

雷达极化信息处理 及其应用

Radar Polarization Information Processing
And Application

庄钊文 肖顺平 王雪松 著



國防工業出版社

第一章 绪 论

本章简要评述国内外学术界在雷达极化信息处理研究领域,具体包括检测、最优化/信号增强、杂波抑制及目标识别等方面所做的工作。

1.1 引 言

自雷达问世以来,尤其是在过去的 30 多年里,雷达测量系统的应用范围迅速扩大,同时其结构和性能也发生了巨大而深刻的变化。早期雷达系统,其目的主要用来检测目标是否存在,这在二次世界大战期间因为防空的需要尤显突出。而现代雷达,为了满足现代战争所提出的更高要求以及适应航天和遥感科技发展的需要,其结构上的复杂程度较早期雷达大为增加,同时其性能也更为优良,它不但比早期雷达能检测到更远距离的目标,而且具有精确测定诸如目标速度及位置等重要信息的能力。正在大力开发研究的下一代雷达测量系统,不但在参数测量性能上优于现代的雷达,同时还将具有认知目标,即对目标进行可靠分类/识别的能力,标志着雷达系统将由传统的参数测量向特征(非参数)测量的更高阶段迈进。尽管如此,有关目标散射波中信息的利用,到目前为止,还主要限于其幅度、相位、频移和波形,很少涉及极化信息的利用。

雷达目标散射信号中的极化信息在目标检测、增强、滤波及识别中有着巨大的应用潜力,但对这一信息资源的研究开发深度和广度还远不能与其重要性相称,主要是由于雷达目标极化散射机理难以揭示,以及极化测量将大大增加雷达系统的复杂性、技术实现十分困难且造价昂贵,这些因素严重阻碍了雷达极化信息处理

理论与技术的发展。尽管如此,该领域经过几十年的徘徊发展,在已完善的电磁波极化表征基础上,针对窄带雷达体制,已在诸如改善信号杂波功率比、电磁逆散射、增强目标检测和鉴别能力等方面取得了一批极具学术价值的研究成果。

当今复杂、多变的战场电磁环境对雷达探测系统性能提出了越来越高的要求,宽带多极化已成为新一代雷达扩大信息来源、提高探测性能的主要发展趋势。近十几年来,随着雷达极化测量基础理论、技术及宽带技术的逐步成熟并投入实用,开展宽带极化雷达体制下目标检测、增强、滤波及识别方面的研究已有现实基础,雷达极化信息处理正日益引起当今国内外学术界的浓厚兴趣和高度重视。

1.2 目标雷达特性及其描述

长期以来,目标雷达特性^[1~37]的研究由于各种条件的限制只限于对其有效散射截面的研究。然而,对结构和性质各异的不同目标,笼统地用一个有效散射面积来描述,就显得过于粗糙。随着航空与宇航技术的发展、雷达技术的进步以及现代战争的需要,要求获得更多的目标特征信息,如目标散射的幅度特性、相位特性及极化特性等。这些信息对于目标识别与分类、雷达对抗、飞行器隐身及雷达反隐身等都有重要的意义,同时它对现代雷达系统,尤其是对新一代智能雷达系统的理论、体制的形成及其技术的进步,以及优化设计具有强生存能力的飞行器等,都有十分重要的指导意义。基于这些原因,飞行器雷达特性的研究已成为热门课题,国内外许多相关领域专家致力于该领域的研究,不断地披露了大量的研究成果。

雷达发射的电磁波在目标表面感应面电流而进行再辐射,从而产生散射电磁波。散射波的性质不同于入射波的性质,这是由于目标对入射电磁波的调制效应所致。这种调制效应由目标本身的物理结构特性决定,不同目标对相同入射波具有不同的调制特性。

也就是说,散射波含有关于目标的物理结构信息,它是目标信息的载体。一个电磁波可由幅度、相位、频率以及极化等参量作完整的表达,分别描述它的能量特性、相位特性、振荡特性以及它的矢量特性,而目标对电磁波的调制效应,就体现在调制其幅度、相位、频率以及极化等参量上。散射波的幅度特性、相位特性、频率特性及极化特性与入射波相应参量特性之间的差异,就成为获得目标散射信息乃至进一步提取用于目标分类/识别特征的重要依据。

对目标雷达特性作完整的描述,需要获得目标在整个频率轴上散射的能量特性、相位特性、极化特性等。研究目标雷达特性,就是要揭示电磁波与目标相互作用时表现出来的目标物理结构特性,如目标大小、结构、几何形状、材料属性及所处状态等与雷达信号参量之间的关系。

