

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.12

地面目标多谱测试及隐身效能评估现状与展望

陈知华, 张天才, 邓贤明, 黄翔, 吴非

(西南工程技术研究所, 重庆 400039)

摘要: 随着隐身技术的应用以及多模探测技术的发展, 单一频段的光电对抗已经不能满足日益复杂的现代战争需求, 隐身、探测、识别与跟踪等技术都必须基于多谱测试技术的发展。本文以地面武器装备的威胁分析入手, 以应用最为广泛的雷达、红外目标特性测试为例分析了多谱测试及后期数据融合处理技术的发展现状, 并提出了发展建议。

关键词: 多谱测试; 雷达; 红外; 效能评估; 地面目标

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0093-07

Development and Prospect of Ground Target and Stealth Effectiveness Assessment

CHEN Zhihua, ZHANG Tiancai, DENG Xianming, HUANG Xiang, WU Fei

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: With the application of stealth technology and the development of multimode detection technology, the photoelectric countermeasure in a single frequency band cannot meet the increasingly complicated demand of modern warfare. The techniques of stealth, detection, identification and tracking must be based on the development of multispectral testing technology. Based on the threat analysis of ground weaponry, this paper analyzes the current situation of multispectral testing and data fusion processing technology by taking the most widely used radar and infrared target characteristics test as examples, and proposes some suggestions for development.

Key words: multispectral testing; radar; infrared; effectiveness evaluation; ground target

0 引言

随着武器装备向信息化、智能化和精确化方向发展, 军事技术能力越来越依赖于各种战场信息的获取和利用, 信息优势成为决定战争胜负的重要因素之一^[1]。复杂地面目标与环境特性是军事信息最重要、最基本的资源, 它贯穿于武器装备系统作战从预警、探测、跟踪、识别、制导, 到拦截、引爆的全过程, 对发展军事攻防体系的探测与反探测、突防与反突防、隐身与反隐身、伪装与反伪装、识别与反识别以及仿真、引信等技术起到支撑作用。因此, 武器装备目标与环境特性的高水平、高精度、宽频谱获取与分析能力, 是信息化武器装备得以生存和发挥效能的前提。

目标和环境特性的研究成果在武器装备的发展中已取得了广泛的应用, 对提高各种武器系统的战术技术性能发挥了重要的作用。例如提高进攻武器对敌防御系统的突防、反识别和精确打击的能力; 改善防御性武器对来袭目标的探测、跟踪、识别和拦截的性能; 抑制环境杂波干扰、提供目标易损部位特征, 提高精确制导的进度和目标毁伤效果; 掌握目标电磁散射机

理、实施目标特征控制技术, 实现隐身反隐身; 利用高逼真度的目标和环境特征模型, 进行高水平仿真; 建立多目标特征数据库, 完成增加目标的识别; 复现目标特征, 研制靶标等^[2]。

获取目标特性数据最科学、合理与可信的手段就是测试, 开展目标及环境不同频段、极化、方位数据的精确测试与多谱数据融合增强、武器装备隐身性能评估, 以更好地应对“空天地”立体型探测威胁, 对于武器装备的战场突防与防御能力意义深远^[3]。

1 地面武器装备威胁分析

在现代战场上, 精确打击系统、先进侦察系统与侦察打击一体化系统, 随着探测、识别、控制等技术的不断进步得以蓬勃发展, 对地面武器装备构成了不可忽视的威胁。这种威胁具有全方位、大纵深、全天候、多层次等显著特点。从战略层次讲, 拥有先进侦察技术的一方往往能够更为清晰地了解战场态势变化(如掌握对方兵力调动、部署情况等), 即拥有更良好的“战场单向透明度”, 这为准确把握战机, 取敌制胜

创造了条件。从战术层次来说,在先进侦察、探测系统引导下,精确打击系统能够有效摧毁锁定的目标,充分发挥其作战效能。因此,在高技术战争中,先进的侦察系统和精确打击系统构成了地面武器装备的主要战场威胁环境。

