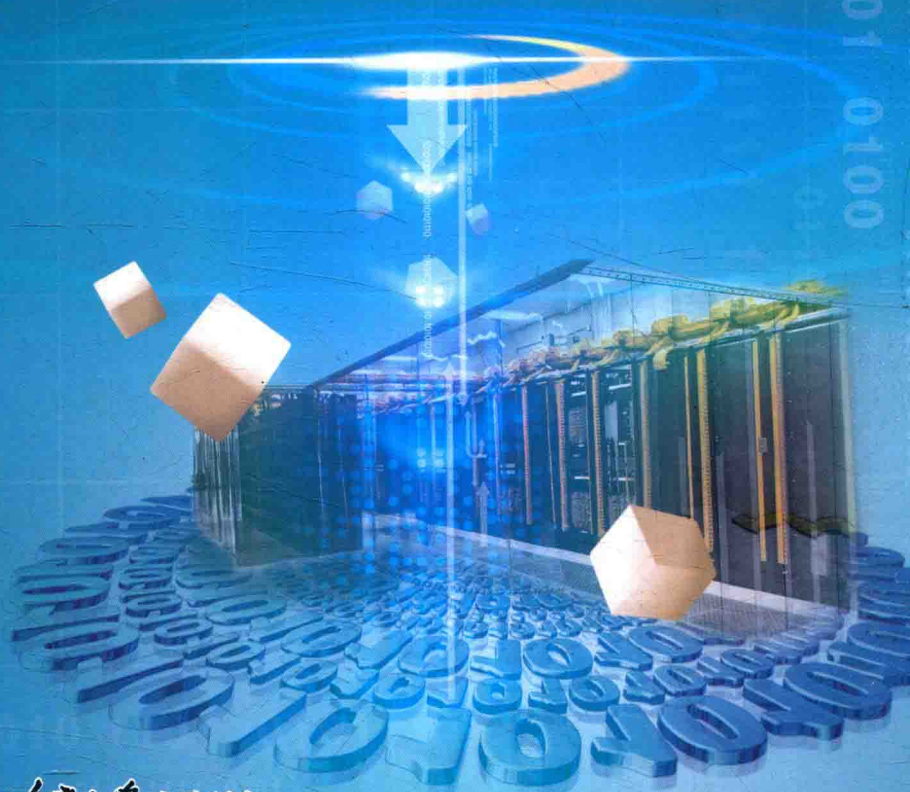


非线性时变微弱信号处理 与检测技术研究

T

THE RESEARCH OF NONLINEAR TIME-VARYING WEAK SIGNAL PROCESSING
AND DETECTION TECHNOLOGY

刘小洋◎著



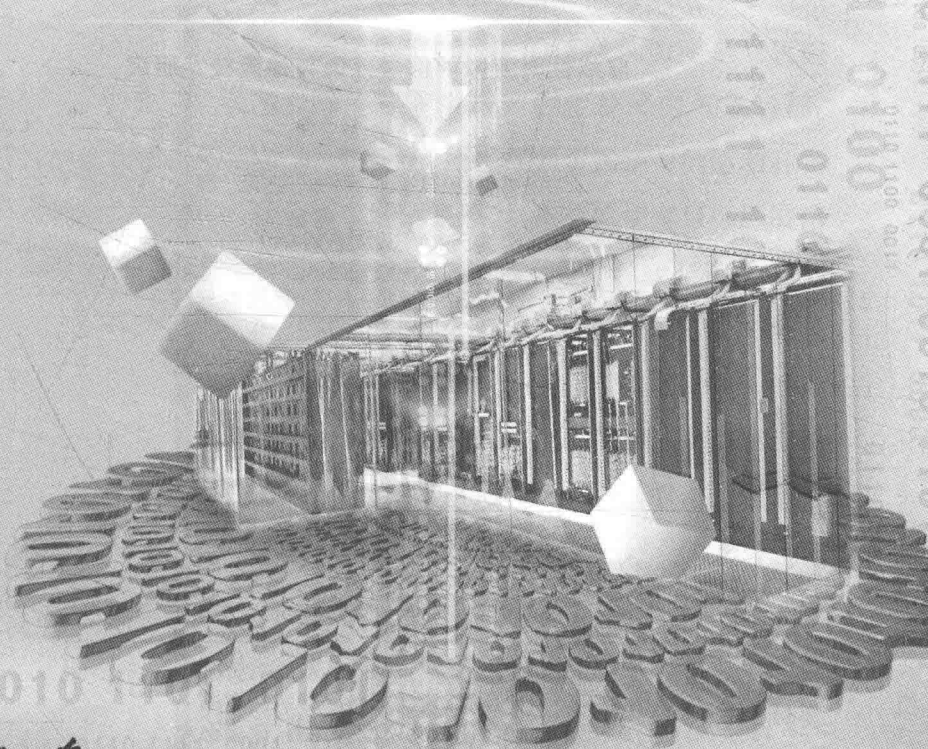
重庆大学出版社

非线性时变微弱信号处理 与检测技术研究

F

EIXIANXING SHIBIAN WEIRUO XINHAO CHULI YU JIANCE JISHU YANJIU

刘小洋◎著



重庆大学出版社

内容提要

非线性时变微弱信号(风切变和湍流)作为一种独特的气象信号,其信号建模与检测是一个技术难题,同时会对飞机等飞行器的安全产生严重威胁,故对其进行信号处理与检测、预警显得尤为重要。针对风切变、湍流的成因,同时由于此类气象信号会对飞行器的航行轨迹产生影响,从而会造成机毁人亡的严重后果。本书重点论述了非线性时变的气象信号处理、风场建模,其中包括对称风场建模与非对称风场建模与气象信号检测。全书共6章,主要内容包括风切变目标回波建模与仿真、湍流信号建模与检测、地杂波建模及抑制算法。

本书可作为电子信息类、计算机科学与技术类等专业的硕士、博士研究生专题研讨教材及从事微弱气象信号处理的业界从业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非线性时变微弱信号处理与检测技术研究/刘小洋
著. —重庆:重庆大学出版社,2017.3
ISBN 978-7-5689-0439-1

I. ①非… II. ①刘… III. ①信号处理②信号检测
IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 042800 号

非线性时变微弱信号处理与检测技术研究

刘小洋 著

策划编辑:曾令维

责任编辑:李定群 版式设计:曾令维

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

自贡兴华印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.25 字数:192 千

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-0439-1 定价:48.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

非线性时变微弱信号(风切变和湍流)作为一种独特的气象信号,其恶劣气象会严重影响飞机的飞行安全,甚至会造成机毁人亡的空难事故。具有探测和预警风切变和湍流功能的气象雷达是飞机上重要的机载电子导航系统。高度小于 600 m 的低空风切变是飞机起飞和降落过程中遇到的主要恶劣气象目标。在这种情况下,由于气象雷达平台的运动和雷达主波束的下视照射,造成风切变目标回波信号很容易被地杂波所掩盖,对地杂波进行分析、建模、仿真和地杂波抑制算法的研究至关重要。本书围绕气象雷达风切变、湍流、地杂波等非线性时变微弱气象目标回波模型以及信号处理方法进行了深入研究,取得了若干重要的研究成果。

首先,建立了一种风切变风场的数学模型,并结合网格划分法分析了风切变雷达回波数学模型,在一定的风场范围内分别对非对称

风场和对称风场进行了坐标转换和危险因子计算等仿真分析。仿真结果表明,风场模型能够较好反映风切变的基本特征,由此得到的风切变目标的速度谱分布可以反映风速的切变状况,且与模拟风场的径向速度分量有较好的一致性。

