

环境扰动下空中动目标探测技术综述

任维贺, 张月*, 苏云, 张学敏, 邓红艳, 柳祎

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 空中动目标如空中隐身动目标以及高速飞行器对世界各国的国家安全产生了严重威胁, 对空中隐身动目标与高速飞行器的探测问题也是世界各国目标探测技术发展的热点方向。文中阐述了一种对空中动目标具有较好探测能力的新型目标探测技术——空中动目标环境扰动探测技术, 介绍了现阶段主要研究的四种空中动目标环境扰动现象及其探测方法, 即大气扰动场、等离子鞘套、大气偏振模式以及尾流, 研究了上述四种环境扰动探测技术的探测原理以及发展现状, 分析现阶段四种环境扰动空中动目标探测技术存在的问题, 最后对四种技术未来的发展方向进行展望并进行总结。

关键词: 空中动目标; 环境扰动; 目标探测

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210843

Review of air moving target detection technology under environmental disturbance

Ren Weihe, Zhang Yue*, Su Yun, Zhang Xuemin, Deng Hongyan, Liu Yi

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Air moving targets such as stealth moving targets and high-speed aircraft have caused serious threats to the national security of all countries in the world, the detection of stealth moving targets and high-speed aircraft in the air is also a hotspot in the development of target detection technology around the world. This article describes a new type of target detection technology with better detection capabilities for air moving targets—environmental disturbance detection technology for moving targets in the air, and introduces the four main researches on airborne moving target environmental disturbance phenomena and their detection methods at this stage. That is, atmospheric disturbance field, plasma sheath, atmospheric polarization mode and wake, the detection principles and development status of the above four environmental disturbance detection technologies are studied, and the problems existing in the four environmental disturbance detection technologies in the air at the present stage are analyzed. Finally, the future development directions of the four technologies are prospected and summarized.

Key words: air moving target; environmental disturbance; target detection

收稿日期:2021-12-25; 修订日期:2022-02-12

作者简介:任维贺,男,工程师,硕士,主要从事光学探测识别及数据图像处理方面的研究。

通讯作者:张月,女,高级工程师,硕士,主要从事基于环境交互的空中动目标新型探测技术、偏振三维成像技术等先进光学遥感技术方面的研究。

0 引言

目标探测技术发展至今,主要可以分为目标本体探测与目标环境扰动探测两种探测体制。目标本体探测技术,如雷达、红外探测技术,主要依靠目标自身的辐射、散射等特性进行目标信息获取,从而实现目标探测,目前该类探测技术为国内外目标探测的主要手段。但是随着世界科技的发展,世界各国新一轮的军备竞赛正在开展,世界各国正大力发展空中军事力量,新型空中隐身动目标、高速飞行器不断涌现,如美国新型隐身轰炸机 B-21、新型隐身导弹 LRASM、高速飞行器 HAWC 等,该类目标以其高机动性、高破坏性以及低可探测性对世界各国的国家安全造成了严重威胁;空中隐身动目标本身的散射、辐射特性不断降低,目标本体探测技术对空中隐身动目标的探测难度越来越大,如雷达对于 RCS 为 0.01 、 0.1 m^2 隐身飞机目标探测距离仅为正常非隐身目标探测距离的 $12\% \sim 37\%$ ^[1-2];高速飞行器由于飞行时会使空气产生电离效应而导致传统目标本体探测技术对其难度较大,本身便具有一定的隐身性能。根据美国对发展各种反隐身技术和能力的经费比进行研究表明,发展反隐身技术比发展隐身能力要困难 100 倍,故传统的目标本体探测技术对于空中隐身动目标探测将愈来愈困难,需要一种新型的空中目标探测技术来解决空中隐身动目标的探测问题,保障世界各国国家安全。在此基础上,国内外学者开始着手进行目标环境扰动探测技术研究,目标环境扰动探测技术主要是通过探测空中动目标飞行时对大气环境产生的扰动来探测空中动目标,不直接对空中动目标本身进行探测,探测效能不依靠目标本身的散射、辐射特性,具有探测效能不受空中动目标隐身性能影响的优势,理论上能够解决新型空中隐身动目标以及高速飞行器的探测问题。目前,学者们广泛研究的目标环境扰动探测技术主要有大气扰动场、等离子鞘套、大气偏振模式、尾流等四种。

文中主要介绍了现阶段大气扰动场、等离子鞘套、大气偏振模式、尾流四种空中动目标环境扰动现象及其探测方法,研究了基于上述四种环境扰动的目标探测技术原理以及发展现状,分析现阶段四种环境扰动空中动目标探测技术存在的问题,最后对四种技

术未来的发展方向进行展望并进行总结。

1 空中动目标的环境扰动及其探测方法

环境扰动,指空中动目标在大气环境中飞行时对大气环境气体分布、偏振模式、等离子体分布等特性产生的影响,文中介绍的环境扰动下空中动目标探测技术即基于此种环境扰动实现。本节中主要分为大气扰动场、等离子鞘套、大气偏振模式、尾流、其他环境扰动五个方面来进行介绍。

1.1 大气扰动场及其探测方法

大气扰动场是物体高速飞行时,由于空气的粘性效应,在几何和气动外形上的气流阻碍作用伴随着气流的减速增压而产生的空气动力学现象,图 1 为大气扰动示意图。

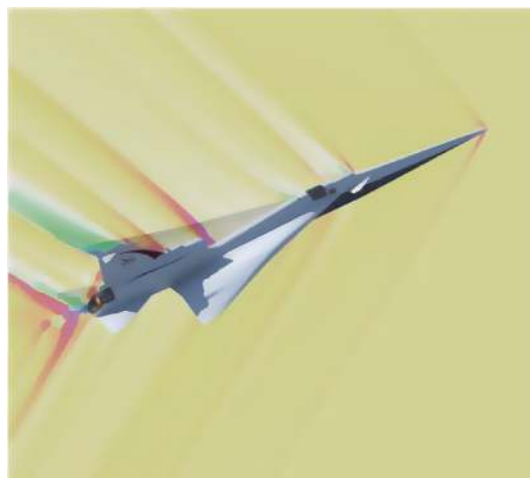


图 1 飞机大气扰动场示意图

Fig.1 Schematic diagram of aircraft atmospheric disturbance field

大气扰动场是飞行器飞行时的必然产物,通常情况下无法用眼睛直接观察到飞行器的大气扰动场,飞行器飞行会压缩其周围空气,使空气密度增大,对光线的传输产生折射作用,据此可以通过图像处理方式对飞机飞行形成的大气扰动场进行显示,图 2 为 NASA 大气扰动场探测试验所获取的飞机大气扰动场图像^[3]。

由于大气扰动场改变气体密度,则会改变光线传输的路径,根据这一现象,可以利用大气扰动场进行目标的探测,目前主要的探测手段为可见光探测,利用背景纹影技术,其基本其探测原理如下。

由于空气的粘性效应,飞行器飞行会对大气气体的进行压缩,形成大气扰动场,使大气密度变大,引起

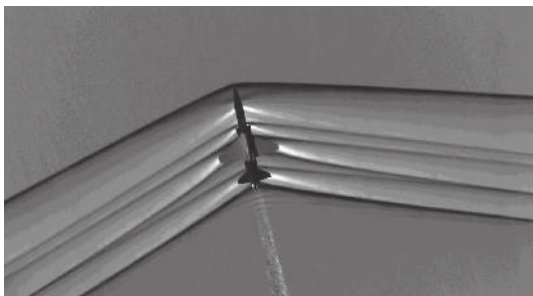


图 2 飞机飞行时形成的大气扰动场

Fig.2 Atmospheric disturbance field formed during airplane flight

折射率变化,光线通过大气扰动场时光线便会发生偏折,背景纹影技术通过探测光线的偏折来反演大气扰动场。首先利用高帧频相机对地物背景进行连续成像,当相机视场内存在飞行器时,其大气扰动场会使光线传播路径发生偏折,此时高帧频相机采集到的地物背景图像会因扰动场而产生扭曲,地物背景图像纹理在相机成像面上的像元位置会发生变化。通过连续多帧图像的关联检出可以去除不变的地物背景信息,仅获得像元的位移信息,其位移大小反映了光线偏折的角度。通过流场反演技术可以得到大气环境的折射率分布,进而求得大气扰动场分布^[4-6]。大气扰动场为目标在大气层内飞行时同大气环境必然产生的交互作用,同飞行高度无关,扰动场特征同目标外形特征相关,一般为楔形,同自然流场差异明显,目标扰动场与自然流场分辨难度较低,可用于目标探测,目前该技术仅能确定视场内目标的二维航迹信息,不能确定其高度信息,背景纹影技术基本原理如图 3 所示。

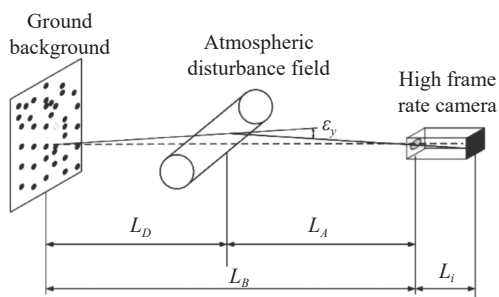


图 3 背景纹影技术原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of background schlieren Technology

背景纹影技术于 2000 年由 Dalziel 等人提出。同年, G.Meier 介绍了三种不同类型的背景纹影技术,提出可以将其用于对流场的流动显示和 CT 重建。Raffel