1.1 先进侦察系统

各种高新技术的广泛应用,使得现代军事侦察技

术种类繁多。从侦察平台分类主要包括以各种军用侦察卫星、海洋监视卫星(两栖装备侦察)为代表的天基侦察平台(见表1);以无人机、有人机、预警机、直升机、飞艇等侦察平台和搭载于平台上的各种侦察设备,例如雷达、电探测器材等为代表的空基侦察设备(见表2);由地面传感系统、地面无人侦察车、装甲侦察车等构成的陆基侦察装备(见表3)。

表1 美国电子侦察卫星类型运行轨道

运行轨道	第1代 (1960~1970年)	第2代 (1970~1980年)	第3代 (1980~1990年)	第4代 (1990~2000年)	第5代 (21世纪初)
地球静止轨道	低轨卫星	峡谷	小屋,漩涡	水星	入侵者
地球静止轨道	低轨卫星	流纹岩	大酒瓶,猎户座	顾问	入侵者
椭圆轨道	低轨卫星	折叠椅	军号	—	入侵者
极地轨道	—	—	—	雪貂	—

表2 空基侦察主要装备

平台类型	设备类型	典型代表	侦察设备
有人驾驶侦察机	战略侦察机	U-2, SR-71, E-8C	可见光相机、 电视摄像机、 电子相机、 红外行扫描、 红外前视系统、 机载侦察雷达等
	战术侦察机	俄“苏-24MP”、美TR-4A	
	战略战术两用机	RC-135	
无人侦察机	长程无人侦察机	以色列“搜索者”、美国“捕食者”	可见光相机、 电视摄像机、 电子相机、 红外行扫描、 红外前视系统、 机载侦察雷达等
	中程无人侦察机	美国的350型无人机	
	短程无人侦察机	美国与以色列联合研制的新一代“猎犬”、以色列的“先锋”	
	近程无人侦察机	以色列的“微V型”无人机	
侦察直升机	—	美国的OH-58D侦察直升机和OH-6A轻型战场观察直升机、 法、德联合研制的“小羚羊”侦察型直升机	

表3 陆基侦察装备

载体	设备类型	举例	典型装备	备注
装甲侦察车	—	美国的M3“骑兵”侦察车、英国的“弯刀”和“佩刀”侦察车、法国的AMX-10RC(6×6)侦察车、德国的“山猫”(8×8)侦察车、俄罗斯“БМР”“山猫”侦察车	战场监视雷达热像 观察装置激光测距 仪地面导航系统	—
战场雷达	侦察雷达	美国的AN-PPS-5雷达、AN-TPS-5XX雷达;英国的“姆斯塔”和ZB298战场监视雷达;法国的RB12A战场监视雷达	—	厘米波,分远程、 中程、近程
	侧视雷达	—	合成孔径技术	—
地面传感 侦察系统	炮位侦察 雷达	美国80年代初装备的AN-TPQ-36和 AN-TPQ-37炮位侦察雷达	电扫描的 相控阵体制	作用距离可达 30 km、扇扫范围90°
	—	美国80年代装备的“伦巴斯”系统	传感器、中继器 和监视器	探测范围几米 到几百米
无人地面 侦察车	—	美“萨格”(Sarge)监视、侦察地面设备	彩色和增强型 黑白摄像机	遥控距离达4 km

1.2 精确打击系统

精确打击技术是各种高新控制技术和弹药技术相结合的产物。地面武器装备面临的精确打击火力基本可以分为两类：一类是精确制导导弹；另一类是所谓“末敏弹”。前者的发展集中体现在导弹导引体制的变化上，目前发展较为成熟的制导技术包括微波制导、

毫米波制导、光纤制导、激光制导、红外制导等，国外研制的几种新型反坦克导弹如表4所示。后者专门用于攻击集群坦克中的顶部装甲，是一种以多对多的反集群装甲和火炮的有效武器，世界上比较成熟和比较典型的末敏弹如表5所示。

表4 国外最新研制的几种反坦克导弹

名称	国别	工作波段	发射平台	射程/m
WASP	美国	94 GHz	机载	—
AGM-65H	美国	末段8 mm波	机载	—
Hellfire-2	美国	激光1.06 μm和红外制导	直升机或地面车辆	8000
TOW	美国	红外与毫米波复合制导	车载	65~3750
HOT	欧盟	1, 10 μm双色红外	地面、车载或直升机	75~4000
MILAN	欧盟	红外热像与可见光相机	地面、车载或直升机	25~1920
AT-5 Spandrel	印度	红外主被动	车载	25~2000

