

国家“九五”重点图书

高科技与工程计算丛书

# 雷达散射截面测量 — 紧凑场理论与技术

庄钊文 袁乃昌 编著



国防科技大学出版社

★ 国家“九五”重点图书  
高科技与工程计算丛书

# 雷达散射截面测量

## ——紧凑场理论与技术

庄钊文 袁乃昌 编著



国防科技大学出版社  
·长沙·

## 图书在版编目(CIP)数据

雷达散射截面测量:紧凑场理论与技术/庄钊文,袁乃昌编著. —长沙:国防科技大学出版社, 2000.10

(高科技与工程计算丛书)

ISBN 7-81024-669-0

I. 雷… II. ①庄… ②袁… III. 雷达—散射截面—测量 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 36397 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@ public. cs. hn. cn

责任编辑:徐 飞 责任校对:张 静

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

787×1092 1/16 印张:15.75 字数:364 千  
2000 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1000 册

\*

定价:38.00 元

# 引 言

雷达散射截面是雷达探测技术、目标识别技术、隐身技术、电子战技术的一个重要特征,雷达散射截面的测量对研究目标基本散射理论、获取目标的特征数据以检验系统性能,建立各种目标的数据库,有效地进行 RCS 减缩等,均有重大意义。测试场需要的是远场数据,所谓远场是把目标放在测试雷达远区距离处,使人射波在目标处的相位波前可认为是平面,这一点在室外测试场通常可以满足要求。对室内测试场而言,紧凑场可提供近距离平面波测试条件,本书结合国防科技大学电子科学与工程学院超宽带紧凑场建设,并根据国内外近几年来有关紧凑场的技术资料编写而成。

我们期望该书的问世,能够引起国内同行专家学者对紧凑场技术的关注。由于时间仓促,书中难免有不当之处,希望读者批评指正。

庄钊文 袁乃昌

2000年8月于国防科技大学

# 目 录

## 引 言

### 第一章 雷达散射截面概论

§ 1.1 雷达目标与环境特性研究现状 .....	(1)
1.1.1 目标与环境特性联合建模 .....	(1)
1.1.2 通过各种试验,获取动态目标与背景特征数据并建立数据库 .....	(3)
§ 1.2 雷达目标散射截面 .....	(7)
§ 1.3 雷达目标散射频率分区 .....	(8)
§ 1.4 雷达目标散射机理 .....	(9)
§ 1.5 雷达目标高频散射机理 .....	(10)
§ 1.6 低分辨力雷达的 RCS .....	(12)
§ 1.7 高分辨力雷达的 RCS .....	(16)
§ 1.8 简单目标的散射特征信号 .....	(17)
§ 1.9 雷达目标特征信号计算方法 .....	(21)
§ 1.10 雷达作用距离与雷达截面的关系 .....	(22)
参考文献 .....	(24)

### 第二章 雷达散射截面(RCS)测试设备系统

§ 2.1 CW 对消雷达 .....	(29)
§ 2.2 非相干脉冲雷达的 RCS 测量 .....	(31)
2.2.1 脉冲发射机 .....	(33)
2.2.2 脉冲接收机 .....	(37)
2.2.3 短脉冲雷达 .....	(39)
§ 2.3 相干雷达 .....	(41)
2.3.1 相干脉冲雷达 .....	(41)
2.3.2 调频/连续波(FM/CW)雷达 RCS 测试系统 .....	(45)
§ 2.4 宽带散射矩阵雷达 .....	(47)
§ 2.5 宽频带雷达中的数字功能 .....	(51)
§ 2.6 亚特兰大科学公司 2090 系列脉冲 RCS 测试系统 .....	(56)

§ 2.7	GTRI HIPCOR - 95 雷达 .....	(61)
§ 2.8	休斯(Hughs)公司的 MMS - 300 RCS 测试雷达系统 .....	(63)
§ 2.9	系统设计公司(SPC)MK - IV 雷达 .....	(67)
§ 2.10	使用 HP8510 网络分析仪的 RCS 测试系统 .....	(70)
§ 2.11	国防科技大学自动测量计算超宽带时域紧凑场 .....	(82)
§ 2.12	俄亥俄州立大学雷达散射截面测试场 .....	(86)
	参考文献 .....	(94)
<b>第三章 紧凑场反射器理论及设计</b>		
§ 3.1	大型反射器 .....	(95)
§ 3.2	反射器边缘构造及边缘的弯曲修正 .....	(98)
§ 3.3	一种设计紧凑场反射器融合卷绕边缘的方法 .....	(107)
§ 3.4	改善的主反射器边缘设计 .....	(119)
§ 3.5	紧凑场锯齿形边缘反射器和卷绕边缘反射器的性能比较 .....	(131)
	参考文献 .....	(143)
<b>第四章 双反射器紧凑场理论及设计</b>		
§ 4.1	双室紧凑场 .....	(145)
§ 4.2	格利高利双室紧凑场理论设计 .....	(149)
§ 4.3	紧凑场中的双抛物柱面反射器 .....	(159)
§ 4.4	紧凑场馈源喇叭及目标支架设计 .....	(168)
§ 4.5	紧凑场参数及其选择 .....	(173)
	参考文献 .....	(181)
<b>第五章 紧凑场暗室诊断</b>		
§ 5.1	紧凑场暗室静区测试 .....	(182)
§ 5.2	使用对角平板对紧凑场的严格的场评估 .....	(188)
§ 5.3	在天线方向图测量中减小寄生信号误差的一种方式 .....	(198)
§ 5.4	紧凑场反射器边缘处理对天线和雷达散射截面测量的影响 .....	(206)
	参考文献 .....	(215)
<b>第六章 雷达散射截面测量校准</b>		
§ 6.1	一般的校准研究 .....	(217)
6.1.1	幅度校准 .....	(217)
6.1.2	闭合校准 .....	(223)
§ 6.2	校准目标的一般特性 .....	(223)
6.2.1	典型的校准目标 .....	(223)
6.2.2	特殊的校准目标 .....	(225)