等人提出了利用随机点图像作为背景图进行流场测量的方法,并且进行了悬停直升机的旋翼尾流可视化的实验研究^[7-9],如图 4 所示。

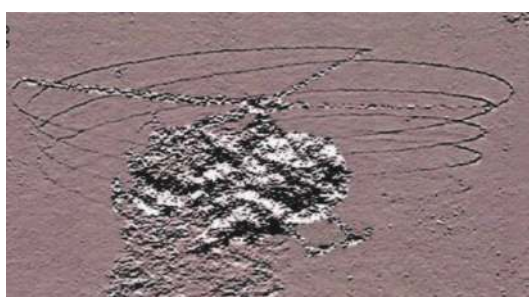


图 4 直升机流场可视化结果图

Fig.4 Visualized results diagram of helicopter flow field

自 2004 年开始,背景纹影技术开始应用于密度场的研究。2007 年, Erik Goldhahn 等人分析了背景纹影技术中的精度、灵敏度和分辨率等实验参数; 2010 年, Hargather 等人在室外选取了不同的自然背景,对背景纹影实验设置进行了对比分析,拓展了背景纹影技术的应用; 2018 年, L Santos 等人用 BOS 技术测量了跨声速流场密度,通过与相同特性下的 CFD 分析结果的对比,验证了测量方法的正确性^[10-12]。

2019 年, Rohit Gupta 等人以 BOS 技术测量了三种不同润湿性下垂直表面的密度场,得出了平均折射角和平均密度梯度与冷凝质量间的线性关系,该研究扩展了 BOS 技术应用范围,具有很强的工程意义。2020 年, Jagadesh Ramaiah 等人利用 BOS 技术研究流体动力学,并基于条纹解调技术来提高噪声鲁棒性,最后利用 GPU 实现测量,推动了流体力学的发展。同年, Shoaib Amjad 等人测量了湍流流动中的三维瞬时密度场,分析了测量误差带来的影响,为三维密度场和折射率场的重建提供了有效的方法^[13-15]。

综上所述,从 2000 年背景纹影技术被提出以来,世界各国学者不断推动该项技术的发展,正逐步迈向

工程应用。

1.2 等离子鞘套

当高速飞行器在大气层中以高速飞行时,由于气体分子的粘性效应,飞行器周围会形成弓形激波,同时飞行器会与包覆在其周围的空气发生剧烈摩擦,将飞行器大量的动能转化为气体的热能,造成包覆在飞行器周围气体的温度急剧上升,温度可达数千甚至近万 K,在此高温条件下,空气中的氧、氮等分子将会发生解离,电子可以获得足够的能量,摆脱了原子核的束缚、变成自由电子,发生了电离,空气变为“等离子体”。高速飞行器在飞行过程中与大气不断发生作用,使其周围的空气持续电离产生等离子体。等离子体在激波的作用下,被流场约束在飞行器周围,形成一层包覆在飞行器表面的等离子体层。这层等离子体通常被称为“等离子鞘套”。

等离子鞘套内部存在着大量可以自由运动的带电粒子,会对与其作用的电磁波产生较为明显的相互作用、干扰测控通信的正常开展。等离子鞘套的形状以及参数分布,受到飞行器的形状、飞行速度、高度、攻角、来流大气环境等多种因素共同影响。

图 5 所示为钝头锥体飞行器等离子鞘套示意图。这类飞行器在高速飞行过程中,其头部会与前方大气产生明显的压缩作用,产生强烈的弓形激波。等离子体大部分在此处产生,并随着流场向飞行器后方扩散,在飞行器周围形成等离子鞘套包覆^[16]。

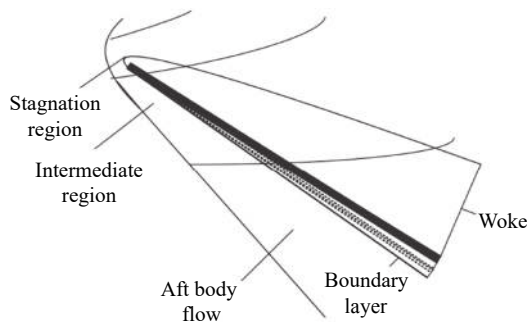
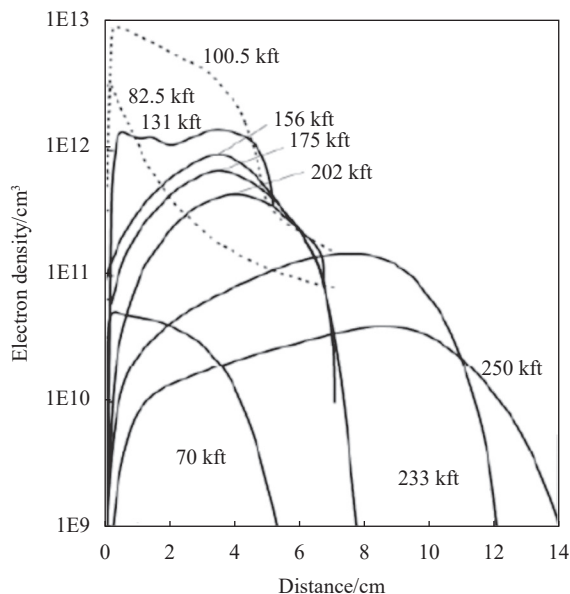


图 5 等离子鞘套示意图

Fig.5 Schematic diagram of plasma sheath

等离子体鞘套内的电子密度高达 10^{15} cm^{-3} ,如此高的电子密度会导致微波段通信电磁波的频率远低于等离子体频率,电磁波会产生严重的衰减效应,进而导致飞行器和外界之间的通信遥测信号受到严重影响,甚至造成地面无法捕捉飞行器位置^[17]。

国外对等离子鞘套的研究起步比较早,美国、前苏联等军事强国早就开始对再入过程中目标的散射特性进行研究。早在 20 世纪 60 年代,美国就利用再入弹头携带科学仪器进行实验,获得了多种条件下等离子鞘套特性和电波传播特性。到了 80 年代后期,美国又进行了导弹关键防御计划等一系列的试验,获取了再入阶段弹头等目标的电磁散射特性,如图 6 所示。1999 年,俄罗斯研究出了具有实用价值的等离子体发生器,并且让其在飞行器上得到了应用,有效地减小了部分雷达波段下目标的雷达截面(RCS)^[18-19]。



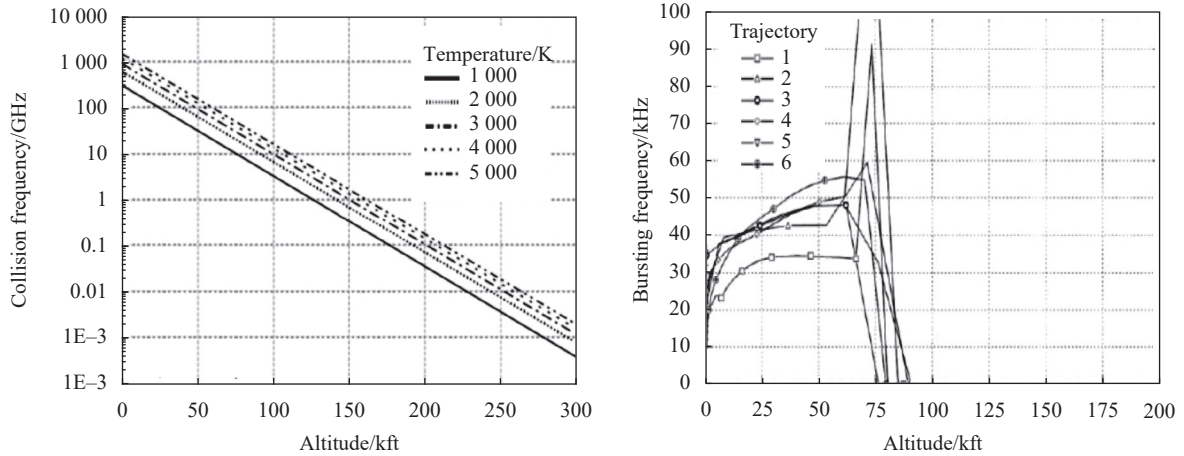


图 6 RAM 计划获取的等离子鞘套特性

Fig.6 Plasma sheath characteristics acquired by RAM project

20 世纪初, 美国和前苏联为研究临近空间高速飞行器的电磁散射问题做了大量的工作^[20-24]。但之后的几十年工作进展不是很大, 也鲜有相关文献。直至近几年学者们又开始逐渐关注起这方面的工作, 如 V. I. Sotnikov 等人对飞行器周围湍流引起的电磁散射特性进行了分析; 2008 年, Karin Schuler 等人利用射线追踪方法对高速飞行器目标的电磁散射特性做了相关的研究; 2014 年, Michael Walter 等人对电磁波入射到飞行目标产生的多普勒现象进行了研究^[25-27]。除此之外, 还有很多关于高速飞行器电磁散射的文献和报导^[28-34]。

由于经费以及技术的限制, 目前等离子鞘套的相关的试验和实验比较少, 主要工作集中在等离子鞘套的电磁波传播特性、等离子鞘套对目标电磁散射特性的影响机理等的理论研究和仿真。

目前, 等离子鞘套的探测方法目前主要是雷达探测, 其基本原理与雷达探测目标原理相同, 即利用雷达发射的电磁波遇到目标后产生的回波信息来获取距离、方向、速度等信息, 如图 7 所示。

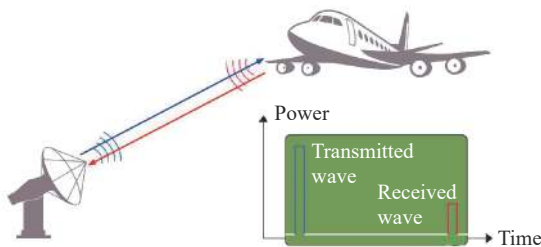


图 7 雷达探测示意图

Fig.7 Schematic diagram of lidar detection

1.3 大气偏振模式

太阳发射的自然光是一种完全非偏振光, 包含着各个方向上振幅相同的光矢量。无偏的太阳光在传输的过程中, 经大气中空气分子、气溶胶等介质的散射作用, 其中一部分光束会偏离原来的传播方向, 光矢量分布也由相对于传播方向的对称性分布变成不对称性, 产生一定的偏振特性。如图 8 所示, 当一束无偏振的太阳光照射到粒子上, 在不同散射方向上会产生不同偏振特性的散射光^[35]。