其次,结合 Von Karman 模型建立了空间三维湍流场模型,采用 FFT 三维对称性产生了湍流仿真数据,并提出了一种基于 FFT 的湍流信号处理算法。仿真结果表明,湍流的风速值只在相对较小的范围内沿一个方向变化,并表现出脉动特性。同时,提出的湍流信号处理算法能够较好估计出湍流风场的风速分布。在有因次情形下,湍流变化规律与无因次情形基本相同,但其波动幅度要大于无因次情形,仿真产生的湍流数据较好表征了湍流特征。

再次,建立了湍流检测的数学模型,在分析脉冲对检测方法的基础上,依据对数似然比准则,提出了一种新的湍流检测方法,运用 Monte Carlo 法对新方法的检测性能进行了仿真分析,并与传统方法进行了比较。仿真结果表明,新的湍流检测算法具有较好的检测性能,在两种虚警率和信噪比条件下,新的湍流检测算法的检测概率改善约为 49.26%。

最后,分析了气象雷达地杂波的功率谱特

性并建立了地杂波模型,分别研究了两种地杂波自适应抑制算法:LMS-ANC 算法和 LSL-ANC 算法,以风速误差、信杂比等参数对比分析了这两种算法与传统的 MTI 和 AMTI 算法的性能。仿真结果表明,本书提出的地杂波仿真算法可有效分析地杂波功率谱的分布情况,建立的地杂波模型能较好地符合地杂波谱特征。与 MTI 和 AMTI 算法相比,分别以风速误差和信杂比为对比参数时,LMS-ANC 算法和 LSL-ANC 算法对地杂波的抑制性能均有不同程度的改善,但运算时间要大于传统地杂波抑制算法。

本书受重庆市人社局博士后特别资助项目(Xm2015029)、重庆市科委基础与前沿计划研究项目(cstc2014jcyjA40007)、重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500926,KJ1600923)基金资助。在此,作者表示诚挚的谢意。

感谢西北工业大学电子信息学院研究生创新实验室、重庆大学通信工程学院信息与通信博士后流动站的老师和同仁。

由于作者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,望读者不吝赐教。所有关于本书的批评和建议,请发至作者邮箱:lxys3103@cqu.edu.cn。

著 者

2016 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究背景及意义	4
1.3 国内外研究现状	6
1.3.1 风切变目标建模与仿真	6
1.3.2 湍流建模与检测	8
1.3.3 地杂波建模与抑制	10
1.4 相关技术研究动态	14
1.4.1 风切变探测与预警	14
1.4.2 大气湍流检测	17
1.4.3 地杂波建模与抑制	18
1.5 本书的研究工作和章节结构	23
第 2 章 气象雷达回波	26
2.1 气象回波分析	26
2.1.1 云回波	28
2.1.2 雾回波	29
2.1.3 雨回波	32
2.2 气象目标特性分析	38

2.2.1	微粒性	38
2.2.2	叠加性	39
2.2.3	随机性	41
2.3	机载雷达气象目标分析与检测	42
2.3.1	雷达气象方程	42
2.3.2	气象目标谱宽分析	44
2.3.3	风切变	47
2.3.4	湍流	52
2.4	本章小结	58
 第3章 风切变目标回波建模与仿真		59
3.1	引言	59
3.2	风场特性分析	60
3.2.1	普通风场	60
3.2.2	风切变风场	64
3.3	风场建模与仿真	68
3.3.1	风切变风场模型	68
3.3.2	风场仿真	70
3.4	风切变目标回波信号模型	79
3.4.1	网格划分法	79
3.4.2	目标回波信号建模	81
3.5	风切变雷达目标回波信号仿真	85
3.5.1	天线模型	85
3.5.2	坐标变换	86
3.5.3	系统仿真原理与流程	88