表5 几种典型的末敏弹

名称	弹径/mm	传感器类型
SADARM	155	双色红外、3 mm波主被动
SMART155	155	双色红外、3 mm波主被动
BONUS	155	红外、毫米波
ACED	155	双色红外、3 mm波主被动

2 地面武器装备目标特性测试

如图1所示，从探测、识别和打击的角度分析，可见光、热红外和雷达波的威胁最为严重，也是目标信号特征控制技术的重点研究对象。因此下面重点介绍雷达和红外的目标特性测试。

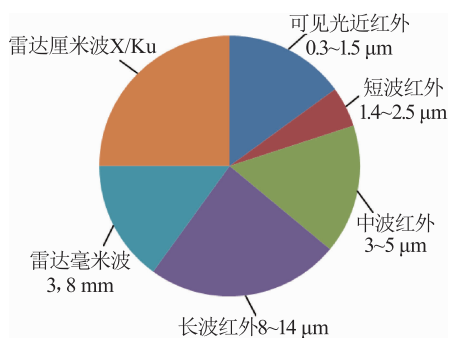


图1 电磁波威胁频段分布示意图

2.1 雷达目标特性测试

典型雷达目标特性如表6所示，其中雷达散射截

面(RCS)是研究历史最长、应用最广的特性，它是表征目标对于照射电磁散射能力的物理量。就雷达测试而言，RCS的表达式可为单位立体角内目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射于该目标的平面波功率密度之比的 4π 倍。RCS是受众多因子综合影响的复杂物理量，它既与目标的几何参数有关，还与入射雷达波的特性有关，同时又受目标相对于雷达的姿态角的影响。

目标特性测试可以分为静态测试和动态测试，两种测试各有优缺点。动态测试更接近于真实作战状态，但是测量结果随机性与测试误差较大，且实现困难，费时费力。静态测试可以克服动态测试的一些缺点，特别是其用于隐身设计时需要消除背景影响，只研究武器装备本身目标特性时，静态测试精度高、测量状态全面等优点就体现出来了。

对于目标特性和隐身研究起步较晚的地面武器装备来说，以前没有标准的测试场地，整车雷达目标特性测试，都只能通过简易场地或者野外环境下进行测试，背景噪声难以控制；对于被测目标的定位，也只能通过划线进行定位，直接导致了测试精度低、可重复性差。

兵器某研究所建立了采用自由空间场法的室外测试场。该测试场设计目标就是为地面武器目标特性测试服务，因此其最大特点是可变俯角测量，因为与空中目标不同，地面装备最大的威胁来自空中，所以，最

表 6 几种典型雷达目标特性

雷达目标特性	概念的提出	特点	其他相关描述
RCS 雷达截面	最早研究的目标特性	最基本和重要的雷达目标特性，幅度表征	RCS 的各类统计模型
目标角闪烁	50 年代，霍华德和美国海军实验室	幅度表征，应用于精确制导	角闪烁统计模型
多散射中心分布	1963 年，Keller	幅度信息和相位信息	一维二维三维分布
目标的极点	1971 年，Baum 提出可奇点展开法	全谱，自然复谐振，与目标方位无关	极点和留数
极化散射矩阵	1965 年，Brikel 提出极化不变量	目标信息完全描述	复极化散射矩阵
目标瞬态响应	1958 年，Kennaugh 提出	超宽带测量	电磁脉冲响应
雷达成像	合成孔径原理	无线电雷达图象	二维三维成像