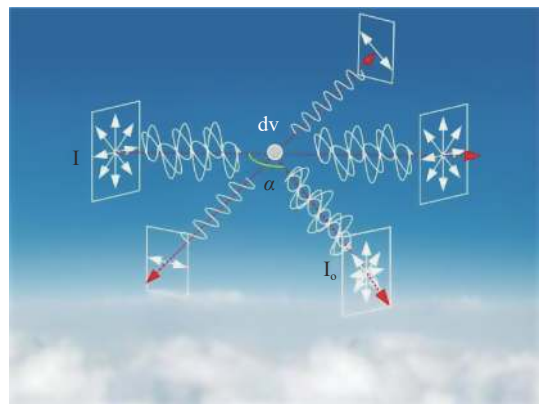


图 8 粒子散射与天空偏振光的产生

Fig.8 Particle scattering and the generation of sky polarized light

除了散射效应会产生偏振外, 折射、反射现象都会形成偏振光, 如大气粒子散射、植被反射, 海洋反射, 云层折射等。大气偏振模式是不同天气条件下大气环境中粒子散射产生的各方向偏振光汇聚而成一种偏振光分布模式。大气偏振模式受太阳光经大气

层传输的过程中的各种内部和外部因素共同影响,携带着丰富的环境信息,是地球的重要属性之一^[36],大气偏振模式理论模型如图 9 所示。

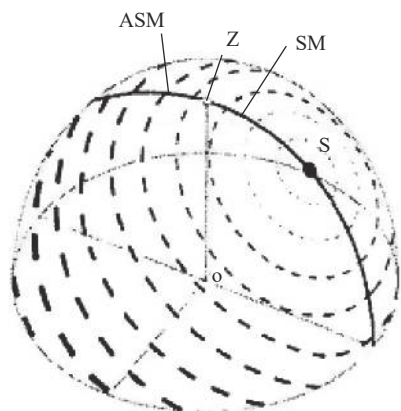


图 9 大气偏振模式理论模型图

Fig.9 Theoretical model diagram of atmospheric polarization mode

大气偏振模式具有相对稳定性,天空中的偏振模式分布在某一天、某一地点的某一时刻是不变的;同时,大气偏振模式还具有动态性,环境、空间及方位等任一因素发生变化都会导致大气偏振模式的分布发生变化。大气偏振模式的相对稳定性和动态性与大气环境、地理位置、太阳位置等环境因素有着密切的联系。根据大气偏振模式的这一特性,可以利用其进行目标探测,当目标在大气环境中飞行时,将对大气偏振模式产生扰动,通过对扰动的研究与分析,进而实现目标的探测。

大气的偏振现象是 Arago 于 1809 年首次发现的,此后的英国学者 Brewster、法国学者 Babinet 等诸多学者都对大气光的散射传输特性进行了大量的研究。其中,1870 年英国的 Rayleigh 勋爵提出了经典的 Rayleigh 散射理论,为晴朗天气下大气偏振模式的散射传输模型提供了理论指导,后续学者根据 Rayleigh 散射理论建立了基于 Rayleigh 散射模型的大气偏振模式;德国物理学家 G.Mie 在 1908 年提出了 Mie 散射理论,该理论将 Rayleigh 散射理论中的单次散射推广到了多次散射,在此之后,学者们又从光波的辐射传输方面对天空偏振光的散射传输进行描述,如 1950 年 Chandrasekhar 提出了辐射传输理论,之后 Sekera、Plass 等也进行了相应的研究。大气偏振模式的分布和观测点的地理位置、大气环境、地表特征,观测时间等都有关系,所以大气模式中蕴含这丰富的信息。自从人们发现天空存在偏振现象以来就对大气偏振模式开展了深入研究,其中动物实验研究表明诸如沙蚁、蜜蜂、蝴蝶、蝗虫等很多动物能利用大气偏振模式进行迁徙导航和定向。因此,大气偏振模式的特性研究对动物导航行为、大气特性、地表环境特征和仿生偏振光导航都具有重要的理论与应用价值^[37-46]。

目前,针对大气偏振模式的探测方式主要为相机与偏振片组成的偏振探测系统,通过获取不同偏振度下天空环境的偏振信息,最终获取全局的大气偏振模式^[47],偏振探测系统如图 10 所示。

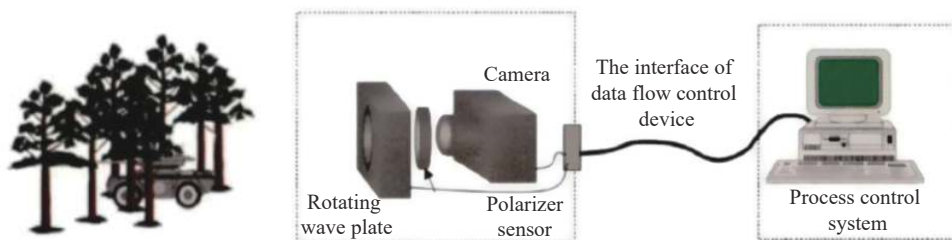


图 10 偏振探测系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of polarization detection system

1.4 尾流

尾流是飞行器飞行时产生的一种反向旋转的强烈气流,是飞行器飞行时发动机工作的必然产物,其形成原因为机翼上下翼面压力差。以飞机为例,飞机

尾流空间尺度大,能够达至上千米、持续时间长,可维持数分钟、风速较大,可达几十米每秒。飞机飞行时,机翼下表面的压力大于机翼上表面的压力,下表面压力大的气流力绕过机梢,流向压力较小的上翼面,在

机梢后沿汇合形成尾流^[48-49],如图 11 所示。

飞机尾流由于其空间尺度大、风速较大等特性会对大气环境的空间结构和与气流速度分布等产生影响,故其具备光学与电磁学领域的可探测性,这是飞机尾流探测技术研究的基础。

关于飞机尾流的研究主要分为两个方面:模型研究与探测试验研究。在尾流的模型研究方面, Sarpkaya 等人提出了新的尾流衰减模型,该模型用于预测飞机尾涡在真实环境条件下的下沉情况,与在机场的激光雷达探测数据拟合度较高; Visscher I D 等提出了一种用于近地尾流预测的快速模型,可以实时预测飞机在给定的环境气象条件下产生的尾流随时间的变化; Holzäpfel F 等采用 LES 分析不同风条件下尾流的变化规律,提出了一种描述尾流衰减的 P2P 模型^[50-56]。2011 年, Hennemann I 等通过 LES 的方法分析了不同气象条件下尾流消散的情况,分别对大气湍流和温度分层对尾流消散的不同影响进行了说明; Sarpkaya T 等在 2015 年通过在 Memphis 机场的大飞机的数据,分析得出了影响尾流消散的重要因素; Körner S 等提出的 P2P 模型利用多模型集合的方法可以更好拟合尾流变化的可靠集合平均模型^[57-59]。

在尾流探测试验方面,同样有许多学者进行了相应的研究。

现阶段,飞机尾流探测主要有激光雷达探测与微波雷达探测两种方式,由于比起激光雷达,微波雷达的波束在降水条件下的衰减小得多,故在降雨、云雾等天气条件下,微波雷达更适于探测飞机尾流,主要



图 11 飞机尾流图

Fig.11 Aircraft wake diagram

探测雨滴,雾滴等降水粒子的散射特性,采用脉冲多普勒技术得到尾流速度的时空分布;在晴空天气条件下,激光雷达波束的衰减较小,具有较远的探测距离与较高的时间和角度分辨率,激光雷达主要探测散射尾流内部的浮尘等微粒的散射特性,激光雷达探测尾流方法如图 12 所示。

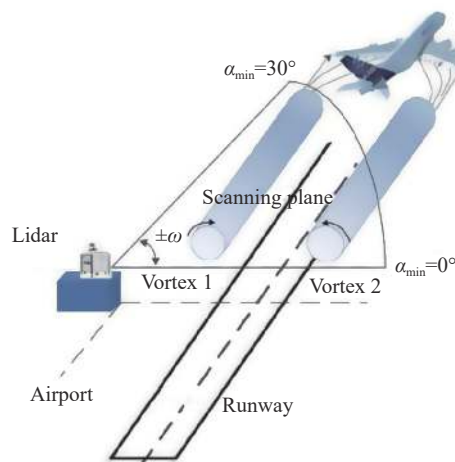


图 12 激光雷达探测飞机尾流示意图

Fig.12 Schematic diagram of lidar detecting aircraft wake

1.5 其他环境扰动

除上述四种环境扰动外,地磁异常探测也是一较为成熟的环境扰动探测技术。

正常情况下,地球磁场具有不均匀分布特性,但是短时间小范围内的地球磁场可视为匀强磁场,且不会发生大的磁场值变动。由于地磁场会磁化含有磁性物质的物体,使其产生磁场,该磁场与缓慢变化的地磁场特性相异,会造成地磁畸变,通过识别地磁场以及其中各类磁性物体引起的磁场的空间分布特征,发现其中的异常,可进行目标探测,地磁异常如图 13 所示。



图 13 地磁异常示意图

Fig.13 Schematic diagram of geomagnetic anomaly

地磁异常的主要探测方式为磁力仪探测,当磁性目标在空间中引起磁场的变化,其中不同位置的磁感应强度随着磁力仪传感器与磁性物体的距离变化而

变化,磁力仪探测到磁性目标产生的磁场时,会产生磁异常信号,通过对异常信号的检测或识别,则可以实现磁性目标的探测,如图 14 所示。

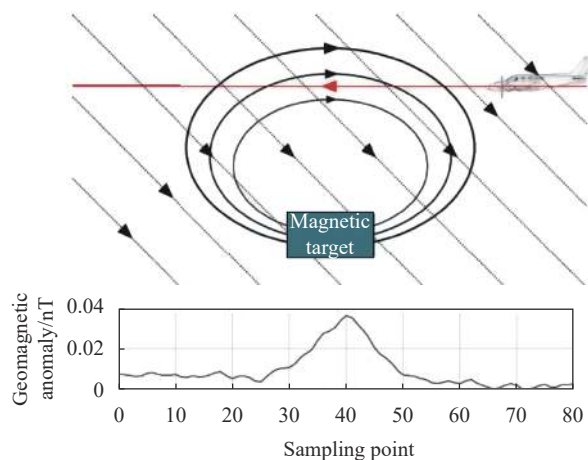


图 14 地磁异常探测示意图

Fig.14 Schematic diagram of geomagnetic anomaly detection

目前,对于地磁异常探测的研究主要围绕水下磁目标探测领域,尚未延伸至空中领域,对空中地磁场分布以及空中目标磁异常的研究^[60-62]。

此外,基于环境扰动的目标探测还存在声音探测、静电探测等领域,声音探测是一种采用声学原理,利用电子装置处理获取的声波信息以实现目标的识别和定位的技术。它是一种重要的军事侦察手段,可用于探测正在飞行的直升飞机等空中目标;静电探

