扩展性两个问题。

3.2.5 空地协同气象目标检测

借助地面气象雷达网络和空中机载气象雷达

数据的双向信息共享,机载气象雷达可以及时获取地面采集的气象信息以及前方和附近飞机获取的气象信息,地面气象信息网络也可以获取遍布全球的机载气象雷达获得的短期的气象预报<sup>[96,97]</sup>。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。空地协同气象预测的关键是数据的融合和传输,因此异源数据的融合和大数据量的传输是空地协同气象探测的难点问题<sup>[98,99]</sup>。随着航空数据链传输技术的发展,可选择的传输技术越来越多,在实际推广时需经过验证选择最佳的数据链。

4 结束语

机载气象雷达是一个多学科交叉的领域,包括机载雷达、气象学、空气动力学、航空电子系统等,影响因素较多,研究难度大。而且由于过去我国机载气象雷达完全依赖进口,国内有效需求不足,研究人员的积极性也不高。近几年,随着国产大飞机 C919 项目的推进,国内虽然已经开始关注机载气象雷达相关产品的研究并取得了一定成果,但还是处于对传统体制(单极化机械扫描天线)的机载气象雷达进行研究的阶段。本文对这一领域的发展脉络进行了梳理,指出了目前尚待解决的问题与未来的发展方向,希望能给相关科技工作者提供帮助。

参考文献:

[1] Keel B M, Stancil C E, Clifford A E, et al. Aviation weather information requirements study[R]. NASA/CR-2000-210288, 2000.

[2] Lucchi G A. New airborne weather radar systems [J]. J Aircraft, 1982, 19(3): 239-245.

[3] Rockwell Collins. WXR-2100 multiScan hazard detection? System Product information [EB/OL]. <http://www.rockwellcollins.com>, 2007.

[4] Honeywell. IntuVue 3-D weather radar product information [EB/OL]. <http://honeywell.com/pages/home.aspx>, 2008.

[5] 吴仁彪, 韩雁飞, 李海, 等. 气象雷达衰减订正方法的研究现状与展望[J]. 中国民航大学学报, 2012, 30(3): 22-31.

Wu Renbiao, Han Yanfei, Li Hai, et al. Review and prospect on attenuation correction methods for weather radar [J]. Journal of Civil Aviation of China, 2012, 30(3): 22-31.

[6] Lee J T. Associations between atmospheric turbulence and radar echoes in oklahoma [R]. United