重要的目标特性是在俯角状态下的目标特性^[4]。该测试场主要服务于大型地面装备测试工作，具备大承重的精确定位转台和可以提供大俯角的测试高塔(见图 2)。

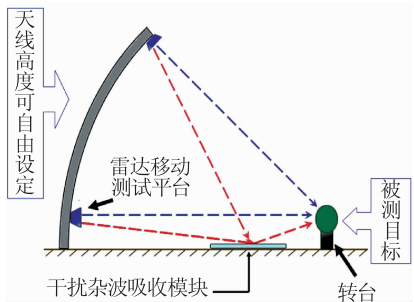


图 2 大俯角测试方式

动态测试随机性较大，但是可以采用对比测量来消除随机性误差，例如在同一轨道上采用同一测量设备进行测量，对数据进行比对分析，就可以得知在运动状态下两者的隐身效果差异。和静态测试相同，动态测试也需要重点获取俯角下的目标特性数据，见图 3。

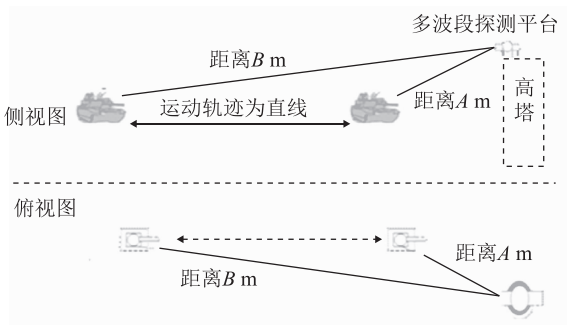


图 3 目标特性动态测试方式

2.2 红外目标特性测试

红外目标特性测试也可以分为动态测试和静态测试。与雷达目标特性测量一样，俯角测量对于地面装

备意义更大。不同之处在于，雷达目标特性运动状态发生变化主要是由观测角度及测试距离变化引起的，这个变化可以在静态测试中通过多角度精确测试加以弥补，而红外目标特性动静态测试变化主要是由被测目标温度变化引起的差异，也就是说运动状态下其红外目标特性随时发生变化，所以动态红外目标特性测试更有意义。

红外目标特性测试的方式主要有热成像测试和红外光谱辐射特性测试。对地面目标的整车红外隐身效能评价所需的红外目标特性测量，采用红外热成像测试更有意义，因为可以从热像图中直观地判定目标与背景的对比度差异情况及目标的热像斑块对被测目标的外形轮廓特征分割情况。

红外隐身测试设备和原理相对都比较简单，重点是后续进行的图像处理及红外隐身效能评估。

2.3 同步采集

多频谱同步采集即同时获取装备的雷达、远红外、可见光、近红外等多源目标特性的图像数据，并实现雷达二维像、远红外、可见光、近红外图像与被测装备的方位角准确的对应关系，为开展多源图像融合分析与综合隐身效能评价提供基础数据。

针对国内外大型地面武器装备多频谱同步采集方法鲜有研究、武器装备室外场建立不够完善的问题，兵器某研究所综合利用多种技术途径，实现了对全尺寸装备在 0°~60°俯角下的雷达、热红外、可见光、近红外多源目标特性的集成同步采集测量，如图 4 所示，其优势主要体现在以下两点：

1) 基于雷达目标特性测试平台，通过集成热红外、可见光、近红外等光学目标特性测试系统及各自独立的水平/俯仰姿态控制二维转台，实现雷达、热红外、可见光、近红外等多源目标特性测试系统的集成及视场角的一致性控制。