§ 6.3 相干系统 .....	(226)
6.3.1 幅度 .....	(227)
6.3.2 L/Q 正交, 偏置和增益平衡 .....	(228)
6.3.3 L/Q 校正 .....	(231)
6.3.4 相位和频率稳定度 .....	(232)
§ 6.4 极化系统的校正 .....	(233)
6.4.1 测量极化隔离 .....	(233)
6.4.2 椭圆率 .....	(234)
6.4.3 极化相位校正 .....	(234)
6.4.4 使用正交模式转换器(双模耦合器)的系统的校正 .....	(236)
6.4.5 极化矩阵失真 .....	(237)
§ 6.5 特别的设计 .....	(238)
6.5.1 高分辨率成像系统 .....	(238)
6.5.2 地面场 .....	(239)
6.5.3 低雷达散射截面(RCS)的测量 .....	(240)
6.5.4 双站系统 .....	(240)
6.5.5 跟踪系统 .....	(240)
§ 6.6 误差原因和精确性研究 .....	(241)
参考文献 .....	(243)

---

# 第一章 雷达散射截面概论

## § 1.1 雷达目标与环境特性研究现状

随着以信息技术为代表的高新技术的迅猛发展和广泛应用,军事领域发生一系列重大变革,精确制导武器、新型军用卫星、电子战装备、反导弹系统、指挥自动化系统等高技术武器装备大量研制成功并投入实战。武器装备的发展呈现信息化、智能化、一体化趋势,多种武器联结成一个有机的整体,作战效能成倍增加。一体化的监视、侦察、预警体系对作战目标的检测识别能力极大提高,战场空间将变得透明化;全球信息网络经陆、海、空、天基平台上光、电、声多传感器获取的信息,精确、实时、全天候地传输到各种武器装备的指挥控制中心,形成综合作战能力。具备低可观测性、高命中精度、强突防能力的精确制导武器成为未来战争的“杀手锏”。

目标与环境特性是一体化战场感知信息的重要组成部分,是传感器、制导武器设计、研制与试验的依据,是精确制导、仿真、引信、特征控制等技术的研究基础,是目标识别、信号处理等专业的信息来源。特别对于新一代探测传感器和制导武器发展而言,目标与环境特性将对其产生深远的影响。雷达目标与环境特性研究是跨行业的共用技术领域之一,是带有全局性、超前性和基础性的国家关键技术工作。雷达目标与环境特性研究的主要内容是:建立目标与环境特性研究试验体系,具备全频谱目标与环境特征信号的描述能力,建立目标及其环境的特性模型、数据和方法资源仓库,为一体化环境态势感知、新一代武器研制试验、作战仿真和训练以及军方武器系统评估、装备、采购和管理提供技术支撑。

### 1.1.1 目标与环境特性联合建模

美国、俄罗斯和其它一些西方国家十分重视目标与环境特性的研究工作。以美国为例,有 20 多个骨干实验室和研究中心长期从事这一领域的研究工作。借助这些研究机构的牵引,在目标与环境特征信号的采集、处理与综合、理论模型的开发、校核和验证、特征数据库等方面形成了完整的研究体系。

20 世纪 70 年代以后,美国相继建成了一批重要的电磁散射和红外辐射模型,并且这些成果很快转移到工业部门,形成武器研制能力。如波音公司用于红外特征预测的 ToT-SiC 模型和用于复杂目标电磁散射计算的 RECOTA 模型。洛克希德公司研制的 F-117 隐