- States, NOAA TM ERL NSSL-32, 1969.
- [7] Yanovsky F J. Evolution and prospects of airborne weather radar functionality and technology[C]//18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. Dubrovnik:[s. n.], 2005: 1-4.
  - [8] Bohne A R. Radar detection of turbulence in precipitation environments[J]. Atmos Sci, 1982, 39(8): 1819-1837.
  - [9] Alitz O J, Moos D P. Vector phase angle change distribution processor[P]. US Patent; 4600925, 1986.
  - [10] Miller K, Rochewarger M. A covariance approach to spectral moment estimation[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1972, 18(5): 588-596.
  - [11] Yu T Y, Rondinel R R, Palmer R D. Investigation of non-Gaussian doppler spectra observed by weather radar in a tornadic supercell [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2008, 26(3): 444-461.
  - [12] Monakov A, Monakov Y. Error analysis of Pulse-Pair estimates [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 2222-2230.
  - [13] Hamilton D W, Proctor F H, Ahmad N N. Flight tests of the turbulence prediction and warning system [R]. NASA Report, NASA/TM-2012-217337, 2012.
  - [14] Pinsky M, Figueras I Ventura J, Otto T, et al. Application of a simple adaptive estimator for an atmospheric doppler radar[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 115-127.
  - [15] Ligthart L P, Yanovsky F J. Adaptive algorithms for radar detection of turbulent zones in clouds and precipitation [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 357-367.
  - [16] 卢晓光, 吴仁彪. 基于RELAX的气象雷达回波参数化谱矩估计方法[J]. 信号处理, 2011, 27(8): 1250-1253.  
Lu Xiaoguang, Wu Renbiao. A parametric spectral moments estimation algorithm for weather radar echoes employing RELAX [J]. Signal Processing, 2011, 27(8): 1250-1253.
  - [17] Proctor F H, Hinton D A, Bowles R L. A windshear hazard index [J]. American Meteorology Society, 2000, 77: 482-487.
  - [18] Spady A A Jr, Bowles R L, Schlickemaier H. Airborne windshear detection and warning systems[R]. First Combined Manufacturers and Technologists Conference. NASA CP-10006, DOT/FAA/PS-88/7, 1988: 1-162.
  - [19] Spady A A Jr, Bowles R L, Schlickemaier H. Airborne windshear detection and warning systems[R]. Second Combined Manufacturers and Combined Manufacturers and Technologists Conference. NASA-CP-10050-PT-2, NAS 1. 55:10050-PT-2, 1990:1-452.
  - [20] Vicroy D D, Bowles R L, Schlickemaier H. Airborne windshear detection and warning systems[R]. Third Combined Manufacturers and Technologists Conference. NASA CP-10060, DOT/FAA/RD-91/2-1, 1991.
  - [21] Vicroy D D, Bowles R L, Passman R H. Airborne windshear detection and warning systems [R]. Fourth Combined Manufacturers and Technologists Conference. NASA CP-10105, DOT/FAA/RD-92/19-1, 1992:1-436.
  - [22] Delnore V E. Airborne windshear detection and warning systems [R]. Fifth and Final Combined Manufacturers and Technologists Conference. NASA CP-10139, DOT/FAA/RD-94/14-1, 1994: 1-162.
  - [23] Baxa E J. Airborne pulsed Doppler radar detection of low altitude windshear-A signal processing problem [J]. Digital Signal Processing, 1991, 1(4): 186-197.
  - [24] Diaz J M B, Leifão J M N. Nonparametric estimation of mean Doppler and spectral width[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 271-282.
  - [25] Moscardini C, Berizzi F, Martorella M, et al. Spectral modeling of airborne radar signal in presence of windshear phenomena[C]//European Radar Conference 2009. Rome:[s. n.], 2009:533-536.
  - [26] 卢晓光, 吴仁彪. 基于非线性最小二乘的机载气象雷达回波谱矩估计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 447-452.  
Lu Xiaoguang, Wu Renbiao. Nonlinear least-squares spectral moment estimation algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 447-452.
  - [27] Chan P W, Lee Y F. Application of short-range lidar in wind shear alerting [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(2): 207-220.
  - [28] Kwong K M, Chan P W. Chaotic oscillatory-based neural network for wind shear and turbulence forecast with LiDAR data [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2012, 42(6): 1412-1423.
  - [29] Kirkpatrick. Means for suppressing ground clutter in airborne radar [P]. US Patent; 3781878. 1975.
  - [30] Keven J C, Daryal K, Martin M, et al. Method and apparatus for implementing automatic tilt control of a radar antenna on an aircraft [P]. US Patent;