目标雷达特性首先取决于目标尺寸和雷达波长间的关系。历史上第一次出现的目标雷达特性描述是在实际中已广泛应用的描述目标能量特性的雷达散射截面(RCS)。电磁散射理论表明,目标雷达散射截面(取对数刻度)按照目标电尺寸(目标尺寸与雷达波长之比)可粗略地划分为3个散射区:瑞利区(目标尺寸远小于雷达工作波长)、谐振区(目标尺寸与雷达工作波长在同一个数量级上)和光学区(目标尺寸远大于雷达工作波长)。在瑞利区,雷达散射截面是频率的近似线性函数。这一区域的目标可以看作为一个点散射源,目标上的感应电流在整个表面(阴影区除外)被同相激励,除了幅度(极化给定)信息外,没有其它信息可供利用,因此,它仅能提供诸如目标尺寸和目标体积的粗糙信息。在谐振区,目标散射主要由表面波(爬行波和行波)决定,由于各个散射场分量之间的干涉现象,目标雷达散射截面随频率而迅速变化,产生交替出现的大量尖峰和凹谷的回波特征,而尖峰出现处是相应雷达工作频率与目标固有频率产生谐振的结果。因此谐振区可以揭示目标固有的频率结构。由于良导体目标可以视为线性网络,所以目标固有的频率结构通常又称为目标的极点。在瑞利和谐振区域内,试图描述几何形体的目标描绘子在某种程度上是失效的。而在光学

区,多数目标的雷达散射截面趋于常值。这一区域目标散射场的主要分量是镜面反射和破口段(目标边缘、棱角、端部等)的场,这些场分量由目标被照射表面上的强散射点决定,而它们之间的互耦又可以忽略,那么总的散射场近似为这些强散射点决定的散射场之和。因此,与瑞利和谐振区不同的是,光学区雷达目标的散射电磁波中包含了目标本身精细几何结构和内部材料构成信息。

其次,目标散射特性还与雷达发射的探测信号频谱宽度密切相关。在谐振区,探测信号的频谱宽度直接决定了能获得的目标极点数目。一般来说,目标的自然谐振频率是大量的,探测信号频谱越宽,被激励出的目标极点数就越多,对目标固有谐振的刻画就越细致。研究表明,目标极点对目标形状结构的细微变化非常敏感,那么探测信号频谱越宽,以极点为基础的不同目标散射特性的差别就表现得越明显。而在光学区,目标散射只是一个局部行为,这使得复杂目标散射时的幅度特性在宽带探测信号下具有非常直观的表现形式。众所周知,雷达对目标的距离分辨率与发射信号带宽成反比,当距离分辨单元远小于目标径向尺寸时,目标连续占据多个距离单元,形成了一幅在视线距离上投影的目标幅度图像,简称目标距离像,图像中有多个尖峰,它们是目标表面上不连续点以及目标边缘、棱角、端部等强散射点部位的散射,而目标其它部位的散射相对来说较弱,体现在图像中就是低凹处。目标距离像又称为目标径向散射中心分布,它们反映了目标精细的结构特征。这里需要着重提一下,以谐振区目标极点及光学区目标散射中心的概念为基础,可以建立相应区域中的目标参数模型,分别称之为固有谐振模型(极点模型)和散射中心模型(闪烁点模型)。参数模型的具体含义是,目标利用一组有限的参数集来描述,且这组参数的数量在离散情况下比时间信号及谱函数的读数要少得多,那么目标的散射特性就具体体现在模型的参数上。与参数模型对应的是非参数模型,相应的目标散射特性就体现在这一类模型的特性上。