测是通过探测目标周围空间的静电场来得到目标的有关信息的一种探测方法,其理论基础是静电场原理,利用探测电极对空中目标的静电场感应获取目标的信息。但这些领域的技术都处于刚刚起步阶段,技术成果较少,存在探测距离近、探测效果差等问题,距离技术应用较远^[63-68]。

所以,由于研究方向、成熟度等因素,下文不针对磁异常、声音、静电等环境扰动探测进行研究,主要对上述四种环境扰动探测技术进行研究。

2 环境扰动探测技术发展现状

2.1 大气扰动场探测技术发展现状

针对大气扰动场探测技术的研究方面,比较有代表性的为美国国家航空与航天局(NASA)进行的相关试验及其试验结果。

2011年4月,NASA研究人员通过大气扰动图像处理方法,将大气扰动探测场技术首次用于空对空机载飞行成像实验,证明了大气扰动探测技术可以用来对T-38飞机的大气扰动场进行成像,试验采用互相关算法进行大气扰动场的检出,采用了多重网格方法,从一个32×32 pixel窗口开始,然后第二次通过一个16×16 pixel窗口。在相关之前采用5×5的高通滤波器。最后,进行保守异常值检测,用数据插值代替异常值数据^[69],如图15所示。

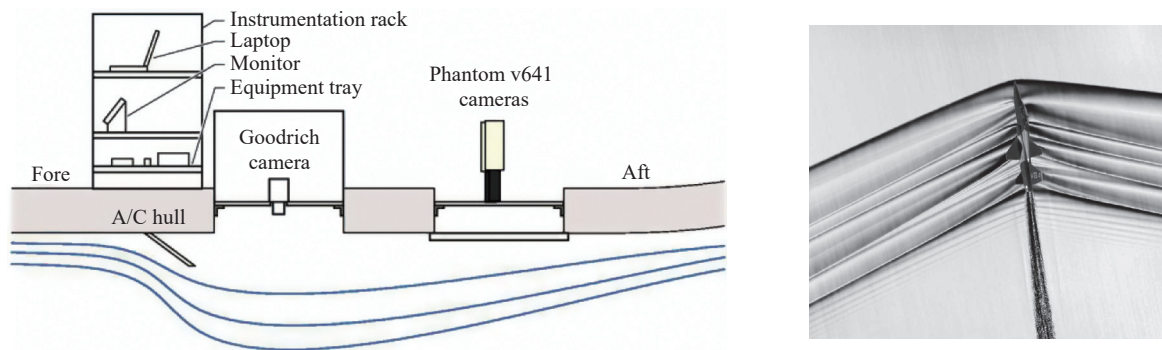


图 15 飞机大气扰动场成像系统及探测结果图

Fig.15 Aircraft atmospheric disturbance field imaging system and detection results

2014~2015年,NASA研究人员继续进行了飞行试验,对T-38等超音速目标成像。实验采用的性能更好的成像系统以及Horn-Schunck光流算法获得了

更为清晰的大气扰动场图像,并对互相关算法与光流算法的分辨率进行了对比,发现互相关算法分辨率是光流算法分辨率的四分之一,其原因是互相关询问网

格是光流窗口大小的四分之一^[70-71], 试验结果如图 16~图 17 所示。

2017 年, NASA 开展了钙-K 日食大气扰动探测试验, 以太阳为背景, 在地面对高速飞机大气扰动场进行成像^[72], 试验系统及结果如图 18 所示。

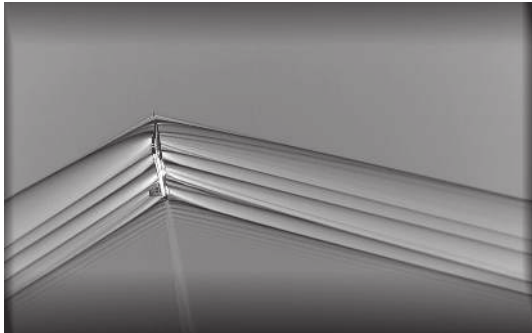


图 16 飞机大气扰动场优化探测结果图

Fig.16 Optimized detection results of aircraft atmospheric disturbance field

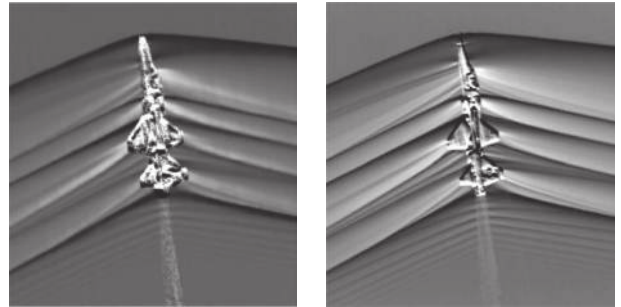


图 17 互相关 (左) 与光流算法 (右) 处理结果对比图

Fig.17 Comparison of processing results between cross-correlation (left) and optical flow algorithm (right)

2019 年, NASA 进行了多架飞机大气扰动场探测, 利用两架训练喷气式飞机将超音速飞机大气扰动场相互作用的过程可视化, 图像处理采用光流算法。这是首次获取两架飞行中的飞机超音速冲击波相互作用的图像^[73], 如图 19 所示。

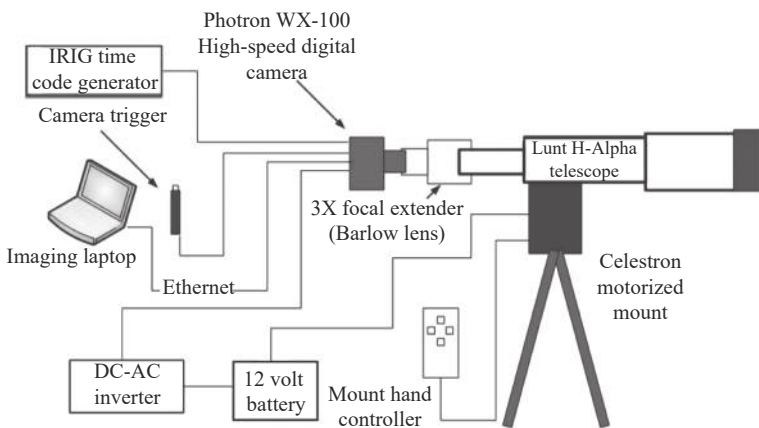


图 18 钙-K 日食大气扰动场成像系统及探测结果图

Fig.18 Ca-K solar eclipse atmospheric disturbance field imaging system and detection results

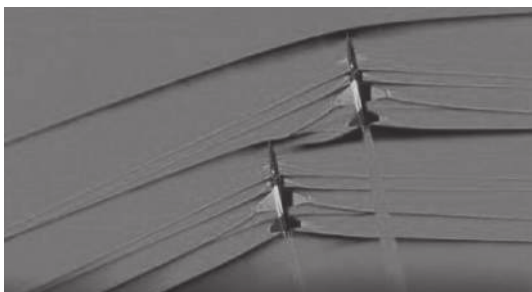


图 19 两架飞机大气扰动场相互作用图像

Fig.19 Interaction image of the atmospheric disturbance field of two aircraft

综上所述, 大气扰动场的探测技术无论从技术原理还是从试验效果上来说, 均具备较好工程实践可行性, 现阶段具备发展成为工程化的空中动目标探测技术的理论与试验基础。

2.2 等离子鞘套探测技术发展现状

目前, 等离子鞘套的研究主要分为等离子鞘套自身特性、等离子鞘套电磁传播特性以及等离子鞘套对目标探测的影响三个方面。

针对等离子鞘套自身特性方面的研究, 20 世纪 60 年代, 美国于 RAM 工程期间对电磁波在再入等离

子体鞘套中的传播机理和衰减测量方面的进行了一系列研究。研究发现由于等离子介质的动态特性,电磁波信号在其中传输会发生剧烈抖动,产生幅噪和相噪,甚至会使电磁波传输中断^[74],图 20 为 RAM 部分试验数据。

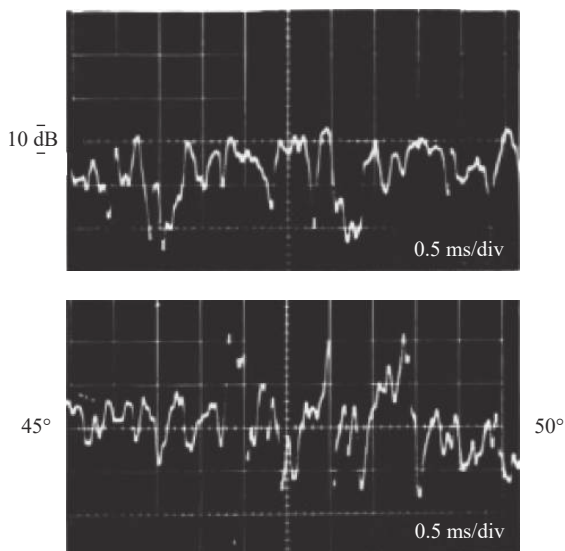


图 20 美国 RAM-C 飞行试验 X 频段信号幅度和相位抖动

Fig.20 X-band signal amplitude and phase jitter of the RAM-C flight test in the United States