身战斗机,正是应用它自己的 ECHO2 模型设计的。80 年代末,美国为了改变目标特性建模方面的分散和无序状态,着手进一步提高建模技术发展水平和模型精度,同时提高建模的投资效益和降低国防费用。从 1987 年起,成立了电磁代码联合体(EMCC),这个联合体由军方、工业界、高等院校组成。由政府发起的联合体和工业界、高校的联合体都从这种组织形式中分享了好处。联合体对各自已有的、独立分散的模型进行了全面评估,选定有发展前途的给予重点支持,并规定了一套共同开发必须遵循的协议和验证、测量标准,选择了先进的共用几何体生成软件模块和计算机平台,大大提高了开发的起点水平。

1992 年推出的以 XPATCH 为代表的美国政府电磁散射建模代码,就是这种联合体的产物,目前已发展到 2.4 版本。近几年,为进一步扩展 XPATCH 的功能,提高模型精度,又实施了 PACE SETTER 计划,该计划的 5 个主要研究目标是:(1)发展能与各种计算电磁学技术相结合的三维 CAD 模型;(2)发展精确的宽带和全方位的 RCS 计算方法;(3)对每种计算电磁学方法进行验证并建立其误差限;(4)发展通过大规模并行处理硬件来解决现实中电大尺寸目标 RCS 计算问题的能力;(5)提供一个集成的环境,在运行电磁计算代码时可使计算结果的误差最小。可见,在这样一项研究计划中,既涵盖了关于计算电磁学问题的基础性研究工作,又面向电磁散射这一特定的工程应用问题,其最终目的是建立一个电磁计算专家系统,实现对电大尺寸复杂目标电磁散射计算问题的解决,并保证所得到的结果具有最小的误差。XPATCH 实际上已成为美国电磁散射建模中起主导作用的模型,被广泛集成应用于各种大型工程应用模型中。

通过联合建模,建立面向特定应用的目标与环境特性模型这一特点,可以从面向弹道导弹防御应用的合成场景生成模型(SSGM)和面向空地反坦克导弹应用的 Irma 模型这两个典型例子来得到印证。

在弹道导弹防御研究中,需要模拟对预期目标的检测、捕获、识别和跟踪,并预测自然和人造背景对相应的光学和雷达传感器的影响。合成场景生成模型 SSGM 就是面向这样一种特殊应用的大型目标与环境特性工程化应用模型。该模型的研制开发始于“星球大战”计划时期,由美国海军研究实验室(NRL)主持开发,早期由 SDIO 支持,叫做 Strategic Scene Generation Model,后转入弹道导弹防御计划后,由 BMDO 支持,改称 Synthetic Scene Generation Model,缩写均为 SSGM。

SSGM 是美国第一个将各种经政府确认的目标与环境特性模型集成化的软件系统,它集成了最先进的关于目标与环境特性的知识、数据库和经过确认的模型,作为弹道导弹防御局(BMDO)的标准仿真模型,专供从事导弹攻防研究的特定用户群体使用。从 1987 年迄今,已经发布了 9.0 版本。SSGM 可以对导弹从发射到拦截各个阶段的目标与环境特性进行模拟,可完成助推段、中段、再入段各阶段的目标与背景红外、雷达特征、传输特性等的建模和场景生成,是目前已知的功能最强大、应用面极广的集成建模软件。

美国在 80 年代发起的电磁联合体的倡议、北约国家的建立“北约标准模型”计划,实际上都属于一种政府行为,其结果提高了建模精度和能力,建立了一大批模型“国家代码”、集成了一些大型的工程应用模型,大大加快了目标与环境特性的建模成果向军方和工业界使用方的转移。以美国弹道导弹防御局(BMDO)的 BMD 试验与评估(T&E)计划为例,仅在 Eglin 空军基地动能拦截器半实物仿真器(KHILS)实验室,就使用了国防信息处理中

心资源库中的近 20 个目标与环境特性模型。

### 1.1.2 通过各种试验,获取动态目标与背景特征数据并建立数据库

美国和俄罗斯等国特别重视通过各种试验,获取目标与环境特性真实数据,并将全部数据纳入国防信息资源库管理,通过分布式计算机网络系统,达到数据共享。美国的目标与环境特性数据获取主要沿三条途径发展:

(1) 重视靶场目标与环境特征信号测量设施建设,建立面向目标与环境特性研究的专门研究试验设施,长期系统地开展测量试验和数据获取工作;

(2) 设立面向特定武器装备研制应用的研究试验计划,通过专门试验获取所需的目标与环境特性数据;