再者,目标散射特性还取决于雷达发射信号的极化方式。电磁传播的向量过程及电磁散射的极化性,是电磁物理早已披露的基

本事实。早在雷达技术发展初期,人们就已经认识到,一般目标具有改变探测信号极化方式的特性,并且在实验中发现了描述目标能量散射特性的目标有效散射截面对于探测信号极化方式的依赖。之后很长的一段时期内,由于极化与目标相互作用的机理始终没有搞清楚,以及极化测量将大大增加雷达系统的复杂性,技术上实现起来十分困难并且造价昂贵,这一系列因素使得有关极化领域的研究一度徘徊不前。直到目前,雷达极化理论体系业已初步形成,而相应的极化测量技术也逐步完善起来。在理论上,定义了电磁波极化参数描述符,它们将非常抽象的极化现象引到了代数学的二维和三维的直观描述空间,从而确定了极化域。一个极化状态,可以用极化椭圆来描述,而极化椭圆的性质,又由其几何参数如倾角 τ 、椭圆率角 ϵ 及旋向来决定;同时由倾角 τ 及椭圆率角 ϵ 可以建立极化状态平面图— (ϵ, τ) 图^[9]。在线极化基和圆极化基上分别定义的线极化比和圆极化比也是描述极化状态的有效手段,由于它们在一般情况下为复数,因而可以建立描述极化状态的复极化状态平面图^[10]。但是,平面图有归一化效应及对于极化比模值存在奇异点的问题,复平面图含有无穷多个被排除的点,这些缺陷使得(复)平面图用于描述极化状态时是不完善的^[3]。而由极化状态的斯托克斯(Stokes)矢量描述符引出的 Poincare 极化球^[11],它将极化状态和球面点之间建立了一一对应关系,而且不存在(复)平面图的缺陷。与此同时,定义了极化散射矩阵的概念^[12]。我们知道,雷达散射截面是一个用于描述目标电磁波散射效率的量,它只表征了雷达目标散射的幅度特性,缺乏对于诸如极化和相位特性之类目标特征的特征。而极化散射矩阵的引入,将目标散射的能量特性、相位特性和极化特性以统一、紧凑、直观而方便的形式表达出来。极化散射矩阵完整地描述了雷达目标电磁散射性能。一般来说,散射矩阵具有复数形式,它随雷达工作频率与目标姿态而变化,对于给定的频率和目标姿态,散射矩阵表征了目标散射特性的全部信息。以极化散射矩阵为基础的各种目标极化特性的描述方法应运而生。Kennaugh^[13]在1952年提出了最佳极化的概念,它

主要是针对单静态条件、互易及相干情况而言的。Kennaugh 的最佳极化有两对共 4 个,即一对使雷达共极化接收电压为 0,称为零极化;另一对使共极化接收功率达到极值,称为特征极化,有时也称本征极化。到了 60 年代,Huynen 发展了 Kennaugh 的目标最佳极化概念,他利用 Poincare 极化球和极化的 Stokes 矢量表征法,导出了著名的 Huynen 叉(也称 Huynen 极化叉)的概念^[14],其具体含义为:在 Poincare 极化球上,上述 4 个 Kennaugh 最佳极化刚好形成了一个叉形,其中一对特征极化位于球上一条直径的两端,构成了 Huynen 叉的叉轴,而这条直径恰好平分两个零极化所夹的球心角,这一对零极化构成了 Huynen 叉的叉齿;Huynen 进一步地利用唯象学方法研究了这 4 个最佳极化,给出了它们的唯象学参数表征。至 80 年代初期,Boerner 所领导的研究小组^[153,154,155]以及喷气推动实验室(JPL)的 Van Zyl^[156]几乎同时将目标最佳极化的概念推广到一般的双静态、非互易及非相干情况,他们利用电磁波的 Stokes 矢量和部分极化情况下雷达目标的 Mueller 矩阵表征法,研究了一般情况下雷达目标的最佳极化问题。研究表明,在通常情况下,Huynen 极化叉将不再存在,这时出现了 6 个最佳极化,并且它们中的任意两个在 Poincare 极化球上未必对称,同时,也不能保证存在着使接收功率为零的极化。上述关于最佳极化的研究实际上都是针对目标的共极化接收功率而言的。Boerner 等人还研究了交叉极化接收情况下的最佳极化问题,结果表明,在单静态、互易及相干情况下,目标共有 5 对最佳极化,它们分别是:一对共极化零点(即 Kennaugh 的零极化)、一对共极化极值点(即 Kennaugh 的特征极化)、一对交叉极化最大点,以及一对交叉极化鞍点,而其中的交叉极化零点刚好就是共极化极值点,因而目标实际上共有 4 对最佳极化,Boerner 根据这 4 对最佳极化在 Poincare 极化球上分布的几何关系,提出了极化树的概念,显然极化叉是极化树的一个子集。这里值得说明的是,长期以来,人们习惯于使用目标的“零极化”、“特征极化”或者“本征极化”这样的名词,但随着最佳极化概念的拓广,这些名词往往容易使人产生混