3.5.4	目标回波仿真结果及分析	90
3.6	本章小结	100
第 4 章	湍流信号建模与检测	101
4.1	引言	101
4.2	湍流特性	102
4.2.1	湍流尺度与相关系数	102
4.2.2	湍流散射	104
4.2.3	湍流模型分析	105
4.3	湍流特性分析	107
4.4	湍流处理仿真分析	110
4.4.1	基于 FFT 的湍流仿真分析 ...	110
4.4.2	基于 Von Karman 模型的湍流 信号处理	115
4.5	湍流检测性能仿真	124
4.5.1	传统湍流检测算法分析	124
4.5.2	基于对数似然比的湍流检测	125
4.6	本章小结	133
第 5 章	气象雷达地杂波建模及抑制算法 	134
5.1	引言	134
5.2	地杂波功率谱分析	135
5.2.1	地杂波的分类	135

5.2.2	影响地杂波的主要因素·····	137
5.3	地杂波建模与仿真性能分析 ·····	140
5.3.1	地杂波建模·····	140
5.3.2	仿真流程与参数设置·····	143
5.3.3	仿真结果及分析·····	145
5.4	地杂波抑制算法 ·····	149
5.4.1	传统地杂波抑制方法·····	150
5.4.2	最小均方自适应地杂波对消器 ·····	162
5.4.3	最小二乘格形联合过程估计器 ·····	171
5.4.4	地杂波抑制滤波效果对比·····	179
5.5	本章小结 ·····	185
第 6 章	总结与展望·····	187
6.1	研究总结 ·····	187
6.2	研究展望 ·····	189
	参考文献·····	191

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

气象雷达主要用于飞机在飞行中实时探测航路上的气象状况,可探索前方的非线性时变微弱信号(风切变、湍流等),是保证飞机飞行安全的重要机载电子设备之一。气象雷达是大气监测的重要手段,在突发性的灾害监测、预报和预警中具有极为重要的作用。因此,先进的气象雷达是飞机上必不可少的电子系统。随着航空事业,尤其是民用航空事业的迅速发展,航班密度日趋增大,低空风切变的探测与预警已被提到议事日程上来。历史资料表明,飞机在起飞、着陆的终端空域是空难事故的多发空域,而风切变(尤其是低空风切变)和湍流等突发性灾害天气,是造成空难事故的主要原因。据 FAA 统计,在美国死于风切变空难事故的人数占全美空难人数的 40%左右^[1-3]。

风切变是一种大气现象,是指风矢量在水平和垂直方向的突变,其衡量标准是两点之间单位距离的风速矢量变化值^[4-7]。风切变的主要成因

有大气运动和地形环境因素两类。其中,大气运动主要包括雷暴、积雨云等强对流天气、锋面天气和辐射逆温型的低空急流天气等几类;地形因素主要包括山地地形、高大建筑物等几类。据统计,对飞行安全危害最大的风切变类型为微下击暴流,是一种特别强的下降气流。经大量研究表明,低空微下击暴流是风切变中最危险的。微下击暴流是一股小而强烈的下冲气流冲到地面附近便在所有方向上产生水平外翻的气流^[8-10]。微下击暴流的存在时间十分短暂,只有几分钟,可分为湿(降雨量大)和干(降雨量小)两种类型。不论着陆还是起飞的飞机,碰到微下击暴流都是一个严重的问题。因为飞机还在低空,飞行速度又只比失速速度快约 25%。微下击暴流接近地面时形成一股强冷下冲发散气流。飞机一开始先碰到加大迎角的逆风,结果升力增大,使得飞机高出预定的飞行路线。飞行员为补偿这一航线偏离可能会减小推力。但是,当飞机进入微下冲中心时,逆风的消失和随之而来的强下冲气流都会使飞机迅速向地面坠落,这两个因素给飞机的操纵带来较大困难,这时想完全避开危险区域已不可能了。风切变是导致飞行事故的大敌,特别是低空风切变。国际航空界公认低空风切变是飞机起飞和着陆阶段的一个重要危险因素,被人们称为“无形杀手”。有资料表明^[11-20],在 1970—1985 年的 16 年间,在国际定期和非定期航班飞行以及一些任务飞行中,据不完全统计,至少发生过 28 起与低空风切变有关的飞行事故,绝大多数都发生在飞行高度低于 300 m 的起飞和着陆阶段,其中尤以着陆为最多。在 28 起飞行事故中,着陆占 22 起,约占 78%;起飞为 6 起,约占 22%。在这 28 起飞行事故中,现代中、大型喷气运输机的风切变飞行事故比重较大,其中,DC-8 和 B707、727 等飞机占了绝大多数。1991 年 4 月 25 日,南方航空公司 B757/2801 号飞机在昆明机场进近中遇到中度风切变,飞机着陆严重受损。2000 年 6 月 22 日,武汉航空公司运货飞机在武汉王家敦机场进场中遇到雷暴云,受微下击暴流影响坠地失事。2004 年 9 月 12 日 20 时 30 分左右,从长沙飞往上海的 MU5302 航班,在即将降落时遭遇气流,飞机剧烈颠簸,致使机上 8 名旅客及机组人员受伤被送往医院救治。专家呼吁上海空港