6236351. 2001
- [31] Roland. Terrain database based ground return suppression[P]. US Patent: 6690371, 2004.
- [32] Steven R S, Glendale. Automatic weather radar system and method [P]. US Patent: 7205928, 2007.
- [33] Woodwell D L. Multi-sweep method and system for detection and displaying weather information on a weather radar [P]. US Patent: 6424288, 2002.
- [34] Woodwell D L. Method and system for suppressing ground clutter returns on an airborne weather radar [P]. US Patent: 6603425, 2003.
- [35] 秦娟, 吴仁彪, 苏志刚, 等. 基于地形可视性分析的机载气象雷达地杂波去除方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 351-355.
- Qin Juan, Wu Renbiao, Su Zhigang, et al. Ground clutter suppression in airborne weather radar via terrain visibility analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 351-355.
- [36] Mackenzie A I, Baxa E J, Harrah S D. Characterization of urban ground clutter with new generation airborne doppler weather radar [C]//Radar Conference. Lynnfield MA USA:[s. n.], 1993:51-56.
- [37] Baxa E J, Lai Y C. New signal processing developments in the detection of low-altitude windshear with airborne doppler radar [C]//Radar Conference. Lynnfield:[s. n.], 1993:269-274.
- [38] Lai Y C, Baxa E J. The application of the LMS-Based adaptive noise canceller in nonstationary environment associated with airborne Doppler weather radar [C]//1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Minneapolis:[s. n.], 1993: 25-28.
- [39] Keel B M. Adaptive clutter rejection filters for airborne doppler weather radar applied to the detection of low altitude windshear [J]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1989, 12(12):14-53.
- [40] Baxa E J. Signal processing techniques for clutter filtering and windshear detection [R]. NASA Report N91-24154, 1990.
- [41] 吴仁彪, 韩雁飞, 李海. 基于压缩感知的低空风切变风速估计方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2512-2517.
- Wu Renbiao, Han Yanfei, Li Hai. Wind speed estimation for low-attitude wind shear via compressive sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10): 2512-2517.
- [42] 骆文成. 机载前视风切变气象雷达信号处理技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- Luo Wencheng. Research on technique of airborne weather radar with forward-looking windshear detection [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [43] 刘小洋, 李勇, 程宇峰, 等. 机载脉冲多普勒雷达湍流信号的仿真分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 920-924.
- Liu Xiaoyang, Li Yong, Cheng Yufeng. Simulation and analysis of turbulence signals in airborne pulse Doppler radar [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 920-924.
- [44] 李勇, 刘小洋, 程宇峰, 等. 机载雷达三维空间湍流场产生与仿真分析[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1193-1198.
- Li Yong, Liu Xiaoyang, Cheng Yufeng. Three dimensional turbulent flow formation and simulation analysis in airborne radar [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(6): 1193-1198.
- [45] 张晓荣, 李勇, 李滔. 机载前视风切变雷达回波信号的一种仿真方法[J], 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7023-7025.
- Zhang Xiaorong, Li Yong, Li Tao. Simulation method of airborne forward-looking windshear radar echo signals [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7023-7025.
- [46] 秦娟, 吴仁彪, 苏志刚, 等. 基于 DEM 的机载气象雷达地杂波去除方法[J]. 信号处理, 2011, 27(10): 1484-1488.
- Qin Juan, Wu Renbiao, Su Zhigang, et al. Ground clutter censoring algorithm for airborne weather radar employing DEM [J]. Signal Processing, 2011, 27(10): 1484-1488.
- [47] 秦娟, 吴仁彪, 苏志刚, 等. 机载气象雷达地杂波仿真方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(8): 72-75.
- Qin Juan, Wu Renbiao, Su Zhigang, et al. Ground clutter simulation for airborne for forward-looking weather radar [J]. Modern Radar, 2011, 33(8): 72-75.
- [48] 吴仁彪, 孟志超, 范懿, 等. 机载气象雷达风切变信号仿真[J]. 现代雷达, 2012, 34(4): 74-78.
- Wu Renbiao, Meng Zhichao, Fan Yi. Wind shear signal simulation of the airborne weather radar [J]. Modern Radar, 2012, 34(4): 74-78.
- [49] 韩雁飞, 吴仁彪, 李海. 基于双门限控制的机载气象雷达地杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 97-104.
- Han Yanfei, Wu Renbiao, Li Hai. Ground clutter suppression with dual-threshold controlled method for airborne weather radar [J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 97-104.