淆。譬如,零极化原指目标的共极化零点,但随着交叉极化零点概念的提出,零极化的概念就变得模糊起来;另外,Kennaugh 最佳极化中的一对“特征极化”或者“本征极化”,实际上是指目标的一对共极化极值点,而 Boerner 等人的研究表明,这对“特征极化”或者“本征极化”实际上是目标散射矩阵的一对伪本征极化矢量,同时它们还是目标 Graves 功率矩阵的特征极化矢量。显然这些名词的相互重叠和交叉给读者造成了极大的不便,为此,本书将沿用 Boerner 等人的提法,即使用“共极化零点”、“交叉极化极值点”这样的名词,而不再使用“零极化”、“特征极化”或“本征极化”这几个含混的字眼。不过,作为一个例外,“伪本征极化”的提法是可以保留的,因为它确实对应着散射矩阵的 Kennaugh 伪本征值方程,并且它的适用范围十分有限,不会让读者产生歧义。另外,在单静态、互易及相干测量条件下,功率散射矩阵的本征极化或辛克莱散射矩阵的伪本征极化与最佳接收的意义是一致的。Huynen^[14]在其博士论文中对一般目标的极化散射特性作了比较充分的论述,在该文中,5个源于散射矩阵准特征问题的独立参数($m, \phi, \tau, \nu, \gamma$)被用于目标极化特性的描述,这种描述建立起了各独立参数与目标物理特征之间的关系,即

- m ——目标幅度,是目标大小或雷达截面的测度;
- ϕ ——目标方位角,是目标围绕雷达视线的方位度量;
- ν ——目标跳跃角,与目标回波信号跳动次数有关;
- τ ——目标螺旋角,度量了目标的对称性;
- γ ——目标特征角,是目标呈线状或呈球状程度的度量。

按照这样的描述方法,可将目标粗略地划分为线状目标、球状目标、对称目标、螺旋目标与其它目标类等。得到了一些与极化旋转或目标绕视线旋转无关的极化不变量^[15],如散射矩阵行列式的值、散射矩阵的迹、功率散射矩阵行列式的值、功率散射矩阵的迹、去极化系数、本征(特征)极化以及零极化等。这些极化不变量对于描述目标的整体极化特性是非常重要的。文献^[2]指出了极化不变量与目标物理结构特性所具有的简单对应关系,即散射矩阵行列

式值粗略地反映了目标的粗细或“胖瘦”，功率散射矩阵的迹表征了全极化下的目标 RCS 值，它大致反映了目标的大小，而本征极化椭圆率是表征目标对称性的一个物理量，其倾角则表征了目标特定的俯仰姿态。研究得到了多种对于目标精密物理结构特征的极化描述方法。一般来说，极化散射矩阵只是反映了目标宏观极化散射特性，在宽带条件下，对它的进一步处理还可以得到目标局部极化散射特性的描述。研究表明，光学区极化散射矩阵反映了目标镜面曲率差等精密物理结构特性。因此，通过极化散射矩阵分解以获得目标局部极化散射特性就成为人们关注的焦点之一。Foo 及 Boerner 等人在他们的研究中^[16,17]，通过 Huynen 代数方法建立了 M 矩阵与 S 矩阵之间的关系，把 Mueller 矩阵的极化描绘子用目标镜面曲率差加以表示。文献^[18]提出的目标极化分解定理，将目标的 Mueller 矩阵分解为 M 平均矩阵及 N 剩余矩阵，从而可以定量得到目标的外形综合特性和曲率以及目标表面扭曲等局部特性。Cameron 等人^[19]在他们的方案中，把目标看成很多简单散射体的组合，并把这些散射体划分为非互反性散射体、右螺旋体、左螺旋体、非对称散射体和对称散射体。总之，目标极化特性的描述方法还在不断出现。目标作为极化变换器，研究它的极化变换行为，可以获得目标材料特性（如材料属性及其粗糙度等）以及目标几何图形信息（如目标取向及对称性等），这是从探测信号其它被目标调制的参数中所得不到的目标信息。正因为这样，目标极化特性的研究已越来越引起人们的重视。就目标识别而言，全极化技术和高分辨率识别技术的结合，可以展示更为广阔的应用前景^[20]。在极化测量技术实现上，也取得了引人注目的研究成果。双极化测量系统，典型的有去圆极化比雷达(CDRR)^[21]和相异线极化雷达(DLPR)^[22]，已经在雷达测量领域扮演着十分重要的角色，它不但能够测得散射体的极化散射特性，同时还可以利用它的这一性能优势，即利用不同散射体之间相异的去极化行为，增强雷达在空中微结构凝聚物分析、水文气象类判别等多方面的能力。这方面的内容主要体现在 Hendry 和 Mc Cormick^[21,23~29]以及 Seliga 和