(3) 在国家级大型国防研究试验计划中,设立关键测量试验计划,通过各种靶场试验获取目标与环境特性数据。

#### 一、面向目标与环境特性研究的专门试验设施

长期以来,美国国防部对一批骨干实验室、研究机构和工业部门,按照面向特定应用原则重点投资,形成了较完整的目标与环境特性研究试验体系。

从 20 世纪 50 年代末开始,美国陆军就重点支撑了夸贾林导弹靶场的目标与环境特征信号采集、试验设施的建设。迄今为止,该导弹靶场装备有 ALCOR, ALTAIR, TRADEX, MMW RADAR 等目标与背景特征信号大型测量雷达和 FPQ-19, MPS-36 等常规测量雷达,其频段覆盖了 100MHz ~ 100GHz 的范围。该靶场还装备了包括光学跟踪仪、弹道相机、光谱相机、光电跟踪等各种地基光学测量系统,用以完成内、外大气层各种弹道目标和背景特征信号的采集。夸贾林导弹靶场成为美国用于目标与环境特征信号测量试验的特大型骨干靶场之一。

在霍洛门空军基地建立了国立静态散射测试场——RATSCAT 散射测试场,该测试场装备了从 VHF 到毫米波频段的全频段 RCS 测量试验设备、低散射支架、低背景场区和先进的数据采集、处理系统。其主要测量能力包括

- 单站和双站
- 全尺寸、真实目标
- RCS、角闪烁、成像、近场及天线方向图测量
- 高度机密的目标测量与成像
- 性能预估和数据分析
- 宽频段: 100MHz ~ 18GHz, 35GHz, 94GHz
- 全极化散射矩阵

该测试场是美国国防部外场静态电磁散射测试的骨干设施,美国各型重要飞行器(如 F-117A、F-22、B-1、B-2、A-10、F-16、F-18 等)的电磁散射性能指标的最终鉴定,都是由该试验场最终完成的,图 1.1.1(a)和(b)为一外测试场。

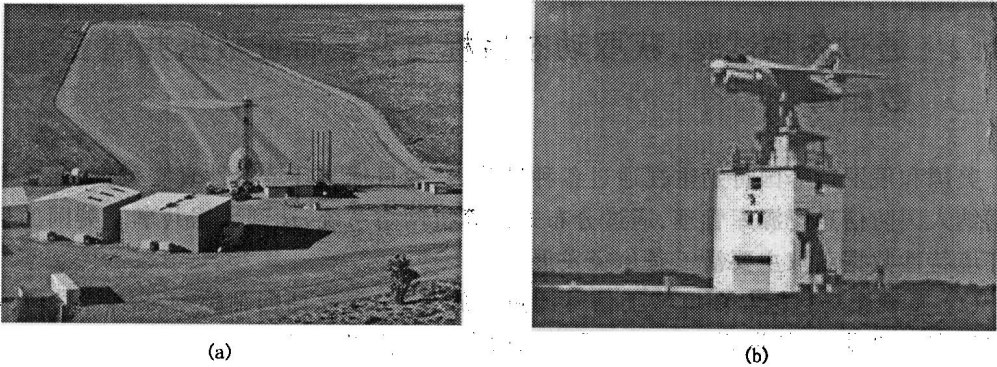
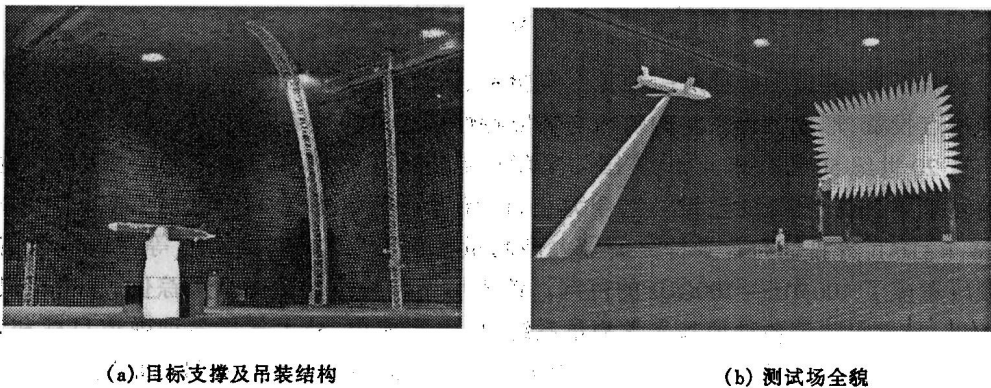


图 1.1.1 目标外场雷达反射特性测量

美国各研究机构也建立了大量的测试场,图 1.1.2(a)和(b)为海空作战中心(Naval Air Warfare Center)雷达反射实验室的室内测试场



(a) 目标支撑及吊装结构

(b) 测试场全貌

图 1.1.2 大型室内雷达反射测试场照片

阿诺德工程发展中心拥有风洞、垂直火箭发动机测试架、高能测试等目标与环境光电特性测试设备,其测试能力主要包括:

- 目标与尾焰特征信号
- 暗室、静态、滑橇、发射场测量
- 流场特性
- 谱段:  $0.12 \sim 20 \mu\text{m}$
- 成像辐射计:  $0.2 \sim 12 \mu\text{m}$
- 紫外-长波红外辐射计