- [50] 余磊, 卢晓光, 黄敬雄, 等. 机载气象雷达湍流定标问题的研究[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(5): 401-404, 408.  
Yu Lei, Lu Xiaoguang, Huang Jingxiong, et al. Turbulence calibration in airborne weather radar [J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(5): 401-404, 408.
- [51] 卢晓光, 夏冬. 基于统计置信度的湍流检测门限确定方法[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(4): 27-30.  
Lu Xiaoguang, Xia Dong. Method for setting threshold of turbulence detection based on statistical confidence level [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(4): 27-30.
- [52] 吴仁彪, 胡鹏举, 卢晓光. 机载气象雷达回波信号仿真系统[J]. 中国民航大学学报, 2012, 30(2): 1-5.  
Wu Renbiao, Hu Pengju, Lu Xiaoguang. Simulation of airborne weather radar signals [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(2): 1-5.
- [53] Qin J, Wu R B, Su Z G, et al. Ground clutter censoring for airborne weather radar employing DEM [C]//IEEE CIE Radar International Conference. Chengdu, China: IEEE Press, 2011.
- [54] Lu X G, Wu R B, Qin J. A parametric spectral moments estimation algorithm based On fitting autocorrelation sequence[C]//IET International Radar Conference. Xi'an, China: IET, 2013: 1-4.
- [55] 余磊. 机载气象雷达湍流定标问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2011.  
Yu Lei. Turbulence calibration in airborne weather radar [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2011.
- [56] 孟志超. 机载气象雷达低空风切变检查方法[D]. 天津: 中国民航大学, 2011.  
Meng Zhichao. Algorithm of detecting windshear with airborne weather radar [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2011.
- [57] 胡鹏举. 机载气象雷达回波仿真系统[D]. 天津: 中国民航大学, 2012.  
Hu Pengju. Simulation of airborne weather radar signals [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2012.
- [58] 韩雁飞. 强杂波背景下的低空风切变检测技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2013.  
Han Yanfei. Detection of low-altitude wind shear in strong clutter [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2013.
- [59] 秦娟. 机载前视气象雷达地杂波抑制方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.  
Qin Juan. Ground clutter suppression for airborne forward-looking weather radar [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [60] 卢晓光. 机载气象雷达信号处理若干关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Lu Xiaoguang. Research on key techniques of signal processing for airborne weather radar [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [61] 吴仁彪, 范懿, 孟志超. 高保真机载前视气象雷达低空风切变信号仿真方法 [P]. 中国: ZL201010252705.4, 2012.  
Wu Renbiao, Fan Yi, Meng Zhichao, et al. Wind shear signal simulation of the airborne weather radar [P]. China: ZL201010252705.4, 2012.
- [62] 吴仁彪, 秦娟, 苏志刚, 等. 一种基于 DME 的机载气象雷达地杂波剔除法 [P]. 中国: ZL201110104229.6, 2013.  
Wu Renbiao, Qin Juan, Su Zhigang, et al. Ground clutter censoring algorithm for airborne weather radar employing DEM [P]. China: ZL201110104229.6, 2013.
- [63] 吴仁彪, 韩雁飞, 李海. 基于双门限控制的机载气象雷达地杂波抑制方法 [P]. 中国: ZL201210350884.4, 2013.  
Wu Renbiao, Han Yanfei, Li Hai. Ground clutter suppression with dual-threshold controlled method for airborne weather radar [P]. China: ZL201210350884.4, 2013.
- [64] 吴仁彪, 韩雁飞, 李海. 基于压缩感知的低空风切变风速估计方法 [P]. 中国: CN201310058351.3, 2013.  
Wu Renbiao, Han Yanfei, Li Hai. Wind speed estimation for low-altitude wind shear via compressive sensing [P]. China: ZL201310058351.3, 2014.
- [65] 吴仁彪, 秦娟, 苏志刚, 等. 一种基于地形高程数据的机载气象雷达地杂波剔除方法 [P]. 中国: ZL201110191514.6, 2013.  
Wu Renbiao, Qin Juan, Su Zhigang, et al. A ground clutter censoring algorithm for airborne weather radar employing digital elevation model [P]. China: ZL201110191514.6, 2013.
- [66] Craig P. Weather Radar: The Next 10 Years [EB/OL]. [Http://www.ral.ucar.edu/general/fpaw2012/Presentations/Peterson.pdf](http://www.ral.ucar.edu/general/fpaw2012/Presentations/Peterson.pdf), Orlando Florida, NBAA, 2012.
- [67] 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.
- [68] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- Zhang Guangyi. Principles of phased array radar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [69] Woodell D L, West J B, Elsallal W A, et al. Weather radar system and method using dual polarization antenna[P]. US Patent: 008098189B1, 2012.
- [70] Salaza J L, Loew E, Tsai P S, et al. Design and development of a 2-D electronically scanned dual-polarization line-replaceable unit for airborne phased array radar for atmospheric research[C]//36th Conference on Radar Meteorology. Breckenridge: American Meteorological Society, 2013.
- [71] Jinkins R D, Rademaker R M. Millimeter wave radar system for and method of weather detection [P]. US Patent: 20130328715A1, 2013.
- [72] Greenleaf W T, Dove R S, Bauler S F, et al. Sensing, display, and dissemination of detected turbulence[P]. US Patent: 008629788B1, 2014.
- [73] Vivekanandan 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.
- [74] Lupidi A, Moscardini C, Garzelli A, et al. Polarimetry applied to avionic weather radar: Improvement on meteorological phenomena detection and classification [C]//2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV). Capri: [s. n.], 2011: 73-77.
- [75] Klemn R. Space-time adaptive processing: principles and applications [M]. London: IEE Press, 1998.
- [76] Monakov A, Monakov Y. Detection of turbulence with airborne weather radars using space-time filtering [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 2131-2137.
- [77] Airlines Electronic Engineering Committee. Integrated surveillance system (ISS), ARINC characteristic 768-1 [S]. Annapolis, Maryland: Aeronautical Radio Inc, 2006.
- [78] Zrnic D S. Simulation of weatherlike Doppler spectra and signals [J]. Appl Meteor, 1975, 14(4): 619-620.
- [79] Chandrasekar V, Bringi V N. Simulation of radar reflectivity and surface measurements of rainfall [J]. Atmos Oceanic Technol, 1987, 4(3): 464-478.
- [80] Li Z Z, Zhang Y. A Microphysics-based simulator for advanced airborne weather radar development [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1356-1372.
- [81] Xue M, Drogemeier K K, Wong V. The advanced regional prediction system (ARPS): A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model. Part I: Model Dynamics and Verification [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75(3/4): 161-193.
- [82] Lupidi A, Moscardini C, Berizzi F, et al. Simulation of X-band polarimetric weather radar returns based on the weather research and forecast model [C]//2011 IEEE Radar Conference. Kansas City: [s. n.], 2011: 734-739.
- [83] Fan Y, Wu R B, Meng Z C, et al. Wind shear signal simulation of the airborne weather radar [C]//2011 IEEE Radar Conference. Kansas City: [s. n.], 2011: 710-713.
- [84] Lim S, Chandrasekar V, Bringi V N. Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements; Model improvements and in situ verification [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 792-801.
- [85] Brandes E, Ryzhkov A, Zrnic D S. An evaluation of radar rainfall estimates from specific differential phase [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2001, 18(3): 363-375.
- [86] Grazioli J, Schneebeli M, Berne A. Accuracy of phase-based algorithms for the estimation of the specific differential phase shift using simulated polarimetric weather radar data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 763-767.
- [87] Ratan K, Dave P. Methods and systems for presenting weather hazard information on an in-trial procedures display [P]. EP Patent: 2354805A1, 2011.
- [88] Dmitry N G, Yanovsky F J. Analysis of differential doppler velocity for remote sensing of clouds and precipitation with dual-polarization S-band radar [J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2010, 2(3-4): 391-398.
- [89] Yanovsky F J, Russchenberg H W J, Unal C M H. Retrieval of information about turbulence in rain by using doppler-polarimetric radar [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(2): 444-450.
- [90] Unal C M H. Spectral polarimetric radar clutter suppression to enhance atmospheric Echoes [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2009, 26(9): 1781-1797.
- [91] 保铮, 廖桂生, 吴仁彪. 相控阵机载雷达杂波抑制的