针对电磁波穿过等离子鞘套的传播特性方面, Li J T 分析了等离子鞘套对不同频率入射电磁波的衰减及相移规律; He G L 研究了等离子鞘套透射波和反射波之间的相关性; J Zhang 等人对空间色散非均匀再入等离子鞘套层中电磁波传播的影响进行了研究; Basnet S 分析了非麦克斯韦电子存在下的带负电的磁化等离子体鞘层特性; Tian D Y 等人研究了飞行器俯仰运动对等离子体鞘层特征参数的影响,发现等离子鞘套特性的变化周期与俯仰运动周期相同,揭示了动态等离子体鞘的分布和规律等^[75-79]。

针对等离子鞘套对目标探测影响的方面,诸多学者也进行了相关研究,如 Liu W 仿真分析了由 α 粒子引起的等离子体对目标反射特性和 RCS 的影响,发现针对不同的等离子体参数,入射波在某些特定的入射角度时,目标 RCS 会达到最小; Y Ding 研究了建立了等离子体鞘套覆盖再入目标的回波信号模型,分析了回波信号在时间、时频和距离方面的多域特征,揭示了等离子体鞘套覆盖的影响机制; Bian Z 等人采用物理光学方法计算分析了等离子体鞘套覆盖的高速

飞行器的动态电磁散射特性; Musselman R 等人研究了典型高速飞行器及其等离子体鞘套的 RCS 建模,分析等离子体参数以确定哪些参数对于准确的 RCS 预测最为重要; Liu H Y 等人计算了太赫兹波段导体球的 RCS,以说明太赫兹波在致密的等离子体鞘中具有很强的穿透能力,使用 RKETD-FDTD 公式的有限差分时域方法研究致密磁化等离子体鞘层中的散射特性,详细讨论了磁场方向、碰撞频率、等离子体频率、入射波与 Z 坐标轴的夹角和极化方向对它的影响等^[80-84]。

但是由于等离子体鞘套明显的动态特性,受限于对动态性的认识不足以及流场计算和实验测量条件,如何利用雷达对目标进行有效的探测,目前尚无成熟的研究成果,仅有一些学者进行了定性分析,并无成熟的探测理论与技术方案。

综上所述,受限于等离子鞘套现阶段等离子鞘套研究条件以及等离子鞘套特性的复杂性,目前等离子鞘套的研究主要集中在等离子鞘套对电磁波传播以及目标探测的影响方面,对利用雷达进行等离子鞘套探测方法研究方面成果较少。

2.3 大气偏振模式探测技术发展现状

目前,针对大气偏振模式探测研究主要有大气偏振模式的理论模型的构建、获取方法研究两个方面。

大气偏振理论模型构建方面,许多学者构建了诸多理论模型,1991 年, Evans K F 等人提出了基于倍加累加法的 RT3、RT4 模型,后来很多模型都以此建立; Spurr 于 2006 年提出了 VLIDORT 模型; Vimal Thilak 等人于 2007 年提出了 pBRDF 模型; Mayer B 等人于 2009 年提出了一种基于 Monte Carlo 方法的 MYSTIC 模型以及 2014 年 Scchepers 等人提出了 LINTRAN 模型等^[85-89]。

大气偏振模式获取方面,2010 年,美国 Joseph A Shaw 等人设计出图像式全天空偏振模式自动测试装置,并利用该装置分别在晴朗天空和有云天气下进行对比测试,结果表明云层会使最大偏振度值减小,而不影响偏振方位角^[90],如图 21 所示。

2012 年,美国 Nathan J. Pust 等人利用全天空成像偏振仪研究表明地表和气溶胶很大程度上决定了天空偏振模式中最大偏振度值。2016 年,美国 Todd Aycock 等人研制出天空偏振方位传感系统,测试分析了不同天气状况下的偏振方位角。2017 年,德国

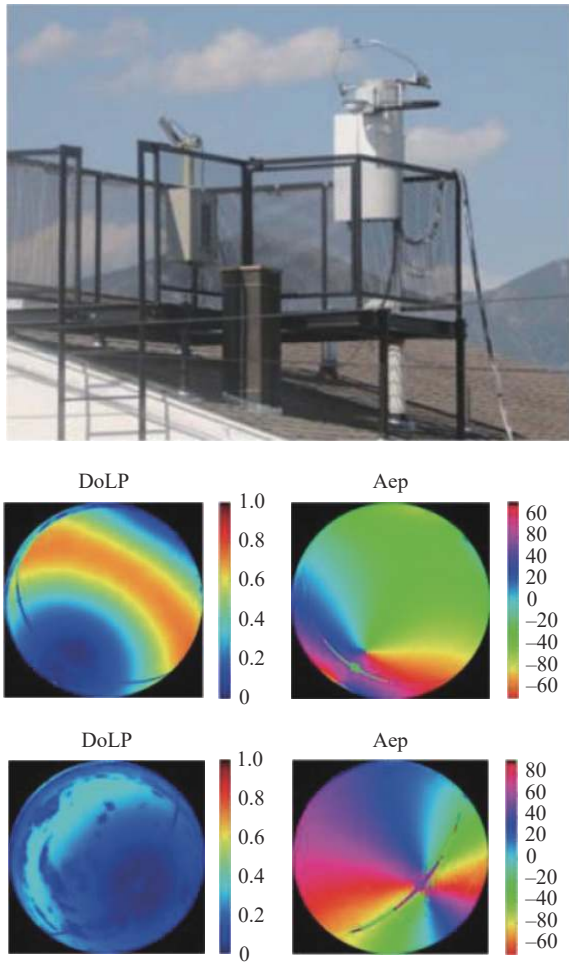


图 21 图像式全天空自动测试装置及测量结果

Fig.21 Image-based all-sky automatic test device and measurement results

Emde C 等人研究了太阳光受到气溶胶颗粒、云参数和地表反照率等影响时发生的多次散射过程,结果表明高冰水云的散射和海洋表面的反射对解释长波连续偏振十分重要等^[91-93]。

2017 年, Shaw J A、Snik F 等人在 8 月美国的日全食发生期间, 分别对当时的全天空偏振模式进行了探测与纪录, Shaw J A 等人采用两个基于数字单反相机和鱼镜头的全天成像系统, 记录了全天空偏振模式的空间和时间偏振模式; Snik F 等人使用三个同步的 DSLR 相机, 带有 0°、60°和 120°的偏振滤光片, 测量了切向日冕极化和垂直天空极化^[94-95]。

目前, 针对于大气偏振模式的主要应用于大气偏振模式导航, 国内外学者的大气偏振模式应用研究也主要围绕此类应用展开, 如 2002 年 Schmolke 等人通过人造偏振光, 在室内实现了移动机器人路径跟踪实验。2012 年, Chahl 等人在无人机上对开发的仿蜻蜓

复眼的偏振光导航传感器进行了测试等。尚无关于利用大气偏振模式的空中动目标探测方法以及空中动目标对大气偏振模式的影响方面的研究^[96-97]。

综上所述, 作为一种原理可行的空中动目标探测方法, 目前国内外学者的研究方向并未朝向基于大气偏振模式的空中动目标探测方面。

2.4 尾流探测技术发展现状

目前, 针对飞机尾流探测研究, 国内外学者开展了一系列试验, 获得许多成果。

2006~2008 年, 法国泰雷兹 (Thales) 公司在巴黎戴高乐机场和 Orly 机场利用 X 波段雷达 BOR-A550 进行了飞机起降阶段尾流探测实验, 实现了晴空及小雨天气条件下近距离 (0.5~7 km) 上尾流的雷达探测, 得到了尾流的不同演化阶段的频谱特性^[98]。

2008 年 12 月, 国防科学技术大学利用 X 波段某型多普勒天气雷达 (峰值功率为 50 kW) 对晴空条件下某运输机尾流进行了测量。实验结果为尾流的 RCS 约为 -90~-80 dBsm, 如图 22 所示^[99]。

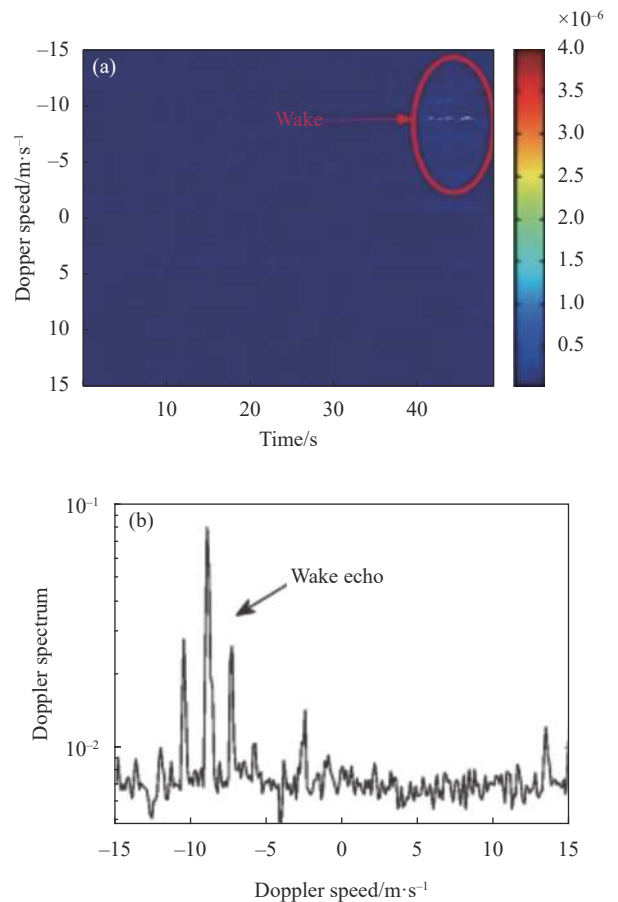


图 22 尾流探测实验结果

Fig.22 Wake detection experiment results

2009 年 3~5 月,美国运输部运输系统中心和 PROSENSING 公司利用 W 波段宽带雷达对降落阶段的飞机尾流进行了测量,得到了降雨条件下 1 km 距离上飞机尾流的实孔径高分辨特性和多普勒特性,并观测到飞机尾流的演化特性,试验结果见图 23^[100]。