Bringi^[22,30,31,32]等人的研究工作中。Hendry 和 Cormick^[21]提出的 CDRR 技术,是利用了双极化接收通道上的圆极化天线,测量参数按照平均斯托克斯定义散射波的极化状态,进而作一些有关的测量。而由 Seliga 和 Bringi^[22]提出的 DLPR 技术则是基于在正交线极化条件下对不同反射系数的测量,水平和垂直极化交替发射,共极化回波作相应的测量。美国佐治亚州立工学院进一步作出了相关领域的贡献,在那里,发展了波形极化编码的概念并获得了应用^[33,34];另外,关于极化调制雷达的研制及其在不同领域的应用研究也取得了长足的进展^[35,36]。1982年, Cohen 和 Sjoberg^[37]报道的实验型脉内极化捷变雷达(IPAR)系统是在子脉冲基础上对其发射脉冲进行右旋(RC)和左旋(LC)极化编码并利用此调制来实现接收时的脉冲压缩,其原理为:发射波形是通过水平和垂直通道之间的相对相位从 $+90^\circ$ 转换为 -90° 来产生的,并按预先储存的二进制码以高达 100MHz 的速率进行转换,信号被放大后,便经双极化馈源向外发射脉冲调制的载波,此载波在子脉冲的基础上还被极化调制;和发射时一样,接收时也采用两个通道,信号经变频降低频率后加到相对相检器上,由之提取接收的极化调制码,然后将获得的信号在高速(100 MHz)相关器中进行压缩。1984年,同是 Cohen 和 Sjoberg^[34],他们所研制工作于 X-波段的 I-PAR 雷达已经具有更快速度极化切换开关,能够产生次脉冲长度达到 10ns 的编码脉冲。

另外,目标所处的静止或运动时的状态特性,也是研究目标雷达特性所必须考虑的重要方面。

综上所述,要想对目标散射特性作完整的刻画,需要雷达信号有覆盖目标瑞利区、谐振区和光学区的无穷带宽,同时为了获得目标的极化信息还需雷达具备变极化以及相位测量技术。而对一部具体雷达来说,由于对接收系统线性动态范围、变极化、幅度与相位标定精度等要求不一样,因此要求它完成的功能只能有所侧重,它只能提供目标有限一部分的散射信息。正是因为实际应用中雷达体制的差异,加之信号处理方法所决定的目标散射特性描述的

不同角度,它们一起决定了目标散射特性的研究呈现多样化的方式。

1.3 极化检测、增强、滤波处理技术

如何有效地抑制干扰、改善信号接收质量,一直是雷达、通信、导航等应用领域中特别引人关注的问题。雷达传感器系统的抗干扰措施大体上分为两大类:一类是在进入接收机以前,尽量对干扰进行排除、抑制和削弱,并同时提高有用信号的电平;另一类是在进入接收机以后,利用干扰与信号在波形、频谱结构等方面的差异进行区分,从而进一步抑制干扰。这两类抗干扰措施都可以归结为滤波问题。有关该领域的研究,已经形成了包括时域、频域、时频域、空域滤波的较为完善的理论体系,相应的各种滤波算法实现技术也十分丰富。

而极化域滤波,由于受全极化雷达测量系统发展缓慢的制约,使得几十年来有关的理论和技术研究始终没有取得实质性进展,近年来,随着人们对目标极化散射行为的本质认识日益加深,并且在极化捷变和分集技术的工程实现上取得了突破并趋于完善,有关极化信息在目标极化检测、干扰抑制、信号增强与滤波^[38~57]等方面的研究已有现实基础,并正在逐渐成为热门研究课题。

雷达对目标回波信号的检测,通常只利用了它的幅度信息,只要目标回波幅度在起伏过程中能超过由背景噪声或杂波所决定的门限,目标就有可能被检测到,即有一定的检测概率。目标回波的极化检测,是利用目标和其环境各自不同的极化散射特性,在一定信噪比或信杂比的情况下提高目标的检测概率,或在一定的目标检测概率下降低所需信杂比。极化检测技术将有助于雷达对弱目标的探测。在最佳极化检测器的研究中,美国林肯实验室的 Chaney R D 等人^[38]首先认为中、低分辨率雷达回波中包含了多个不同散射体的不同散射波的叠加,目标回波矢量和杂波矢量都可以近似认为服从零均值的复数高斯(Gauss)型概率分布,另外