应安装预警激光雷达为飞行安全上保险。2004年5月19日的10时2分30秒,据民航部门介绍,阿塞拜疆失事货机的黑匣子仍完好存在失事货机的机身后部。据介绍,飞机起飞前在100 m以下有低空风切变。大量的事实表明,低空风切变是飞行的“无形杀手”,过去因低空风切变造成了严重的生命和财产损失,世界各国加强对风场的监测。因此,建立全天候的低空风切变测试系统,既可保证航班起飞和降落的安全,减少飞机和乘客的生命和财产损失,又能够缩短飞机起降间隔,从而增加机场的运输能力,具有显著的社会效益和经济效益,其意义重大。

湍流是指在一定区域内大气中微粒的速度方差较大的气象目标,是大气的一种剧烈运动形式^[11-12]。湍流相当于风矢量在风矢量均值两侧进行的方差较大的无规则波动,因此,检测的不是气象目标的绝对速度,而是目标内包含的粒子的速度分布。速度分布越宽,则整个目标内的气流波动越大,因此湍流又称大气乱流。湍流通常发生在大气底层的边界处、对流云的云体内、对流层的中上部等几个区域^[13-15]。主要包括飞机尾流、热力湍流和动力湍流3种,飞机尾流显然就是由于大型飞机的尾流所造成的大气湍流,热力湍流就是指由于大气温度在垂直面上的不一致造成的空气对流,而动力湍流则是风遇到变化的地形等阻碍时所造成的大气波动。

要产生湍流则目标周围的气团需要满足一定的条件,主要包括热力学和动力学两个方面,即空气层必须具有不稳定性,尤其是大气温度随着高度下降增大的情况下特别容易造成大气的垂直对流,进而产生湍流;对于动力学方面,空气团中需要具有明显的风速的切变,强烈的湍流常伴随着雷暴,在雷暴区垂直剖面的中部湍流强度最强,在雷暴的外侧边缘也可能存在湍流。一般湍流分为晴空湍流和湿性湍流两大类。

湍流对飞行最主要的危害就是剧烈的大气波动会造成飞机的颠簸,影响飞行的舒适性,在严重的情况下也会造成飞机的仪表失准,进行使飞行员失去对飞机的控制能力,导致飞机失事。轻度的湍流会引起飞机的颠簸,影响乘客的舒适性,造成客舱内饮料的泼洒、乘客摔倒等后果,这种

情况下一般会提前通知乘客不要离开座位并系好安全带^[16-23]。对于由飞机尾流产生的湍流,如果其他飞机不慎进入尾流区,会出现飞机的抖动、发动机失控等严重后果,不过这种类型的湍流一般对体积较小的战斗机影响较大。不慎进入前方飞机的尾流区会致飞机的仪表失准,甚至会使用飞机坠毁,不过对于大型的民用运输机一般都会保持飞机之间的尾距,从而避免这种湍流的危害。高空的晴空湍流一般强度很大,对飞机造成的颠簸会很严重。