其全部数据均按照美国 NIST 标准进行标定。该中心在通过上述试验设备获取大量目标与环境特性数据的基础上,还建有面向导弹攻防应用的“先进导弹特征信号数据中心”。

Eglin 空军基地拥有多个机载测量系统、一个可机动的 RCS 测试系统和半实物仿真等其他研究试验设施。自 50 年代以来为数百个研究计划收集过雷达和红外数据,建立了一

批目标的数据库等。

## 二、面向特定武器装备研制应用的研究试验计划

从 20 世纪 50 年代后期开始,美国为弹头突防研究,专门设计了阿希纳试验火箭试验计划,它能携带缩比再入体和 350 磅全尺寸的突防装置,作再入段飞行特性的模拟,该项计划先后进行了 100 多次试验。上述试验不仅从现场采集了大量的目标与背景的特征信号数据,丰富了目标分类识别的数据库,而且也完善了为了探索突防、防御和识别途径的特征信号测量方法。图 1.1.3(a)和(b)为海空作战中心(NAWC)雷达反射实验室的导弹测试和潜艇天线竿的目标特性测试。

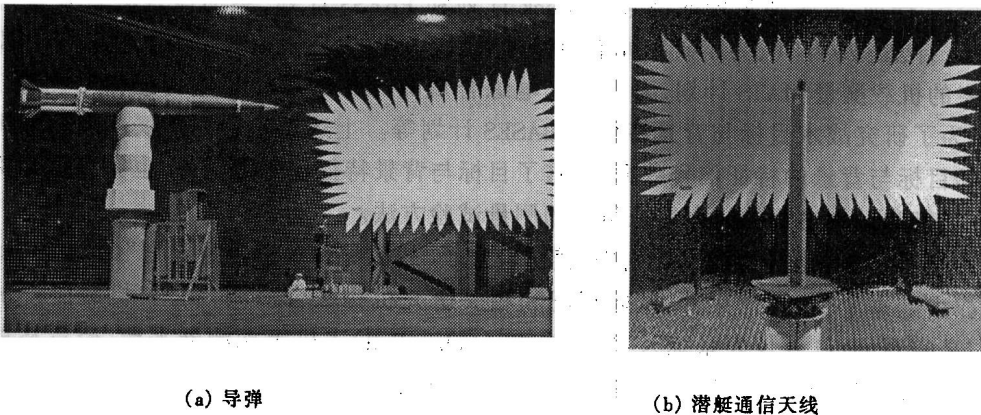


图 1.1.3 武器在大型室内雷达反射测试场内测试照片

80 年代末,为解决智能化制导武器中的目标探测识别问题,专门设立了灵巧武器可操作性增强计划(SWOE),该项计划 6 项主要任务的第一项便是关于支撑合成战场场景的测量试验技术。在该项计划中,专门设立了联合测试与评估分项计划,以期通过陆、海、空军和海军陆战队四方联合完成的对 4 个场区的一系列测量试验,获取所选定地区的环境特性数据。这些数据不仅作为 SWOE 建模的数据库,同时也作为对 SWOE 模型效验的数据。

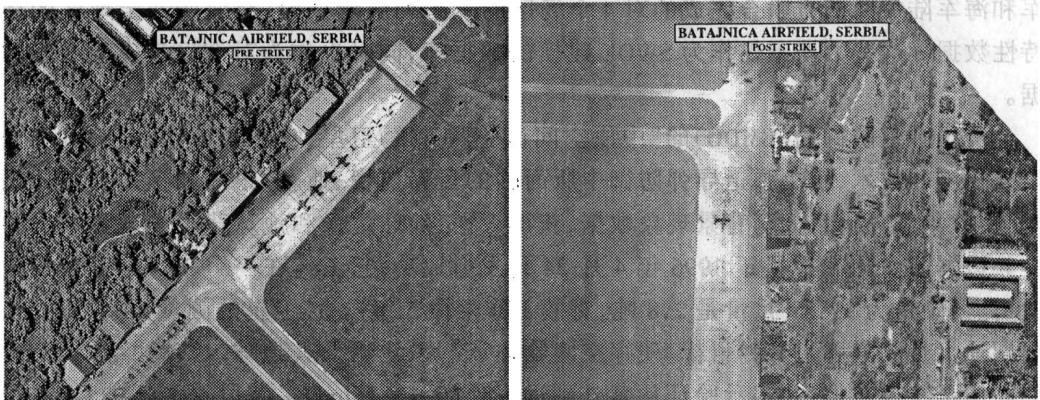
美国弹道防御局(BMDO)的“中段空间试验”(MSX)卫星,它利用被动红外、可见光和紫外探测器技术,解决弹道导弹防御中所面临的目标监视、捕获、跟踪和识别有关的系统问题,收集和分析目标与背景现象数据,获得天空、地球边缘和地球背景的现象数据并建立其数据库。MSX 卫星于 1996 年 4 月 24 日发射成功,它工作在一个 900km 高度的极地轨道上,倾角为  $99.3^\circ$ (重量是 2.8 吨,有效工作寿命 5 年)。该卫星的测量试验目的是:长周期地大量收集弹道导弹目标、残存空间物体、碎片、诱饵及其地球、地球边缘、天体背景的高质量特性数据,并演示验证从紫外到远红外( $0.1 \sim 28\mu\text{m}$ )多波段探测器的目标探测、识别与跟踪能力,为中段导弹拦截器的设计研制服务。主要测量试验仪器包括 5 台大型设备:一台低温致冷的大型空间红外成像望远镜(SPIRIT),它由红外 5 色高空间分辨率扫描辐射计和 6 通道富里哀变换光谱仪组成;一套紫外可见光成像器和摄谱成像器;一台天