其中的二次型数值计算要求预先知道目标和杂波的协方差矩阵。此检测器充分考虑了回波中的所有极化信息,包括各极化分量的概率分布,因此它所能获得的检测性能,决定了各种极化检测器性能的上限。从原理上讲,它同所谓的极化匹配滤波器是等效的。但是最佳极化检测器的问题在于,它需要利用目标与杂波协方差的先验知识,并且协方差矩阵中各极化分量之间不相关以及目标回波与杂波矢量为高斯分布的假设不全符合实际,这使得最佳极化检测器的实现变得非常复杂和困难,因此相继提出了诸如恒等性似然比检测器、极化白化滤波器、极化恒虚警检测器、张成检测器、功率最大化合成检测器等几种简化的极化检测算法^[39~41],虽然其检测性能难以达到最佳极化检测器的检测性能,但比不使用极化信息的单通道检测器性能要好。考虑到目标回波和杂波实际上都是部分极化波,Pottier 和 Saillard 还研究了基于斯托克斯矢量估计的极化检测器^[42]。总之,加入极化信息处理技术以后,检测性能平均能改善 6~10dB^[43];Giuli 研究指出^[44],采用极化处理后的得益,对低检测概率目标要比其它目标更高些。

Kostinski 和 Boerner 在目标回波极化增强、滤波(指在一定的噪声或杂波背景下,选择适当的雷达发射极化和接收极化,使目标回波最强,或目标回波信杂比最大)的研究中,针对无噪/杂环境中非时变目标(回波是完全极化波)回波的极化增强问题,于 1985 年提出了著名的求解最佳极化的三步法原理^[9];当存在杂波时,为使信杂比最大,他们又于 1987 年提出了解决此问题的扩展三步法原理^[46],其思路是:寻求最佳的发射极化状态使目标回波功率与杂波功率之比最大,然后计算此时的杂波极化状态,再调整接收极化状态使之与杂波极化失配(正交),此时收发极化组合即是最佳的。针对无噪/杂环境中时变目标(回波是部分极化波)回波在统计意义上的极化增强问题,两位学者提出将部分极化波分解为一个完全极化波和一个未极化波之和,由于对未极化波而言,任意一部天线的接收功率都等于该未极化波平均功率的一半,因此只需对其完全极化的部分按三步法进行演算,便可求出目标的最佳极化;

Van Zyl 等人于 1987 年进一步研究指出^[47],在一般的非相干散射情况下,接收的回波功率应该采用斯托克斯矢量和时平均米勒(Mueller)矩阵来表达,而不宜运用琼斯(Jones)矢量和格雷伍斯(Graves)矩阵表示,并针对收发天线极化相同的简单情况作了求解;1988 年 Kostinski 和 Boerner 在 van Zyl 等人解法的基础上进一步解决了雷达收发极化不同情况下的有关问题;当存在杂波时,Tanaka 于 1989 年在 Kostinski 和 Boerner 方法的基础上提出了修正的方法^[48]。

极化滤波在杂波抑制方面也取得了突出的研究成果。由于干扰电磁波有其本身的极化状态,因此可以利用极化技术来加以抑制。对于单个的积极干扰源,其辐射电磁波具有确定的极化状态,那么就可以通过使用与干扰电波极化相正交的雷达接收天线来达到抑制干扰的目的,正交极化接收本身可以看成为一个极化滤波器。改变雷达接收天线极化状态的方式,可以通过改变天线结构、变更馈线内电磁波模式、或者采用双通道合成的虚拟极化适配来实现。需要着重提出的是,虚拟极化适配(Virtual Polarization Adaptation)的概念^[49]是英国学者 Poelman A J 在 80 年代初期提出的,从理论上解决了对稳态目标的变极化观测问题,其核心思想是利用一个脉间极化分集系统,对同一目标进行两次连续的正交极化测量,通过对目标的两次回波进行线性相干组合,即可等效地获得任意的入射极化。根据虚拟极化适配原理提出了多凹口极化滤波^[50,51,52]和单凹口自适应极化滤波技术^[53],可以有效地对抗变极化的积极干扰,此时依靠简单的正交极化滤波技术是行不通的。以上抗干扰的思路都是直接抑制干扰电磁波,这些方法只利用了干扰源的极化信息,而没有考虑有用信号的极化信息,当有用信号与干扰信号的极化状态比较接近时,雷达接收天线对干扰信号和有用信号均会产生很强的抑制作用,从而大大影响了信号接收质量。针对这种情况,文献^[54,55,56]采用信号干扰噪声比 SINR 和信号干扰功率差 PDSI 作为优化目标函数,研究了复杂电磁环境中极化信号的最佳接收问题,这些方法同时利用了干扰信号和有用信

