 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i7.6692

Development of unmanned aerial spectrum imaging and radar imaging technology

Feng Wang[1,2]

1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui, 230088, China
2. Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei, Anhui, 230088, China

Abstract

As a primary reconnaissance and combat platform in future development, the advancement of payload technologies will directly impact the operational effectiveness of unmanned aerial vehicles (UAVs). This paper focuses on reconnaissance payloads, detailing the evolution of spectral imaging and radar imaging technologies for UAVs. It outlines the working principles of these two imaging techniques, analyzes their respective advantages, and ultimately provides an outlook on future trends in UAV and payload development. With technological progress and the demands of information warfare, UAVs are playing an increasingly vital role in modern conflicts due to their unique capabilities. Current combat missions have expanded from traditional intelligence gathering and battlefield surveillance to target localization, air defense suppression, precision strike against ground targets, and intercepting cruise missiles. The integrated reconnaissance-and-attack capability of UAVs better adapts to the increasingly complex battlefield environments.

Keywords

UAV; Spectral imaging; Synthetic aperture radar; multi-source information fusion

无人机载光谱成像与雷达成像技术的发展

王凤 [1,2]

1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所，中国 · 安徽 合肥 230088
2. 孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室，中国 · 安徽 合肥 230088

摘　要

无人机作为未来发展中主要的侦查和作战平台，载荷技术的发展将直接影响无人机的作战效能。本文针对无人机的侦查类载荷，阐述了无人机载光谱成像技术和雷达成像技术的发展，并简述了两类成像技术的工作原理，分析了各自的优势，最后对无人机及其载荷的未来发展趋势进行了展望，随着科学技术的发展和信息化战争的需求，无人机因其独特的优势，在现代战争中发挥着越来越重要的作用，目前无人机的作战任务已由传统的情报侦察、战场监视向目标定位、防空压制、对地精确攻击和拦截巡航导弹等领域发展，无人机的侦察打击一体化能够更加适应日趋复杂的战场环境。

关键词

无人机；光谱成像；合成孔径雷达；多源信息融合

1 引言

无人机察打一体的作战前提是无人机的侦察预警、跟踪和识别等任务的实现，相应地，无人机的任务载荷主要为光电和雷达等侦查类载荷，它们作为无人机上的重要传感设备，一直是国内外无人机领域研究的重点方向 [1-5]。光电类载荷由于只能测量目标相对于载荷的角度，无法进行距离的测量，故往往与激光雷达结合进行目标的跟踪，光电类载荷已经从普通的光学相机、红外相机向多光谱相机、高光谱相机和超光谱相机发展，光谱覆盖范围越来越广，分辨能力越来越强；而雷达类载荷相比于光电类载荷，可以测向测距，实现对目标的跟踪，同时它的波段往往比光学波段大得多，所以穿透能力更强，探测距离更远，且能够全天时、全天候工作，目前机载雷达主要是合成孔径雷达，它的成像分辨率高，但是成像效果对目标的姿态敏感。可见，在目标识别方面，光电类载荷与雷达类载荷各有优劣，可以根据不同的任务实现光电和雷达的综合识别，通过融合互证，提高目标识别的准确率和资源的有效利用率。故本文将着重论述无人机载光谱成像与雷达成像技术，并对侦查任务载荷的发展趋势进行展望，为无人机的智能化发展提供一定的指导和借鉴意义。

【作者简介】王凤（1991–），女，中国吉林公主岭人，博士，工程师，从事目标识别研究。

2 无人机载光谱成像技术

可见光成像因为常常会受到环境的影响，不能实现全天候工作，具有一定的局限性。同时，当被测目标存在伪装或者遮挡物时，系统的识别能力会受到明显影响。而红外光因为波长较长，具有更强的穿透性，即使目标上存在涂层、迷彩色甚至遮盖物，仍能获取被测目标的红外辐射图像，与背景区分开来从而进行有效识别。尽管如此，单纯的光学成像主要是空间维成像，获取被测区域的二维图像，目标的信息量较少。而光谱成像则在原有的空间成像的基础上增加了光谱信息，如图 1 所示，获得二维图像中对应每个像素位置上的光谱分布，从而构成三维数据立方体，相比于传统的单一宽波段光电成像技术，大大丰富了目标场景信息，进行极大提高了对伪装目标的探测识别能力 [6-7]。