基可见光摄像机(SBV),用于目标跟踪;一套空载信号与数据处理器(OSDP);一组污染测量仪,用来收集与监控红外望远镜主镜的空间污染数据。该卫星至今一直在进行各种导弹在多种诱饵投放方式下的目标检测、识别与跟踪试验,BMDO声称,试验非常成功,已取得了大量珍贵可靠的实验数据。

### 三、通过各种关键测量试验计划获取目标与环境特性数据

50年代末起,美国高级研究计划局为解决导弹攻防和目标识别问题,用专用的目标特性测量雷达和光学设备进行了大量的现场观测、模拟试验和理论分析工作,企图既解决反导弹系统中段与再入段的识别技术,又为自己战略导弹突防装置的系统设计提供可靠依据。先后执行了一系列试验计划,如再入段观测 RAMP 计划,再入物理现象研究 Reentry Physics 计划,收集弹头特征信号的 Duck 计划和 PRESS 计划,主动段观测背景噪声的 Tabstone 计划。70年代,为了研究弹道导弹再入段、中段的特征和识别问题,执行了中段光学为主的机载测量 MATS 计划,再入段光电综合观测 Soft 计划和红外特征信号测量 Fair 计划,为了研究战术目标与背景特性的 BASES 计划等。上述试验计划不仅从现场采集了大量的目标与背景的特征信号数据,丰富了目标与背景特征信号数据库,也完善了为探索突防、防御和识别途径的研究特征信号的测量试验方法。

90年代,在弹道导弹防御计划中,美国设立了“战区导弹关键测量计划”(TCMP),国防部授权由陆军牵头,其他兵种、试验靶场和相关研究机构联合协调,利用“机载监视试验台”、“高空观测/红外仪表系统”、“眼睛蛇球”(Cobra Ball)飞机等探测器平台、夸贾林岛等靶场光学和雷达测量系统以及一些专门设计的特征信号测量试验设备,收集各种可能的战区弹道导弹威胁的光学和雷达特征数据,并据此大规模地建立导弹攻防作战应用的各种模型和数据库。据不完全统计,在这方面进行的大型试验有40多次。如在最近的科索沃战争中航拍的轰炸效果的光学图像结果如图1.1.4所示,(a)和(b)图分别为空袭前后塞尔维亚巴塔伊尼察机场



(a) 打击前机场

(b) 打击后机场

图 1.1.4 科索沃战争中航拍的轰炸效果

纵观近 40 年来美国对目标与环境特性测量研究试验的历史,可以看到:

(1)为了系统地开展目标与环境特征信号测量,美国建设了一系列的靶场目标特征测量设施,并组织了麻省理工学院的林肯实验室、麦道宇航公司、斯坦福研究所、密执安环境特性研究所、俄亥俄大学电子科学实验室、阿诺德工程发展中心、霍洛门和 Eglin 空军基地以及海、陆、空军研究实验室等一批研究机构,专门研究目标特征信号的测量试验等问题。

(2)自 50 年代末以来,直到近十几年来的“星球大战”计划(SDI)和弹道导弹防御计划(BMD),美国已发展了各种先进的探测、识别传感器,包括被动式红外探测器、紫外探测器、可见光探测器、主动式微波雷达、激光雷达和毫米波雷达等多种探测器,目前正在发展超光谱成像(HIS)、特超光谱成像(VSI)、先进光电预警传感器(AEOWS)、天基雷达(SBR)以及低可探测性移动目标指示器等。通过这些先进传感器的数据采集和建模,获取了大量关键的目标与环境特性数据和模型,这是其先进武器装备发展的重要基础。

(3)从试验计划安排来看,经历了从单一的目标特性测量向目标特性测量和相关武器平台演示验证及效果评估相结合的方向发展。

## § 1.2 雷达目标散射截面

当物体被电磁波照射时,能量将朝各个方向散射。散射场与入射场之和就构成空间的总场。能量的空间分布依赖于物体的形状、大小、结构以及入射波的频率与特性。能量的这种分布称为散射,我们用散射截面来表征,它是物体的一个假想面积。物体本身通常称为目标或散射体。