号的极化信息,仿真结果表明,以上两种极化优化方案较好地解决了极化信号的滤波增强问题。

1.4 极化目标识别技术

以 1958 年美国 Barton 教授划时代的实验为开端^[58],人们开始了对雷达智能化的认识和逐步深入的研究,并在理论探索和实验研究方面都做了许多卓有成效的工作,积累了一大批富有学术价值和应用前景的研究成果,这些工作和成果主要体现在:

1. 目标识别机理研究的重大进展。它的主要目的是揭示目标的电磁散射行为,一般称之为目标雷达特性,即目标在被雷达探测条件下表现出来的特性,同时还需建立一套完整的理论体系对目标雷达特性加以描述。它涉及到的基础理论甚广,如电磁逆散射理论、电磁奇异展开、目标引擎调制效应、散射截面起伏、极化变换以及非线性效应等。

2. 目标散射信息获取技术的巨大进步。这主要体现在能获得更多目标信息的高性能雷达测量系统以及高速数据采集系统的研制成功。识别像飞机这样的复杂目标,要想达到目标类内特征的相对稳定性和类间特征的差异性,则有赖于目标的散射信息量,这就对雷达系统和数据采集技术提出了更高的要求。

3. 目标特征的有效提取和利用。信号处理技术,如统计信号处理、数字信号处理、合成孔径处理、子波变换以及模糊信息处理等,在目标分类或识别的关键环节,即特征提取方面提供了许多各具特色的有效途径,而模式识别技术,如统计模式识别、结构模式识别、数据融合、人工神经网络、模糊模式识别以及人工智能与专家系统等,则被广泛地应用于目标的分类判决环节。另外,以超大规模集成电路技术为基础的性能优良的高速数字信号处理器的研制成功,为目标的特征抽取和利用提供了高效实时的硬件实现手段,从而加速了雷达目标识别系统迈向实用化、工程化的进程。

实际中的雷达系统,因针对的应用背景不同,决定了它们所要完成的功能侧重面不一样,因而产生了它们工作体制的差异。不同工作体制的雷达,它们各自所能获得的目标散射信息是有很大差别的,而且都只占目标在整个频率轴上全部散射信息的一小部分。因此,对于任何一种雷达目标识别方法,都必须指出其所适用的雷达工作体制。而且,即便是在同一部雷达上,由于有许多种信号处理技术和模式识别技术可以用于目标散射信息的分析、特征提取和利用,因而雷达目标识别的研究方法及实现途径很多,这就决定了雷达目标识别方法是多种多样的。归纳起来,目标识别方法主要有两大类:第一类是基于特征量表征的目标识别方法,其核心内容是用特征矢量来表示目标,并按照模式识别中描述贴近程度的距离及相关性度量来设计目标的分类判决器;第二类是基于成像的目标识别方法,其核心内容是各种成像算法,这里所指的目标图像只具表征意义,一般不是我们现实生活中通常意义下的“照相”含义,而目标的识别过程就是对其表征图像的理解过程。另外还不排除在图像基础上进一步提取特征量用于表征目标的可能性。目标识别方法的优劣,主要有两个方面的衡量标准,一是它的有效性,即所提取的目标特征能否达到良好的目标类内的重聚性及目标类间的差异性;二是它的可靠性,即所提取的目标特征或对特征的处理过程能否达到不敏感或能够自适应目标姿态的变化以及目标识别方法所涉及的过程是否具有抗各种扰动的性能。

雷达目标识别作为当今高科技领域的一个重要学术方向,经过近 40 年的发展,已经取得了长足的进展,在积累的一大批研究成果中,“极点”和“散射中心”这两个深刻揭示目标电磁散射机理的概念,分别成为谐振区及光学区雷达目标识别的基石,是雷达目标识别理论体系尚在不断完善过程中所取得的杰出研究成果。极化目标识别作为雷达目标识别的主要研究内容之一,由于极化理论体系本身尚待完善及极化测量在工程实现上的困难,一度阻碍了它的进展,有关这方面的研究还不深入,以至于还没有出现具有指导意义的极化雷达目标识别方法,更谈不上提出像“极点”和“散