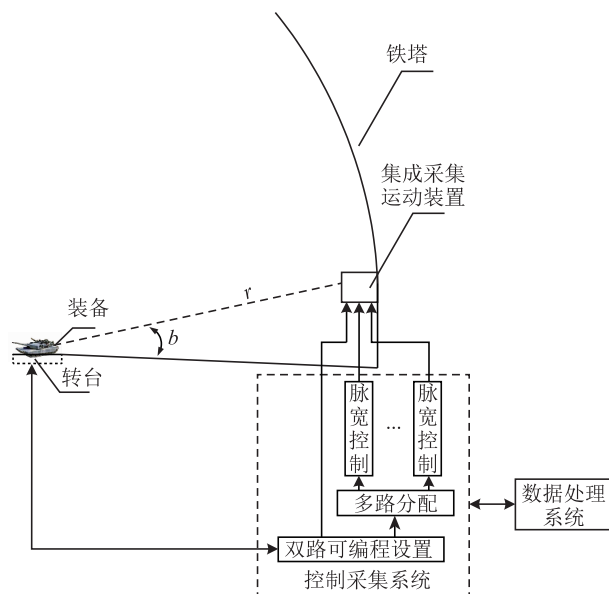


图4 多源目标特性集成同步采集测量方法实施示意图

2)通过对目标转台角度信号的双路分频与多路分配,实现对雷达、热红外、可见光、近红外等多源目标特性系统在不同角度步长条件下的雷达回波信号及光学图像的同步采集控制。

采用本方法对装备进行多源目标特性测量时,能够同时获取具有与装备方位角一一对应的雷达、热红外、可见光、近红外等图像数据,具有很高的一致性,能够为开展装备的多源数据融合分析、多谱段综合隐身效能评价、装备表面雷达强散射源与装备部件对应关系准确识别与定位提供可靠数据。

3 多谱数据融合技术

图像融合技术,可将不同波段获取数据的优势信息进行联合,使得融合后信息同时拥有各个源图像的突出信息,以便进一步增强目标特性的描述与提取,同时对源图像中如噪声等不感兴趣的信息进行压制^[5]。实际中图像融合的方法有很多,按图像之间的级别分类有加权的像素融合方法和分层次的融合方法等;按图像处理的方法分类有时域融合与频域融合等。按图像信息源分类有高空间分辨率与高时间分辨率图像融合、高光谱分辨率与高时间分辨率融合、高空间分辨率与高光谱分辨率融合^[6]。多谱融合方法及缺陷如表7所示。

为了解决现有多频谱融合方法的不足,兵器某研究所基于其建立的多波段同步采集系统,保证了多源信息在时间、空间与地理坐标上的高度配准,为图像融合提供了很好的基础。基于同步采集系统提供的基

础数据,开展了系统的多源信息融合研究^[7],如图5所示。

表7 多谱融合方法及缺陷

融合方式	经典算法	缺陷
空谱融合	MAP/SMM, CNMF	对多源数据的时相要求严格
时空融合	STARFM, ESTARFM	融合数据波谱响应应该严格匹配
时谱融合	时序拟合分析	在逐像元时序分析过程中,未考虑像元之间的空间互相关信息

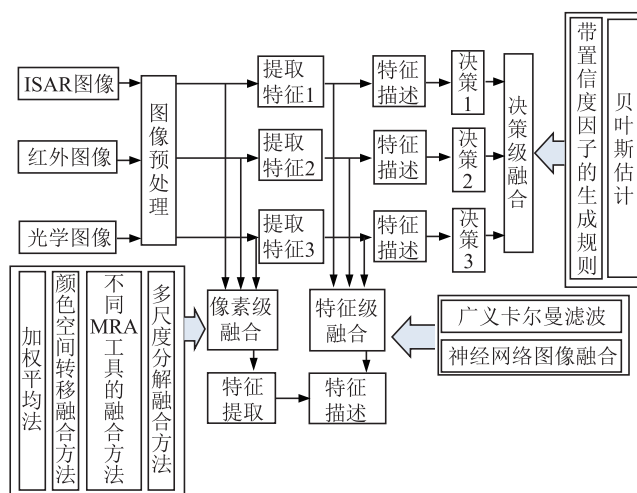


图5 多源目标特性融合示意图

利用多信息源探测方式能同时获取目标不同波段(雷达、红外、光学)的信息数据,多源数据间既存在一定的差异,也存在是部分冗余,因而不仅能够提取各探测波段下的目标特征,还能对多源图像进行融合处理后综合分析目标特征^[8]。一方面,针对不同探测波段和探测方式展现出不同的目标图像和特征,研究从单源图像中提取各自反映的目标特征信息以及特征表征方法,如雷达、可见光、红外光学探测图像中目标亮度、温度场分布等特征量^[9];另一方面,研究多源图像的融合处理和综合分析,包括雷达和光学图像融合、光学图像中可见光和红外图像融合技术,利用不同源图像来更丰富、全面的反映目标特性,计算融合图像的目标图像熵、联合熵、平均梯度等特征评价结果^[10]。