雷达散射截面(Radar Cross Section)是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念,在给定方向上返回或散射功率的一种量度,它用入射场的功率密度归一化表示。形式上,雷达散射截面的定义式为<sup>[1]</sup>:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{S^s}{S^i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (1.2.1)$$

其中: $S^s, S^i$  分别为散射场、入射场的功率密度

$E^s, E^i$  分别为散射电场、入射电场

$H^s, H^i$  分别为散射磁场、入射磁场

我们知道,散射场是由于空间有散射体(目标)的存在而引起的,所以空间的总场为入射场和散射场之和:

$$E^T = E^i + E^s \quad (1.2.2)$$

$$H^T = H^i + H^s \quad (1.2.3)$$

雷达散射截面的单位是面积,常用平方米表示,但有时也用平方波长来表示。工程上则常采用其 dB 值,用  $10\log(\sigma)$  或  $10\log(\sigma/\lambda^2)$  来表示。

显而易见,RCS 是下列因素的函数:

1. 目标结构
2. 电磁波的频率

3. 入射场的极化形式
4. 接收天线的极化形式
5. 目标对于来波方向的角向位置

因此,一般地说,  $\sigma$  可以表示为  $\sigma_{ij}(\theta, \varphi)$ ,  $i$  和  $j$  表示入射场和接收天线的极化方向,例如水平极化和垂直极化,而  $(\theta, \varphi)$  则表示在球坐标系下的视角。

由于目标的 RCS 不仅是雷达信号入射角的函数,而且也是接收机方位角的函数,因此雷达散射截面就有了单站和双站之分。当源和接收机不在同一点时,称为双站散射,通常说的前向散射就是双站角为  $180^\circ$  时的情况。当源和接收机位于同一点时,如同大多数雷达工作时的情况那样,则称为单站散射,又叫后向散射。在许多测量系统当中,通常使用分离的发射天线和接收天线,严格地讲,这种情况应该是双站条件。不过,由于目标对两个天线的张角通常很小,测量的结果和真正的单站情形并无差别。

在高频区计算复杂目标的散射时,必须计算很多不同部件的散射场,然后在平方之前相加以便得到部件的散射功率。这就保持了目标上各散射体之间的相位关系,可以正确地表示干涉作用。但式(1.2.1)中的定义则不包含相位信息,无法直接相加,因此我们必须引入一个新的 RCS 表示方法:RCS 的平方根。根据散射场的极化关系,由远区接收机读出的信号将正比于沿接收机极化方向的散射场分量,所以可以定义<sup>[1]</sup>:

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi R} \frac{E^s \cdot \hat{e}_r}{E_0} e^{-jkR} \quad (1.2.4)$$

式中,  $\hat{e}_r$  是接收机的电极化方向

$R$  是目标到雷达接收机的距离

$E^s$  是目标的散射电场

$E_0$  是入射波的电场强度

这个定义体现了散射的相位和接收机极化的影响,是一个复量,而式(1.2.1)所定义的 RCS 则是一个仅表示振幅的纯实数。不同散射体的  $\sqrt{\sigma}$  可以直接相加。

### § 1.3 雷达目标散射频率分区

电磁散射,是指当电磁波入射到某一目标上时,根据 Maxwell 方程和相应的边界条件,在该目标上和目标内便有电流和磁流流动,这些感应电磁流又产生了它们自己的电磁场,这个场就是目标的散射场。它常常沿各个不同方向以不同的幅度和相位传播。

根据目标的尺寸与入射波波长的相对长度,散射过程可以分为三种自然的类型:其一是低频区或瑞利(Reyleigh)区,这时波长较之散射体的尺寸大得多,散射过程是感应偶极矩引起的;其二是谐振区,这时波长和散射体的尺寸为同一数量级,散射体每一部分对其它各部分都产生电气影响,散射场就是这些相互影响的总效果;其三是高频区,这时波长远小于散射体尺寸,散射场主要是从各个独立即没有相互影响的散射中心来的回波的叠加。图 1.3.1 中所示的是球的  $\sigma$  对于  $ka$  的曲线,通过它可以说明这三种散射方式(注:在该图中,  $\sigma$  已用几何截面积  $\pi a^2$  归一化)。在频率的低端,波长比球的周长大多,雷达截

面正比于 $(ka)^4$ 。当波长介于0.1到1个圆周长时,雷达截面表现出很强的振荡特性。当波长小于0.1个圆周长时,雷达截面的振荡特性消失而趋于常数值 $\pi a^2$ ,即球的投影面积。