气象雷达的主要任务是获取气象目标信息,其信号处理系统的首要任务是干扰抑制和信号检测。由于气象雷达所面临的地杂波环境通常是错综复杂的,它不仅随不同的地理位置而不同,还会因为在不同的时间里天气的变化而不同^[24-30]。为了能在地杂波中对气象目标信号进行有效的检测,需综合运用现代信号处理的各种方法,研究气象雷达信号检测的新概念、新机理,提出新方法、新技术。对气象雷达地杂波的研究自然是其中的一个重要的环节,且已经越来越受到人们的重视。高度小于600 m的低空风切变是飞机起飞和降落过程中遇到的主要恶劣气象目标,这种情况下,由于气象雷达平台的运动和雷达主波束的下视照射,造成风切变等气象目标信号容易被地杂波所掩盖,因此,对地杂波进行分析、建立准确的杂波统计模型以及相应的仿真方法和抑制算法显得至关重要。

在低空中,由于地杂波信号的强度一般要超过气象目标信号,并且地杂波功率谱常常接近于气象目标,同时还受到气象雷达设备参数的影响,这些因素增大了雷达对地杂波的处理难度。

1.2 研究背景及意义

恶劣的气象是飞机失事遇难的重要原因之一。据统计表明,自20世纪70年代以来,由微下冲暴流风切变和湍流造成的飞行事故共千次以上。低空风切变较多发生在飞机起飞或着陆阶段。安全是民航的命脉,

随着我国民航事业的迅速发展,航班密度日趋增大,低空风切变的探测与预警已被提到议事日程上来。为确保飞机在起飞和着陆阶段的安全,研制气象雷达低空风切变和湍流探测技术属于一个重要的研究课题。

气象雷达的基本特点之一是在频域——时域存在着分布相当宽广和功率非常强的背景杂波中检测出有用的信号。这种背景杂波通常被称为脉冲多普勒杂波,其频谱密度是多普勒频率——距离的函数。当考虑雷达的噪声和其他干扰时,信杂比很小的目标回波可能被淹没在强的杂波背景中。杂波频谱密度的形状和强度决定着雷达对具有不同多普勒频率的目标检测能力。

湍流和风切变流场建模以及雷达回波信号仿真,是验证风切变雷达信号处理以及杂波抑制技术研究的前提。由于风切变和湍流现象属于小概率事件,其存在时间只有短短几分钟,且不具备重复性。依靠现场试验的方法进行研究,不但成本很高,而且危险性相当大。因此,研究可模拟真实湍流和风切变天气变化规律的仿真方法成为风切变雷达研究中的关键技术。准确而有效的风场模拟算法将有助于缩短风切变雷达的研制周期,节约研究费用。湍流和风切变目标回波信号模拟算法可通过方便、灵活地设定各类参数,模拟出各种情况下风切变和湍流场的风速真实分布情况,为雷达信号处理系统的设计提供良好的实验基础。

由于气象雷达平台的运动和雷达主波束的下视照射,造成目标信号很容易被强地杂波所掩盖,因此,对地杂波进行分析,建立准确的杂波统计模型以及相应的仿真方法显得至关重要。一方面可为雷达模拟器提供逼真的杂波环境模型;另一方面也有助于雷达杂波对消器的设计和实现,从而提高气象雷达抑制杂波能力,进而提高探测性能。因此,气象雷达环境特性的研究,对提高气象雷达性能有着十分重要的意义。

通过对气象雷达回波信号特性与信号处理研究,可为今后气象探测性能验证技术奠定基础,同时也为飞行环境监视系统气象雷达模块研制技术作储备。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 风切变目标建模与仿真