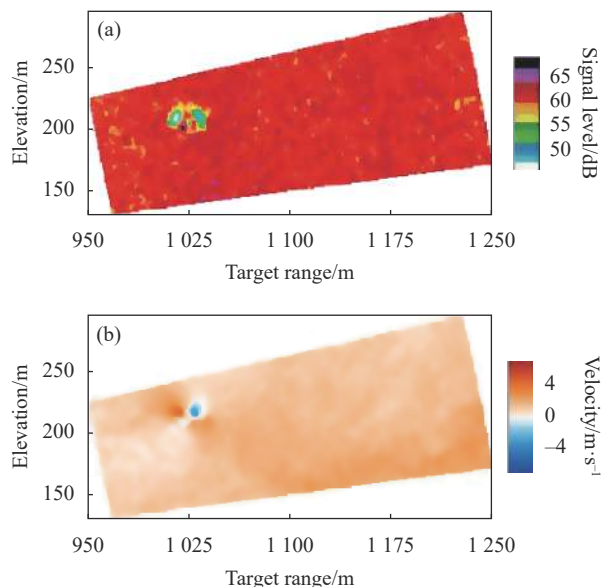


图 23 尾流探测实验结果

Fig.23 Wake detection experiment results

2010 年 8 月,美国国家大气研究中心 (NCAR) 的 SPULER 等人使用机载连续波相干多普勒测风激光雷达在 12 km 的高空中探测到了飞机前方的湍流^[101]。

2014 年,日本三菱公司利用波长为 1.53 μm 机载相干多普勒测风激光雷达实现了提前 30 s 在飞机前方发现晴空湍流^[102]。

2018 年, N. Smalikho 等人利用 Stream Line 激光雷达在托尔马切沃机场进行了试验,探测距离在 1 km 范围内,试验发现了在低平均侧风速度和中等风湍流的情况下,大型 MD-11 F 飞机着陆时产生的涡流的寿命可以达到 4 min^[103]。

综上所述,飞机尾流探测目前已有成熟设备,探测技术较为成熟,可以实现尾流的精确探测,且已经进行了较多的试验验证,具备工程化能力。

3 环境扰动目标探测存在的问题分析

3.1 大气扰动场目标探测存在的问题

目前,大气扰动场目标探测存在的主要问题为探测图像的退化问题,在探测空中动目标大气扰动场

时,由于光线在传播过程中穿过的大气距离很长,大气中气溶胶颗粒对光线的吸收和散射作用的影响,图像会出现质量退化的现象。

相机对大气扰动场成像时,大气环境中的气溶胶颗粒对相机成像质量产生主要影响,主要表现在对光线的吸收和散射作用。根据 Mie 散射理论,景物的成像机制可以用入射光衰减模型来描述,可表示为:

$$E = E_{\infty}(\lambda)\rho e^{-\beta(\lambda)l} \quad (1)$$

式中: E 为探测器接收到的光能量; $E_{\infty}(\lambda)$ 为天空亮度; ρ 为辐射度; $\beta(\lambda)$ 为大气消光系数,能见度越小,大气消光系数越大; l 为光线在气溶胶颗粒中的传播距离。由此可以看出,大气消光系数和光线在气溶胶颗粒中的传播距离直接影响相机探测器接收到的能量,且探测器接收到的能量随大气消光系数和光线在气溶胶颗粒中的传播距离的增大成指数级衰减。

当光线在气溶胶颗粒中的传播距离 l 越大时,对光线的吸收和散射作用越大,相机接收到的光能量越低,此时图像将存在对比度低,信噪比低,动态范围小等问题。

针对该问题,目前采用图像退化补偿技术来对退化后的图像进行补偿,主要分为图像增强与图像去雾两类。

图像增强是通过感兴趣的部分有针对性的技术处理,抑制“无用”信息、突出“有用”信息,从而提高图像对比度,增强图像的细节,从而进行退化补偿。主要有直方图均衡化、Retinex、同态滤波、小波变换、基于大气光调制传递函数的算法等四种算法,其中主要算法为直方图均衡化与 Retinex 算法。

图像复原通过图像退化先验知识,建立图像退化数学模型,从大气作用产生的结果出发沿着图像退化的逆过程,最终得到清晰的尽可能接近真实场景的图像。常用的图像复原算法有: Tan、Fattal、He、Tarel,其中 He 与 Tarel 算法是目前主要算法^[104-105]。

虽然,目前针对图像退化问题国内外学者已经进行了相关研究,但大气扰动场目标探测的探测距离需求一般为 100 km 以上。根据公式 (1),假设 $\beta(\lambda) = 0.05$,此时观测 10 km 目标与 100 km 目标探测器接收到的能量之差约为 90 倍,当 $\beta(\lambda) = 0.2$ 时,差距将达到 65000 多倍,在此种远距离探测需求下,目前国内外尚未有在这种距离条件下的图像退化补偿算法的研究,故图

像退化问题依然是现阶段大气扰动场目标探测技术存在的主要问题。

3.2 等离子鞘套目标探测存在的问题

根据相关研究表明,等离子鞘套会影响雷达回波的强度,主要影响因素为等离子体频率 ω_p 和等离子体碰撞频率 ν ,影响公式如下:

$$\alpha = \frac{8.68\omega}{\sqrt{2}c} \left[\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: α 为衰减常数; c 为光速; ω 为雷达辐射频率。

同时,根据仿真分析可知^[106-107]:

(1)当雷达工作频率大于等离子体频率时,等离子鞘套对雷达辐射电磁波的作用能力较弱,电磁波能够穿透等离子鞘套,仅产生轻微的反射和幅度衰减,在等离子体中的传播近似于自由空间传输,此时不能进行等离子鞘套的探测;

(2)当雷达辐射频率小于等离子体频率时,等离子鞘套表现出强烈的反射特性,对电磁波具有强烈的反射效应,此时可以进行等离子鞘套探测

(3)当雷达辐射频率等于等离子体频率时对雷达入射电磁波衰减达到最大;此时最不利于等离子鞘套的探测。

(4)在等离子鞘套复杂的流体特性下,理想情况下,等离子鞘套的 RCS 总体应呈现基本不变→减小→增大→减小→恢复的过程。

除此之外,根据代定冬^[106]等人相关研究结果表明,现阶段采用雷达探测等离子鞘套具有如下问题:

(1)雷达探测等离子鞘套总是会出现探测目标丢失的现象;

(2)应答式、信标式雷达探测等离子鞘套极易产生通信中断,反射式雷达探测等离子鞘套误差较大;

(3)等离子鞘套在雷达探测中表现为两个航迹接近,但散射特性差异明显的目标形态。

由上述研究结果可知,现阶段研究对等离子鞘套对电磁波传播影响机理的不够明晰,雷达探测等离子鞘套尚存在丢失目标,误差大以及虚警等问题,并不能实现长时间高精度的探测。

3.3 大气偏振模式目标探测存在的问题

虽然目前国内外学者对天空偏振模式的分布特

性、不同天气条件和影响因素下大气偏振模式的变化规律等方面进行了一系列研究,成果丰富。但是目前学者们对于天空偏振模式的研究大多数对于理论层面,主要进行仿真研究,实际大气环境影响因素众多,错综复杂,大气偏振模式会受到时间、地点、环境等诸多因素的影响,目前的研究并不足以构建一套完整的大气偏振模式的分布规律模型来支撑大气偏振模式目标探测技术的开展。

同时,目前国内外学者尚未开展空中动目标飞行对大气偏振模式的影响的相关研究,大气偏振模式目标探测现阶段仅存在原理可行性基础,尚无技术机理研究支撑^[108-112]。

3.4 尾流目标探测存在的问题

尾流目标探测存在的主要问题主要是尾流散射较弱,散射机理尚不完全清楚,现有雷达即使高灵敏度雷达也很难实现远距离探测。

在 NASA 进行的实验中,X 波段雷达实验没有取得预想的成功,高旁瓣杂波成为影响尾流检测性能的重要不利因素^[113],而且,实验还表明,晴空和潮湿大气中尾流在多个多普勒频率具有谱值,尾流是一种多普勒扩展目标。

为了满足实际应用需求,必须利用尾流特性增大尾流探测距离,这方面的理论研究成果较少。

根据相关研究表明,尾流探测技术已经趋于成熟,已进行多次飞机尾流探测试验,但基于目前的尾流探测试验结果显示,尾流的信号较弱,最高 SNR 也仅有约 10 dB,难以远距离尾流探测,目前公开的最远距离尾流探测试验距离仅为 15 km^[113],尚无远距离尾流探测试验报道,与实现空中动目标探测的探测距离需求(百公里级)具有较大差距^[48-114]。

4 环境扰动目标探测技术展望

基于上述环境扰动探测技术的研究现状以及目标探测可行性分析,对环境扰动目标探测技术的现阶段的应用前景进行展望:

(1)对于大气扰动场目标探测技术,远距离探测目标时图像退化问题将是大气扰动目标探测技术现阶段面临的主要问题,目前虽有相关图像退化补偿技术的研究,但远距离(百公里以上)条件下图像退化补偿技术将是大气扰动目标探测技术未来的研究方

向。利用图像复原技术,构建图像退化先验数学模型,通过先验模型对退化的图像进行补偿有望实现百公里以上的远距离大气扰动场目标探测;

(2) 对于等离子目标探测技术,由于等离子鞘套的高动态特性以及现阶段研究对等离子鞘套的特性研究不够明晰,目前雷达探测等离子鞘套存在丢失目标、探测精度低以及虚警等问题,未来仍需进行一段时间的等离子鞘套特性研究,同时对于雷达探测,可以对雷达波形、信息处理算法、多雷达协同体制设计等方面进行研究,有望实现等离子鞘套目标的高精度、长时间探测;