4 隐身/伪装效能评估技术

地面武器装备隐身效能评估是一项系统工程,其

涉及到的因素较多，不仅与自身的目标特征信号相关，也与其作战环境、敌方侦察/打击手段、天气等因素有密不可分的关系。目前经典的方法主要有决策树、专家打分系统、干涉比较法，此外对于地面武器装备及背景成像情况下(无论是雷达、红外、可见光、高光谱，还是多源信息融合图像数据)的目标隐身性能评估，有基于检测率、虚假率建立的 ROC (Receiver Operation Characteristics) 曲线分析方法。

ROC 曲线是从统计决策理论中发展出来的，越靠近左上角的曲线越优，常常把 ROC 曲线与横轴围成的面积大小 AUC (Area Under Curve) 作为探测准确度的定量标准，如图 6 所示。但是 ROC 把图像灰度分割的阈值向量隐含，评价效果并不理想。

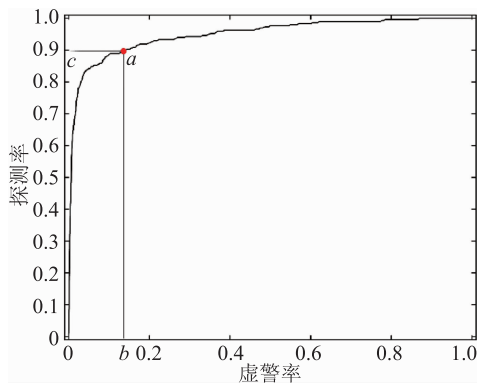


图 6 ROC 曲线

基于经典方法的不足，本文介绍一种综合考虑地面武器装备面临多波段威胁的效能评价体系建立的方法。该方法主要由如下几个步骤实现：

1) 建立递阶层次的评估指标层次

采用层次分析法将某一典型战场环境中坦克装甲车辆的战场威胁分解成各个组成因素，并将这些因素按支配关系分组形成如图 7 所示的坦克装甲车辆隐身评估指标层次结构图。

2) 构造两两比较评估矩阵

使用标度法以两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性，建立评估矩阵，通过公式计算出同层元素的指标权重。

3) 一致性检验

利用公式计算判断矩阵的一致性比率 C. R. (Consistency Ratio)，以保证判断矩阵大体上的一致性，如不符合一致性，需重新建立评估矩阵，直至一致性检验通过。