风切变是指大气中一段很小的距离内,风速、风向单独或两者同时发生急剧变化。ICAO 于 20 世纪 70 年代中已提出将风切变目标建模与探测研究列为重点研究课题。在美国由 FAA,NCAR,USAF,NASA 等政府部门和研究单位,均投入了大量的经费人力开展该课题领域的系统研究。其中,以联合机场气象研究计划(JAWS),微下击暴流及强风暴研究计划(MIST),以及对流形成和下击暴流实验计划(CINDE)等系统研究最有代表性。以上研究成功地取得了切变风场的形成演变和在该气象环境下飞行控制的动态性能,以及大量的外场观测数据。在以上系统研究的基础上,FAA 于 1985 年推出了“联邦航空局风切变一体化规划”,从而较系统地提出了在风切变环境下,保障飞行安全的基本设施。多年来,除美国外,还有英国、法国、日本、澳大利亚及俄罗斯等国家也都投入大量的人力和经费开展低空风切变方面的研究。美国联邦航空局在纽约已成功地研制成一部风切变告警雷达。该雷达是一部多普勒 C 波段雷达,可全自动探测和告警显示机场周围的恶劣天气,防止风切变造成的危害和微暴现象。

微下击暴流是雷暴天气中强烈的下沉气流撞击地面形成并沿地表传播的具有突发性和破坏性的一种强风。目前,针对下击暴流的风场建模主要有风场实测、实验室物理模拟、理论研究和数值模拟 4 种方法^[15-20],风场实测和实验室物理模拟成本较高,且数据有一定特殊性,通过流体力学的控制方程对微下击暴流进行仿真,计算出三维风速矢量,比二维的简单拟合更符合实际,且实验成本低,周期短,得出的数据具有一般性,便于参数分析,为微下击暴流的研究提供了新的途径。在国外,首先是 Selvan

等研究了微下击暴流的风场特性,Hjelmfelt 根据微下击暴流的实测结果,给出了典型微微下击暴流的风速剖面,随后 Wood 等使用二维模型研究了微下击暴流越过山顶的风速变化过程,Hangan 等利用雷诺平均应力模型研究了微下击暴流的风场特征^[21-30]。

在过去的 20 多年里,美国 NASA(国家宇航局)、FAA(联邦航空局)、Collins、Alliedsignal、Westhouse 等科研单位 and 生产厂商进行了大量的研究和试验,基本搞清了低空风切变的本质,揭示了它们影响飞行安全的机理,提出了对抗策略,研制出了包括红外、激光和微波雷达在内的多种探测设备。目前,机载前视风切变探测、告警系统主要有 3 种:红外辐射系统、微波多普勒雷达系统和激光多普勒雷达系统。基于多普勒雷达特性的风切变预警技术,成为气象雷达研制的核心,相关领域的模拟仿真以及信号处理方法是气象雷达生产制造的前提条件,具有重要的意义。

工作在 X 和 C 波段的多普勒气象雷达可探测风切变,方法是测定从大气中的雨、冰或其他碎片散射回来的回波,因其波长较红外和激光长许多倍,而受大气的影响又小得多。目前,战斗机和客机上都装有波长 3 cm 的气象雷达,性能先进的气象雷达利用多普勒效应探测湍流,经改进后可用于探测风切变,这样便不存在再装机的问题。改进型多普勒气象雷达可稳定地探测风切变,其探测距离也较激光雷达和红外探测器远,从而机载多普勒风切变探测雷达具有前视雷达的全部优点,因而得到大力发展。1992 年亚洲航展上,经改进过的具有前视式风切变探测性能的 RDR-4B 型气象雷达成为人们极为关注的热点。用于民航班机及军用运输机的新一代气象雷达能为着陆的飞机提供 90 s 的微下冲暴流及风切变的预警时间,风切变探测电路是在一定的高度上自动地接通的。

近些年来,飞机动力学研究结果表明,对待低空风切变的最好方法是尽早发现尽早回避,因而当今该领域的研究的热点逐渐集中于“低空风切变探测告警与回避技术”,其重点是探测技术,最终目标的是:研制出以最大限度满足尽早发现风切变现象的机载系统。加强机载风切变探测、告警、回避系统的开发,可减轻和避免风切变的危险。当然,回避是最