(3) 对于大气偏振模式探测技术,目前的研究主要针对特定条件下的大气偏振模式获取与特性分析,对于完整的大气偏振模式的分布规律研究不足,同时现阶段大气偏振模式的应用方向研究均面向偏振导航领域,在当今空中动目标探测需求如此强烈的情况下,利用大气偏振模式进行目标探测将会是一个具有较好发展潜力的领域,未来通过对全天空大气偏振模式分布特性以及空中动目标对大气偏振模式的影响研究,有望实现大气偏振模式目标探测;

(4) 对于尾流目标探测技术,由于尾流的强度较弱以及尾流的散射机理尚不完全清楚,现阶段探测手段难以实现远距离探测,不能满足空中动目标探测的距离需求,对于尾流的散射机理需要进行进一步研究,未来通过对尾流的多普勒频率特性的研究有望实现尾流的远距离高精度探测,同时,专门针对尾流探测的雷达及以信噪比增益算法等同样将会是未来的发展方向。

5 结论

文中首先介绍了基于环境扰动的空中动目标探测方法的原理,在此基础上对目标环境扰动及其探测方法以及研究进展进行了详细介绍。此外,对于环境扰动目标探测技术的发展现状进行了分析,主要对于国内外学者所做的探测试验进行了综述,分析现阶段环境扰动目标探测技术存在的问题,目前,大气扰动场目标探测技术百公里级远距离探测条件下图像退化补偿问题尚无相关研究;等离子鞘套目标探测技术等离子鞘套电磁波传输机理不明晰,探测存在目标丢失、精度低以及存在虚警等问题;大气偏振模式目标

探测技术缺少相关探测技术机理研究;尾流目标探测技术尾流散射机理尚不完全明晰,尾流信号较弱,现阶段不能实现远距离探测。这些都是基于环境扰动的空中动目标探测技术亟待解决的难题。

此外,根据国内外环境扰动目标探测技术的研究现状调研,发现大气扰动场目标探测技术现阶段技术成熟度较高,较为符合现阶段空中动目标探测技术发展需求,是现阶段发展潜力较好的技术领域。

参考文献:

- [1] Gan Jie, Zhang Jie. A study on situation and development of stealth target detection technology [J]. *Modern Radar*, 2016, 38(8): 13-16. (in Chinese)
- [2] Tang Hongchen, Xu Peng, Ruan Ningjuan, et al. Detection of hypersonic moving point target [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(6): 46-54. (in Chinese)
- [3] Heineck J T, Banks D, Schairer E T, et al. Background oriented schlieren (BOS) of a supersonic aircraft in flight[C]//AIAA Flight Testing Conference. Denver, 2016: 3356.
- [4] Yang Pengfei. Research on flow visualization based on BOS[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] Zhang Yue, Wang Xu, Su Yun, et al. High-precision atmospheric disturbance detection method for movie objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0228002. (in Chinese)
- [6] Zhang Yue, Su Yun, Gao Peng, et al. Visual monitoring method for atmospheric disturbance of moving objects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190535. (in Chinese)
- [7] Dalziel S B, Hughes G O, Sutherland B R. Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren' [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 28(4): 322-335.
- [8] Meier G. Computerized background-oriented schlieren [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(1): 181-187.
- [9] Raffel M, Richard H, Meier G E A. On the applicability of background oriented optical tomography for large scale aerodynamic investigations [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 28(5): 477-481.
- [10] Erik G, Jörg S. The background oriented schlieren technique: Sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field [J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 43(2-3): 241-249.
- [11] Michael J, Gary S. Natural-background-oriented schlieren

- imaging [J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 48(1): 59-68.
- [12] Santos L, Stryczniewicz W. Application of background oriented schlieren for quantitative measurement of transonic flows [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1101(1): 1663-1668.
- [13] Gupta R, Das C, Datta A, et al. Background Oriented Schlieren (BOS) imaging of condensation from humid air on wettability-engineered surfaces [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 109: 961-964.
- [14] Ramaiah J, Ajithprasad S, Rajshekhhar G, et al. Fast and robust method for flow analysis using GPU assisted diffractive optical element based background oriented schlieren (BOS) [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 684-686.
- [15] Amjad S, Karami S, Soria J, et al. Assessment of three-dimensional density measurements from tomographic background-oriented schlieren (BOS) [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(11): 114002.
- [16] Song Lihao. Research on hypersonic vehicle-borne radar target detection under plasma sheath[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [17] Luo Qi. Study on stealth characteristics of plasma sheath[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [18] Hayami R A. The application of instrumented light gas gun facilities for hypervelocity aerophysics research[C]//17th Aerospace Ground Testing Conference, 1992: 3998.
- [19] Ling Yongsun. Plasma stealth technology and the possibility of applying it to aeroplane [J]. *Journal of Airforce Engineering University*, 2000, 1(2): 1-3. (in Chinese)
- [20] Koretzky E, Kuo S P. Characterization of an atmospheric pressure plasma generated by a plasma torch array [J]. *Physics of Plasma*, 1998, 5(10): 3774.
- [21] Kuo S P, Koretzky E, Vidmar R J. Temperature measurement of an atmospheric-pressure plasma torch [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(7): 3032.
- [22] Weston V H. Oblique incident of an electromagnetic wave on plasma half-space [J]. *Physics of Fluids*, 1967, 10: 632-640.
- [23] Wait J R. Oblique reflection of a plane impulsive electromagnetic wave from a plasma half-space [J]. *Physics of Fluids*, 1969, 12: 1521-1522.
- [24] Harrison C. On the bistatic scattering cross section of a reentry capsule with ionized wake [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1969, 17: 374-376.
- [25] Sotnikov V I, Leboeuf J N, Mudaliar S. Scattering of electromagnetic waves in the presence of wave turbulence excited by a flow with velocity shear [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38: 2208-2218.
- [26] Karin S, Denis B, Werner W. Extraction of virtual scattering centers of vehicles by ray-tracing simulations [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56: 3543-3551.
- [27] Michael W, Dmitriy S, Uwe-Carsten F. Delay-dependent doppler probability density functions for vehicle-to-vehicle scatter channels [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2014, 62: 2238-2249.
- [28] Bhaskar C, Shashank C. Three-dimensional computation of reduction in radar cross section using plasma shielding [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33: 2027-2034.
- [29] Rahman M T, Dewan M N, Ahmed A, et al. A time-dependent collisional sheath model for dual-frequency capacitively coupled RF Plasma [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41: 17-23.
- [30] Kim H C, Lee J K, Shon J W. Analytic model for a dual frequency capacitive discharge [J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(11): 4545-4551.
- [31] Hass F A. A simple model of an asymmetric capacitive plasma with dual frequency [J]. *Applied Physics Letter*, 2004, 37: 3117-3120.
- [32] Lee J K, Babaeva N Y, Kim H C, et al. Simulation of capacitively coupled single-and dual-frequency RF discharges [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32: 47-53.
- [33] Georgieva V, Bogaerts A, Gijbels R. Numerical investigation of ion-energy-distribution functions in single and dual frequency capacitively coupled plasma reactors [J]. *Physics of Review E*, 2004, 69: 026406.
- [34] Kim H C, Lee J K. Dual-frequency capacitive discharges: Effect of low-frequency current on electron distribution function [J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(5): 053501.
- [35] Sun Shaobo. Research on modeling and acquisition of skylight polarization patterns in real scene[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [36] Wu Chuan. Research on navigate and location method base on atmospheric polarization mode[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [37] Chandrasekhar S. Radiative Transfer[M]. US: Dover Publications, 1960.
- [38] Sekera Z. Recent Developments in the Study of the Polarization of Sky Light[M]. Netherlands: Netherlands Advances in Geophysics, 1956.
- [39] Plass G N, Kattawar G W, Catchings F E. Matrix operator