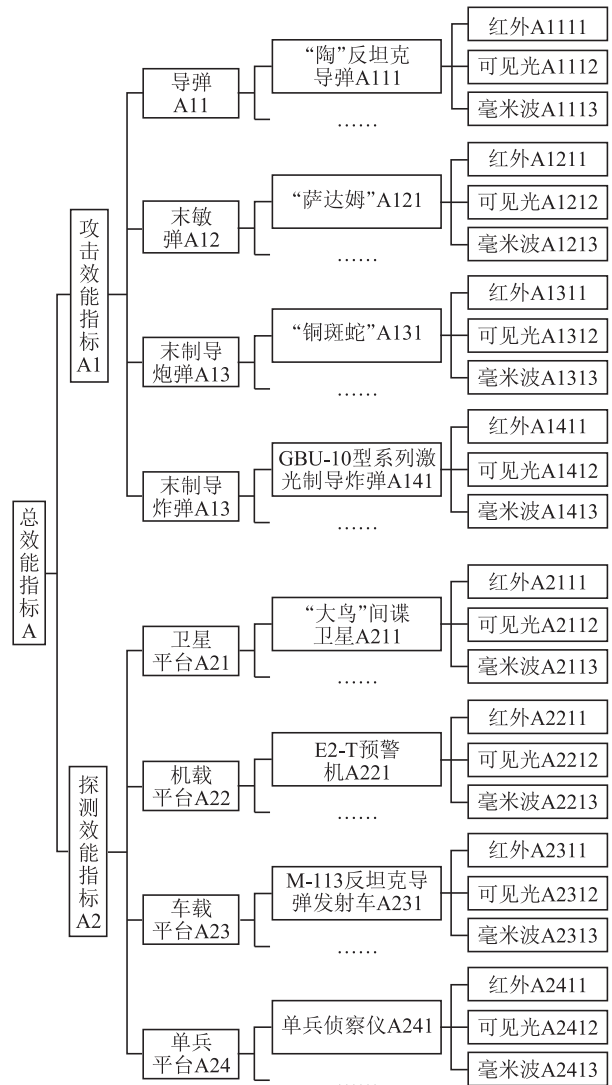


图 7 坦克装甲车辆隐身评估指标层次结构图

4) 评估权值

在分层获得了同层各元素的评估权值后，就可利用公式自上而下的计算出各级要素关于总体的综合权值，即可获得各个探测波段对坦克装甲车辆隐身评估的权值。

5) 测试数据

利用装甲车辆动态多波段集成测试系统开展测试，获得背景、季节、天气、探测波段等条件下的测试数据。

6) 数据处理

对来自不同探测波段的测试数据应用神经网络算法优化处理，建立典型战环境下距离因子的评估模型，得到各个探测波段的隐身效能值。

7) 加权融合

对各探测波段的隐身效能值和评估权值进行加权融合, 得到目标多波段隐身效能综合评估值。

5 结论与建议

地面武器装备现在和未来都是战争中不可或缺的重要力量, 不管是在战争最前线的装甲车辆, 还是在二线的指挥车辆; 不管是射程几十公里的常规炮车, 还是射程数千公里的战略导弹发射车, 都对目标特性测量以及隐身效能评估有迫切的需求。但是目前我国这方面发展较晚、投入较小, 与国外水平有所差距。因此, 建议加强以下几个方面的工作: ①大力建设适应各种武器装备不同需求的测试场地; ②发展针对隐身目标测试的专业测试设备; ③加强测试数据的处理算法研究, 特别是隐身效能评估的研究; ④建立测试、评价标准, 统一不同测试场地数据; ⑤开展多波段、动静态结合的隐身测试技术及隐身效能评估方法, 以应对快速发展的多模探测技术。

参 考 文 献

- [1] 安富涛, 王森. 地面装备目标特征测评方法研究现状及展望[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(4): 82-86.
- [2] 梁海朝, 甄华萍, 王剑颖, 等. 美国激光武器发展进展[J]. 飞航导弹, 2015(2): 32-35.
- [3] 陈知华, 李兵, 牛飞龙, 等. 雷达隐身测试的发展与应用[J]. 计算机测量与控制, 2008(6): 746-748, 751.
- [4] 刘增灿, 王森, 张天才, 等. 变俯角 RCS 测量杂波干扰抑制技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(11): 192-196.
- [5] 朱炼, 孙枫, 夏芳莉, 等. 图像融合研究综述[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(2): 14-18.
- [6] 吴仰玉, 纪峰, 常翠, 等. 图像融合研究新进展[J]. 科技创新导报, 2013(1): 49-52, 54.
- [7] 刘增灿, 邓爱明, 周学梅, 等. 目标侦测与伪装技术[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 30-34.
- [8] Goutsias J, Heijmans H J A M. Nonlinear Multiresolution Signal Decomposition Schemes—Part I: Morphological Pyramids [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2000, 9(11): 1862-1876.
- [9] Piella G. A Region-based Multiresolution Image Fusion Algorithm [C] // International Conference on Information Fusion. IEEE, 2002: 1557-1564.
- [10] Petrovic V S, Xydeas C S. Gradient-Based Multiresolution Image Fusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(2): 228-237.

作者简介



陈知华(1981-), 男, 研究员, 硕士研究生, 主要研究方向为隐身与目标特性技术。承担国防基础科研等项目 20 余项、获得部级重大科技创新成果奖 1 项、获得部级科技进步一等奖 1 项、部级科技进步二等奖 1 项、部级科技进步三等奖 2 项, 申请国防专利 6 项, 参与编写 GJB 1 项、行业和企业标准 5 项, 主持编写国防科技报告 3 篇, 在行业相关会议及杂志发表论文 10 余篇, 获得国防基础科研集团二等奖与国防科工局三等奖、所首届学术带头人、中国计算机及自动控制协会理事。