目前，多光谱成像技术主要是基于色散分光原理，根据分光策略的不同，可分为光路分光式分光和滤光片式分光两种 [8]。其中，光路分光通过用棱镜或光栅将目标的不同波长的光分散开，再通过会聚系统将目标不同波长的光聚焦在图像传感器的不同位置。棱镜是利用不同波长的光在介质中折射率不同从而投影到不同位置的传感器上进行分光，而光栅是利用光经过大量等间隔的狭缝产生衍射和干涉的原理进行分光 , 相比于棱镜来说，它的色散率高且色散均匀性较好，是目前成像光谱仪中最为广泛采用的一种分光元件，但是它的加工工艺比较复杂，且能量利用率低。而滤光片式光谱仪一般采用线性渐变滤光片进行分光，滤光片紧贴图像传感器，对应传感器的某一行像元，故每个像元接收到的光谱波长与相应位置上滤光片的透过波长一致，通过一定的扫描方式可以获得完整的目标光谱图像 [9]，滤光片式成像光谱仪具有结构简单、系统紧凑的优势，为目前无人机载普遍采用的多光谱相机样式。

随着战场欺骗手段的多样化，虚假伪装目标的层出不穷，目标精准探测识别的需求日益迫切，高 / 超光谱成像技术由于光谱分辨率更高，对目标的识别更为精细，逐步发展起来。高光谱成像技术根据原理不同，可分为色散型和干涉型，色散型以基于液晶可调谐滤光片的光谱成像技术为主，该技术利用液晶电控双折射效应实现光谱连续可调，本质上是一种带通可调双折射滤光片，相比于传统的滤光片式光谱仪具有更高的光谱分辨率和能量利用率，实现了从多光谱调制到高 / 超光谱调制的跨越 [10-11]，干涉型光谱成像技术是利用干涉信息与光谱信息之间的傅里叶变换关系，对得到的干涉信息进行光谱复原来获取目标的光谱信息，虽然能量利用率和光谱分辨率很高，但是系统光路结构复杂、体积和重量较大，且信噪比易受环境影响、对平台稳定性要求高，故目前多是用在稳定的星载平台上。另外，对于光谱成像技术来说，为了保证光谱信息的可用性和准确度，必须进行光谱定标 [12]。

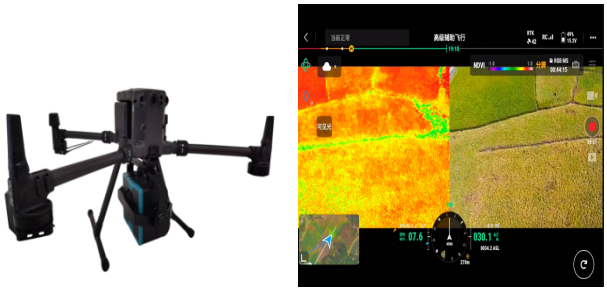


图 1 无人机及其光电成像载荷和光谱图像

3 无人机载雷达成像技术

如前所述，雷达成像技术的主要特点是探测距离较远，具有全天时、全天候的侦察能力，可以弥补光电载荷设备的不足，目前无人机使用的雷达主要是合成孔径雷达（SAR），如图 2 所示，它以脉冲压缩技术获得距离向高分辨率，再根据合成孔径原理获得方位向高分辨率，进而获得目标的二维 SAR 图像，与光学成像技术不同，SAR 成像结果与目标相对雷达的姿态有关，并且它的理论方位分辨率是常数，与波长、载机飞行高度和雷达作用距离无关 [13]。

近年来，随着无人机雷达成像应用领域的不断扩展 , 常规的 SAR 成像技术已经无法满足需求，它的功能模式已经逐步从条带成像、聚束成像扩展到多极化成像、干涉三维成像等新型工作模式。其中，多极化 SAR 成像技术在获取目标二维 SAR 图像的同时，获取目标的极化散射矩阵，根据目标的极化散射特性，反演目标的特征，进行高分辨率的探测与识别，而干涉三维成像技术则是在常规的 SAR 成像基础上，在高度向利用切航迹的长阵列获得高分辨率，进而获得距离向、方位向和高度向三个维度的高分辨率图像，尤其在城市、山区等地势起伏区域，它可以克服传统 SAR 成像时的阴影效应，获取对地观测的三维高分辨率图像 [14-15]。