射中心”这样分别成为谐振区及光学区目标特征分析基础的基本概念。

本节在介绍极化目标识别技术之前,首先介绍基于极点和散射中心的目标识别方法,一则考虑到“极点”、“散射中心”概念对极化域目标识别的启发意义;二则是希望引起读者对基本概念的高度重视,在极化域目标识别研究领域,需要在基本概念方面做奠基性工作。

“极点”和“散射中心”分别是在谐振区和光学区建立起来的基本概念。几乎与 Barton 划时代的实验同时, Kennaugh 和 Cosgriff^[59]就首次提出了目标瞬态响应的概念,并从系统理论出发,在时域上引入目标的冲击响应函数或在频域上采用相应的频率响应函数来表示目标特征,并在此基础之上,引入了目标的阶跃响应函数和斜升响应函数,它们分别是目标冲击响应函数对时间的一次和二次积分。这两种目标响应函数的引入,得到了目标粗糙物理特性的两个显式解:斜升响应函数对时间的积分等于瑞利散射系数,而瑞利散射系数又与目标体积成正比,可见,斜升响应函数对时间的积分可估计出目标的相对体积;另外,根据物理光学假设,推导出了斜升响应函数与视线上分布的目标横截面积之间的直接关系。由于斜升响应与目标形状之间存在的两个基本关系,使得斜升响应波形可以用作目标的识别特征。所以 Kennaugh 和 Moffatt^[60]在 1965 年首先建议将时域特征信号—斜波响应用于雷达目标识别。Young^[61]在 1976 年应用上述两个关系式,利用瑞利区上端和谐振区低端的雷达目标散射数据,获得了像立方体、多锥台圆柱体等简单形体目标的清晰轮廓图像,并把这种目标图像作为目标识别特征。

在谐振散射区,目标雷达散射截面随探测信号频率产生迅速的消涨变化,出现许多尖峰和低凹的波形特征,尖峰所代表的强散射是雷达工作频率与目标固有频率产生谐振的结果,而全部尖峰处相应频率的集合(其大小由雷达工作频率范围或信号带宽决定)则反映了目标的固有频率结构特性。对于良导体目标而言,它可

以视为线性网络,由此引出了一个与目标固有频率等价的但更为常用的术语,即目标极点。从线性网络理论出发,可以证明,目标极点与目标姿态无关。这是迄今为止所获得的唯一一个用于描述目标散射特性而又与目标本身姿态无关的特征量。正是因为这一突出优势,有关基于极点的目标识别研究引起了人们极大的兴趣,至今不衰。归纳起来,主要有两种研究思路:一种是直接从雷达回波中提取目标极点用作目标特征,而目标识别过程就是将现时提取到的目标极点与库中目标极点进行匹配的过程;另一种是利用目标极点的概念综合出一种特征波形作为目标特征存在库中,而目标识别过程就是直接将接收到的目标回波与库中特征波形进行卷积运算,根据卷积结果的期望输出来判别目标类型。

目标极点的概念出现在 1971 年,其时, Baum^[62]提出了奇异展开法(SEM),表明目标的中后期瞬态响应可以用一些衰减的正弦振荡之和来逼近,启发人们运用极点的概念来表征目标的电磁转移特性。1975 年, Blaricum 和 Mittra^[63]首先提出了直接从一组瞬态响应时域数据来提取目标极点的 Prony 方法。从那时至今,以极点匹配的目标识别过程为出发点,着眼于极点的估算精度以及改善算法的抗噪声能力,就成为上面所指的第一种思路的主要研究内容。Jain^[64]在 1983 年提出了提取目标极点的函数束法(POF 法)以及 Hua^[65]等人在 1989 年提出了广义函数束法(GPOF 法),它们在极点的估计精度以及抗噪声能力方面均优于 Prony 法。以上方法均是从时域出发估算目标的极点。1975 年, Repjar 和 Ksienski^[66]、Lin 和 Ksienski^[67]首先描述了从目标的(多频雷达)频域响应来识别目标的方法;1985 年, Brittingham^[68]等人在 Moffatt 工作的基础上提出了获取目标极点的所谓频域 Prony 法(FDPM 法),表明了依据目标的带限电磁响应数据也可以求出目标的极点集;Ksienski^[69]认识到频域法的目标极点估算精度同样受噪声和杂波的限制,提出了具有改善作用的所谓数据多重组合法。但是,以上述为代表的第二种研究思路的目标识别方法需要实时估算目标极点,而无论是时域的 Prony 法还是后来的 POF 及