- theory of radiative transfer. 1: Rayleigh scattering [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(2): 314-329.
- [40] Gao Jun, Fan Zhiguo. Bionic Polarized Light Navigation Method [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [41] Liang H, Bai H, Liu N, et al. Polarization navigation simulation system and skylight compass method design based upon moment of inertia [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-14.
- [42] Li J, Chu J, Zhang R, et al. A bio-inspired attitude measurement method using polarization skylight and gravitational field [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(9): 2955-2962.
- [43] Julien D, Stéphane V, Julien R S. Polarized skylight-based heading measurements: a bio-inspired approach [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2019, 16(150): 1-13.
- [44] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, et al. Atmospheric polarization pattern simulation for small solar elevation angles and the analysis of atmospheric effect [J]. *Acta Phys Sin*, 2016, 65(1): 014203. (in Chinese)
- [45] Liu Jing, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. A new algorithm for polarization information restoration with considering the γ property of optoelectronic polarimeter [J]. *Acta Phys Sin*, 2016, 65(9): 094201. (in Chinese)
- [46] Wang Chenguang, Zhang Nan, Li Dalin, et al. Calculation of heading angle using all-sky atmosphere polarization [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(12): 60-66. (in Chinese)
- [47] Chen Yue. Design and implementation of shortwave infrared polarization detection system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [48] Liu Junkai. Radar detection and tracking technology of the aircraft wake vortices[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [49] Shen Chun, Gao Hang, Wang Xuesong, et al. Aircraft wake vortex parameter-retrieval system based on lidar [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(6): 1032-1044. (in Chinese)
- [50] Sarpkaya T. New model for vortex decay in the atmosphere [J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 37(1): 53-61.
- [51] Devisscher I, Lonfils T, Winkelmanns G. Fast-time modeling of ground effects on wake vortex transport and decay [J]. *Journal of Aircraft*, 2013, 50(5): 1514-1525.
- [52] Holzäring F, Aircraft P O. Probabilistic two-phase wake vortex decay and transport model [J]. *Journal of Aircraft*, 2003, 40(2): 323-331.
- [53] Holzäpfel F. Probabilistic two-phase aircraft wake-vortex model: Further development and assessment [J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(3): 700-708.
- [54] Stephan A, Holzäpfel F, Misaka T. Aircraft wake-vortex decay in ground proximity physical mechanisms and artificial enhancement [J]. *Journal of Aircraft*, 2013, 50(4): 1250-1260.
- [55] Holzäpfel F, Tchipev N, Stephan A, et al. Wind impact on single vortices and counterrotating vortex pairs in ground proximity [J]. *Flow Turbulence & Combustion*, 2016, 97(3): 829-848.
- [56] Holzäpfel F, Stephan A, Heel T, et al. Enhanced wake vortex decay in ground proximity triggered by plate lines [J]. *Easn Workshop*, 2016, 88(2): 206-214.
- [57] Hennemann I, Holzäpfel F. Large-eddy simulation of aircraft wake vortex deformation and topology [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 225(12): 1336-1350.
- [58] Sarpkaya T. Decay of wake vortices of large aircraft [J]. *AIAA Journal*, 1998, 36(9): 1671-1679.
- [59] Koerner S, Holzäpfel F. Multi-model ensemble wake vortex prediction [J]. *Aircraft Engineering*, 2016, 88(2): 331-340.
- [60] Tao Wei. The research of positioning system for underwater magnetic target based on array of magnetometer[D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [61] Sun Hexuan. Research on underwater target positioning based on magnetic anomaly detection[D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [62] Zhao Guanyi. Research on interference mitigation and target detection of airborne magnetic anomaly detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [63] Liu Shanghe, Xie Xining, Hu Xiaofeng. Research progresses on electrostatic electrification and discharge of aircraft [J]. *Safety & EMC*, 2021(5): 12-22. (in Chinese)
- [64] Li Weixin, Wei Weiwei, Tu Jian, et al. Method of target orientation detection based on electronic filed vector [J]. *Guidance & Fuze*, 2021, 42(1): 20-24. (in Chinese)
- [65] Hao Huihui. Research on passive electrostatic detection method in fuze application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [66] Xing Zheng, Wei Ming, Liu Weidong. Current status and prospects of research on electrostatic detection technology [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2017(7): 74-76. (in Chinese)
- [67] Luo Lunkai. Technology research of acoustic detection of low flying targets in the sky[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [68] Wu Hong. Research on voice recognition technology of aerial target[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)

- [69] Smith N T, Heineck J T, Schairer E T. Optical flow for flight and wind tunnel background oriented schlieren imaging[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017: 0472.
- [70] Hill M A, Haering E, Cliatt L. Flow visualization of aircraft in flight by means of background oriented schlieren using celestial objects. [EB/OL].[2017-6-14]. https://www.researchgate.net/publication/318143998_Flow_visualization_of_aircraft_in_flight_by_means_of_Background_Oriented_Schlieren_using_Celestial_Objects
- [71] Heineck J T, Banks D W, Smith N T, et al. Background-oriented schlieren imaging of supersonic aircraft in flight [J]. *AIAA Journal*, 2021, 59(1): 11-21.
- [72] Hill M A, Haering E A. Flow visualization of aircraft in flight by means of background oriented schlieren using celestial objects[C]//AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Denver, 2017: 3553.
- [73] Joseph T. NASA captured two jets' supersonic shockwaves merging by applying new tech to an old idea[EB/OL]. [2019-3-6]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/26822/nasa-captured-two-jets-supersonic-shockwaves-merging-by-applying-new-tech-to-an-old-idea>
- [74] Chen Haoran, Yang Yuhao, Liu Wei, et al. Analysis of radar detection problems for near space hyper aircraft [J]. *Modern Radar*, 2018, 40(8): 8-11. (in Chinese)
- [75] Li J T, Guo L X. Research on electromagnetic scattering characteristics of reentry vehicles and blackout forecast model [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2012, 26(13): 1767-1778.
- [76] He G L, Zhan Y F, Ge N, et al. Measuring the time-varying channel characteristics of the plasma sheath from the reflected signal [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(12): 3975-3981.
- [77] Zhang J, Liu Y, Li X. The study of spatial dispersion effect on electromagnetic waves propagation in the warm non-uniform re-entry plasma sheath [J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(2): 022104.
- [78] Basnet S, Patel A, Khanal R. Electronegative magnetized plasma sheath properties in the presence of non-Maxwellian electrons with a homogeneous ion source [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, 62(11): 115011.
- [79] Tian D Y, Fan G C, Chen W F. Numerical investigation of dynamic properties of plasma sheath with pitching motion [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2020, 21(3): 209-217.
- [80] Liu W, Zhu J, Cui C, et al. The influence of plasma induced by α -particles on the radar echoes [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(1): 405-413.
- [81] Ding Y, Bai B, Gao H, et al. An analysis of radar detection on a plasma sheath covered reentry target [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(6): 4255-4268.
- [82] Bian Z, Li J, Guo L. Simulation and feature extraction of the dynamic electromagnetic scattering of a hypersonic vehicle covered with plasma sheath [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2740.
- [83] Musselman R, Chastain S. Beyond LOS detection of hypersonic vehicles [J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2021, 35(11): 1364-1365.
- [84] Liu H Y, Chao Y. The RCS of the 3-D conductor sphere calculated in THz band and the homogeneous magnetized dense plasma sheath-Science Direct [J]. *Optik*, 2020, 208: 164525.
- [85] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1991, 46(5): 413-423.
- [86] Spurr R D. Vlidor: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 102(2): 316-342.
- [87] Thilak V, Voelz D G, Creusere C D. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7527-7536.
- [88] Mayer B. Radiative transfer in the cloudy atmosphere[C]//EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2009, 1: 75-99.
- [89] Schepers D, dBJMJ Aan, Hahne P, et al. Lintran v2.0: A linearised vector radiative transfer model for efficient simulation of satellite-born nadir-viewing reflection measurements of cloudy atmospheres [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2014, 149: 347-359.
- [90] Shaw J A, Pust N J, Dahlberg A R. Continuous outdoor operation of an all-sky polarization imager[C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7672: 76720.
- [91] Pust N J, Shaw J A. Wavelength dependence of the degree of polarization in cloud-free skies: simulations of real environments [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15559-15568.
- [92] Aycock T, Lompado A, Wolz T, et al. Passive optical sensing of atmospheric polarization for GPS denied operations[C]//Sensors and Systems for Space Applications IX. International

- Society for Optics and Photonics, 2016, 9838: 98380 Y.
- [93] Emde C, Buras-Schnell R, Sterzik M, et al. Influence of aerosols, clouds, and sunglint on polarization spectra of Earthshine [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 605: A2.
- [94] Shaw J A, Eshelman L. Fisheye imaging of sky polarization at the August 2017 solar eclipse[C]//Imaging Systems and Applications, 2020.
- [95] Snik F, Bos S P, Brackenhoff S A, et al. Detection of polarization neutral points in observations of the combined corona and sky during the 21 August 2017 total solar eclipse [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(21): F71-F77.
- [96] Schmolke A, Mallot H A. Polarization compass for robot navigation [C]//Proceedings of Fifth German Workshop on Artificial Life. Lubeck: IOS Press, 2002: 163-167.
- [97] Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and orientation sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(2): 289-297.
- [98] Barbaresco F, Jeantet A, Meier U. Wake vortex detection & monitoring by X-band Doppler radar: Paris Orly radar campaign[C]//2007 1st International Conference on Radar Systems, 2007: 83.
- [99] Qu Hailong. Study on the radar scattering characteristics of aircraft wake vortex in clear air and moist air[D].Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [100] Seliga T A, Mead J B. Meter-scale observations of aircraft wake vortices in precipitation using a high resolution solid-state W-band Radar[C]//34th Conference on Radar Meteorology, 2009.
- [101] Spuler S M, Richter D, Spowart M P, et al. Optical fiber-based laser remote sensor for airborne measurement of wind velocity and turbulence [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(6): 842-851.
- [102] Inokuchi H, Furuta M, Inagaki T. High altitude turbulence detection using an airborne Doppler lidar[C]//Proceeding of 29 th Congress of the International Council of the Aeronatical Sciences, 2014.
- [103] Smalikho I N, Banakh V A, Falits A V, et al. Experimental study of aircraft wake vortices on the airfield of tolmachevo airport in 2018 [J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, 33(2): 124-133.
- [104] Guan Qiuqi. Research on the algorithm of oblique aerial camera image defogging[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [105] Cheng Jintao. The Analysis of atmosphere scattering to oblique imaging of aerial camera and research of enhancement methods of image quality[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [106] Dai Dingdong. Analysis and countermeasures of radar detection problems of hyperspace vehicles under plasma sheath[C]//Chinese Institute of Command and Control, 2021: 7. (in Chinese)
- [107] Zhou Yong, Pan Yurong, Li Chunjian. Propagation attenuation of electromagnetic waves in plasma [J]. *Modern Radar*, 2019, 41(2): 1-6. (in Chinese)
- [108] Yan Zhaoai, Hu Xiong, Guo Wenjie, et al. Near space Doppler lidar techniques and applications (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210100. (in Chinese)
- [109] Fan Z, Chen M, Wang B, et al. Three-dimensional attituded information obtained by the skylight polarization pattern [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1248-1256. (in Chinese)
- [110] Fan Chen, Hu Xiaoping, He Xiaofeng, et al. Influence of skylight polarization pattern on bianic polarized orientation and corresponding experiment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2429-2437. (in Chinese)
- [111] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)
- [112] Chen Jie, Tong Yicheng, Xiao Da, et al. Retrieval methods for extinction-to-backscatter ratio of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1305-1316. (in Chinese)
- [113] Mackenzie A I. Measured changes in c-band radar reflectivity of clear air caused by aircraft wake vortices[R]. NASA Technical Paper 3671, 1997. (in Chinese)
- [114] Niu Fengliang. Study on the radar characteristics of aircraft wake vortices in rainy weather[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)