- 时空二维自适应滤波[J]. 电子学报, 1993, 21(9): 1-7.
- Bao Zheng, Liao Guisheng, Wu Renbiao. Space-time adaptive filter for airborne phased array radar [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 1993, 21(9): 1-7.
- [92] Wang Y L, Chen J W. Robust space-time adaptive processing for airborne radar in nonhomogeneous clutter environments [J]. IEEE Trans on AES, 2003, 39(1): 70-81.
- [93] 姜晖, 廖桂生. 基于传播算子的机载前视阵雷达杂波谱补偿方法[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2205-2208.
- Jiang Hui, Liao Guisheng. Compensation of clutter spectrum for airborne forward-looking radar based on the propagator [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2010, 38(9): 2205-2208.
- [94] Li M, Liao G S, Liu J. Robust elevation prefiltering method for non-side looking airborne radar [J]. Journal of Electromagnetic Waves and applications, 2010, 24(16): 2191-2205.
- [95] Boyer E, Larzabal P, Adnet C. Parametric spectral moments estimation for wind profiling radar [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8): 1859-1868.
- [96] Moninge W R, Richard D M, Patricia M P. Automated meteorological reports from commercial aircraft [J]. Bulletin of The American Meteorological Society, 2003, 84(2): 203-21.
- [97] Schaffner P R, Harrah S D, Neece R T. Benefits of sharing information from commercial, airborne, forward-looking sensors in the next generation air transportation System [C]//4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. New Orleans: [s. n.], 2012: 1-8.
- [98] Lakshmanan V, Travis S, Kurt H, et al. A real-time, three-dimensional, rapidly updating, heterogeneous radar merger technique for reflectivity, velocity, and derived products [J]. American Meteorological Society, Weather Forecasting, 2006, 21(5): 802-823.
- [99] Uijt D H, Maarten P D, Dill R, et al. Design, development, verification and validation of an integrated alerting and notification function for an intelligent integrated flight deck [R]. Final Report to NASA Langley Research Center, 2012.
- 作者简介:** 吴仁彪(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 自适应信号处理、阵列信号处理、现代谱分析及其在雷达、卫星导航和空中交通管理方向的应用等; 卢晓光(1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 机载气象雷达信号处理; 李海(1976-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 干涉合成孔径雷达信号处理、空时自适应信号处理等; 韩雁飞(1987-), 女, 硕士, 助教, 研究方向: 机载气象雷达低空风切变检测。