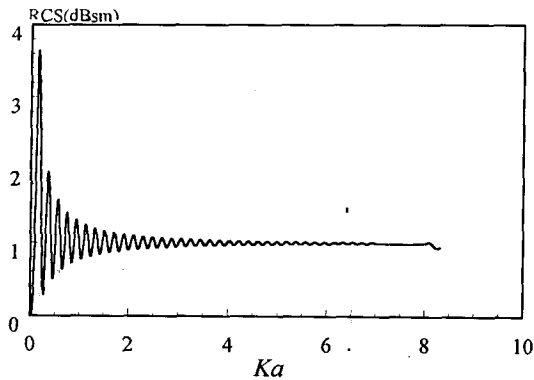


图 1.3.1 金属球的 RCS

## § 1.4 雷达目标散射机理<sup>[1,2,3]</sup>

多数的雷达目标为复杂目标,因此目标的散射比较复杂。不过复杂目标可以分解为简单的目标原形(如球、柱体、平板等)。如图 1.4.1 所示,在要求精度不高的条件下,目标可以分解为球、柱体、平板的组合物。简单目标的组合可以得到合理的目标特性估计。这种方法在目标特性研究的早期被广泛采用,如 Mittra 等人在研究目标识别中采用的模型即为组合物。

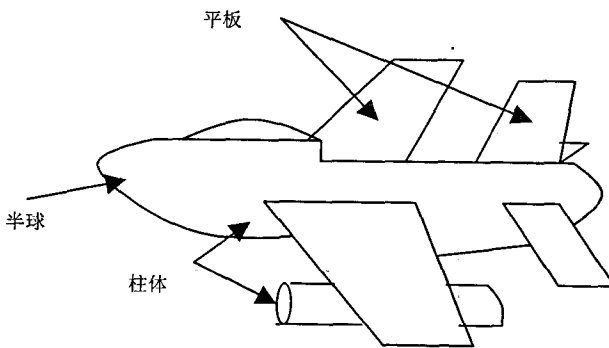


图 1.4.1 由简单的原形目标组成的飞机目标

在目标散射研究中,一般会遇到几种散射机理:

**反射:**该散射机理产生最大的散射,一般由平板类目标产生。此外当多平面存在时,可能存在多次反射,如入射波照射到机身,反射到机翼,最后反射回雷达天线。

**绕射场:**绕射场由目标表面的不连续性产生,如边缘和顶点。该类散射的强度远小于



反射,但该类散射可以出现在很大的角度,当镜面反射较弱时,绕射场的贡献将会十分明显。

**表面波:**光滑、线状散射体表面的爬行电流产生的散射现象,如细导体圆棒、长椭球体等目标的散射。

**凹形区域散射:**又称为波导模散射,当入射场进入一部分封闭的散射结构时产生的散射现象。典型的凹形散射体为三面角、飞机的进气道等。

在散射计算中,以上的几种散射机理往往是联系在一起的,如反射信号反射到边缘产生绕射场,绕射场进入腔体再散射。

## § 1.5 雷达目标高频散射机理

在电磁散射问题中,当物体的尺寸远大于电磁波(在微波波段,对于一般的军事目标,这一条件是成立的)的波长时,电磁波与物体的相互作用就显出“局部”特性,而与物体的形状密切相关,这就是高频散射场的局部性特征,高频方法预估技术的简单性正是基于这一事实。雷达截面手册第二卷中<sup>[16]</sup>给出了7种散射机理,这些机理的组合形成一个复杂目标的 RCS 特征。这些机理包括:(1)镜面反射;(2)表面不连续性散射,如边缘,拐角和尖端;(3)表面导数不连续性的散射;(4)爬行波或阴影边界的绕射;(5)行波散射;(6)凹形区域散射,如腔体,二面角和三面角;(7)多次散射。

电大散射体,往往由许多散射中心组成,按 RCS 的幅度将这些散射中心进行分类:

1) 最强的散射源由平板,柱面上的亮线,腔体等产生,这些散射构成了散射图的主瓣;

2) 几何光学反射和边缘绕射场对散射图构成的贡献其次;

3) 从边缘,顶点和细导线端点的散射的球面波对散射图贡献最小。

图 1.5.1 中给出了某一型号飞机散射中心的分布图:

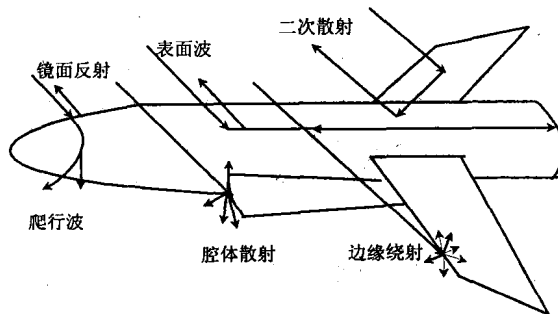


图 1.5.1 散射中心对 RCS 的贡献<sup>[15]</sup>

上述射线并没有揭示复杂目标散射场中的全部分量。在总散射场中,谐振散射在某些角度上往往会成为 RCS 的主要贡献<sup>[46~48]</sup>。该类散射的产生,一是由于散射波的等相