无人机载雷达成像技术与光学成像技术一样，都是朝着横向信息维度扩展和纵向成像分辨率提高两个方向发展。当 SAR 系统的成像分辨率达到 0.3m 或以下时，可以获得和光学成像接近的效果，可见，高分辨率和多维度意味着能够获取更丰富的目标信息，有助于目标的精细化识别和伪装鉴别。



图 2 无人机雷达载荷 SAR 图像

4 发展趋势

在陆海空天电网一体化的立体战争中，无人机作为可逼近作战前线或深入敌方进行侦察的有效平台，在智能化、微型化和集群化方向飞速发展[16]，面对日益多样化的任务，单一类型的载荷传感器已经无法满足需求，鉴于机载光谱成像技术与雷达成像技术在侦查识别领域各有优势，越来越多的国内外学者相继开展多传感器融合方面的研究工

作[17-19]，采用的融合理论方法一般有两种，一种是基于概率论的贝叶斯方法，另一种是基于置信理论的 DS 证据理论方法，前者由于对先验信息依赖较为严重，故较少在工程实现上应用。而为了适应不同的使用需求，更是演化出了很多改进的 DS 证据理论方法[20-21]，为实现目标多源信息融合判决，需要对目标信息进行配准关联，利用配准的数学模型将多传感器获取的信息统一到同一时间基准和同一空间坐标系下，进而通过信息互补、融合互证实现对目标的精准识别和对环境的综合感知，同时为无人机的协同组网与智能化发展奠定基础。

参考文献

[1] 周峰,刘建辉,郭俊等.国外机载红外预警系统发展动态分析,激光与红外,47(4),2017.4

[2] 符成山,吴惟诚,雷东.美军无人机装备现状及发展趋势,飞航导弹，2019.

[3] 张凤晶,范秀英,吴迪.无人机光电侦察任务载荷研究, 2016（第六届）中国国际无人驾驶航空器系统大会.

[4] 刘亮,吉波.无人机载雷达现状及发展趋势,现代导航,2014.6

[5] 冯姗,曾祥忠.四通道可见光光谱相机的设计,应用光学,40(3),2019.5

[6] 李江南,无人机载多光谱相机设计, 舰船电子工程,33(4),2013

[7] 成刚,方帆,宁飞等.无人机载多光谱侦察效能研究,应用光学，38（5）2017.9

[8] 曹丛峰,基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机系统研究,硕士论文，2017.6

[9] 李文杰,王成良等,基于线性渐变滤光片的成像光谱仪综述,红外,36(3),2015.1

[10] 汪伟，沈志学.LCTF机载高光谱相机光学系统设计,光子学报，44（7）2015.7

[11] 王海峰.中小型无人机载光谱成像系统研究,工程物理研究院科技年报，2016.12

[12] 林军,邵俊,宋超等.干涉型光谱仪高精度光谱定标方法,光谱学与光谱分析. 35（12）2015.12

[13] 王岩飞,刘畅,詹学丽.无人机载合成孔径雷达系统技术与应用，雷达学报，5（4）2016.8

[14] Klare J, Weiss M, Brenner A, et al..ARTINO: “A new high resolution 3D imagingradar system on an autonomous airborne platform”. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Denver, 3842–3845, 2006.

[15] 曲长文,周强,王颖.无人机载合成孔径雷达遥测技术, 舰船电子工程,1(29),2009

[16] 袁成，宋刚，许佳，张健.2019年国外先进军用无人机研究进展.飞航导弹，2020.

[17] 李捷.面向目标识别的机载多传感器数据融合技术研究[D].2018.

[18] 刘怀国,吴陈,张冰.D-S证据理论在多传感器融合中的应用[J].华东船舶工业学院学报. 2001 (03)

[19] 谢德胜,徐友春,陆峰,潘世举.基于多传感器信息融合的3维目标实时检测[J].汽车工程, 2022(03)

[20] 赵秋月,左万利,田中生,王英.一种基于改进D-S证据理论的信任关系强度评估方法研究[J].计算机学报, 2014(04)

[21] 周恩帆,马俊,周永杰,王欠欠,陈博行.一种D-S证据理论的多传感器数据融合算法[J].小型微型计算机系统, 2022(04)