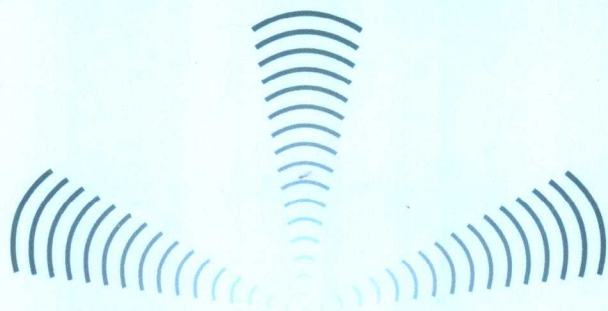


# 雷达极化技术 与极化信息应用

曾清平 主编 闫世强 主审



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 雷达极化技术与极化信息应用

曾清平 主编  
闫世强 主审

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

雷达极化技术与极化信息应用 / 曾清平主编. —北京:  
国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-04213-7

I. 雷... II. 曾... III. 雷达-极化(电子学)-  
研究 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 122880 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海坛桥竹院南路 23 号)

邮政编码 100044

新华书店印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 10.179 千字

2006 年 1 月第 1 次印刷 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 10000 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

# 前 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,这在第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,同时性能也更为优良,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和识别的能力,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。

长期以来,目标雷达特性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。雷达发射的电磁波在目标表面感应电流而进行再辐射,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。

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。因此,目标在电磁波照射下,存在着变极化效应,也就是说,目标散射场的极化取决于入射场的极化,但通常与入射电磁波的极化并不一致,目标对入射电磁波有着特定的极化变换作用,其变换关系由入射波的频率、目标形状、尺寸、结构和取向等因素决定。

当前,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  $\tau$ , 椭

圆率角  $\epsilon$  及旋向来决定;同时由倾角  $\tau$  及椭圆率角  $\epsilon$  可以建立极化状态平面图  $-(\epsilon, \tau)$  图<sup>[1]</sup>。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。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。而由极化状态的 Stokes 矢量描述符引出的 Poincare 极化球,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<sup>[3]</sup>。

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 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 20 世纪 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 叉的概念(也称 Huynen 极化叉),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 20 世纪 80 年代初期,Boerner 所领导的研究小组<sup>[5~7]</sup>以及喷气推动实验室(JPL)的 Van Zyl<sup>[8]</sup>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。

Huynen<sup>[1]</sup>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地论述,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;
- $\phi$ ——目标方位角,是目标围绕雷达视线的方位度量;
- $\nu$ ——目标跳跃角,与目标回波信号跳动次数有关;
- $\tau$ ——目标螺旋角,度量了目标的对称性;
- $\gamma$ ——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<sup>[1]</sup>,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[1]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。Foo 及 Boerner 等人在他们的研究中,通过 Huynen 代数方法建立了  $M$  矩阵与  $S$  矩阵之间的关系,把 Mueller 矩阵的极化描述子用目标镜面曲率差加以表示。文献[12]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。

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,典型的有圆极化比雷达(CDRR)和相异线极化雷达(DLPR),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 Cormick 以及 Seliga 和 Bringi 等人的研究工作中。Hendry 和 Cormick<sup>[14]</sup>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 Stokes 定义散射波的极化状态,进而做一些有关的测量。而由 Seliga 和 Bringi 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;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。1982年, Cohen 和 Sjoberg<sup>[1]</sup>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 $-90^\circ$ 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,由其提取接收的极化调制码,然后将获得的信号在高速(100MHz)相关器中进行压缩。1984年,同是 Cohen 和 Sjoberg,他们所研制的 X 波段的 IPAR 雷达已经具有更快速度的极化切换开关,能够产生次脉冲的长度达到 $10n\mu$ 的编码脉冲。

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 R. D. Chaney 等人首先认为中、低分辨率力雷达回波中包含了多个不同散射体的不同散射波的叠加,可近似认为目标回波矢量和杂波矢量都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公布,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、功率最大合成检测器等几种简化的极化检测算法,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 Sallard 还研究了基于 Stokes 矢量估计的极化检测器。总之,加入极化信息处理技术以后,检测性能平均能改善 6dB ~ 10dB;Giuli 研究指出<sup>[24]</sup>,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,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,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,在一般的非相干散射情况下,接收的回波功率应该采用 Stokes 矢量和时平均 Mueller 矩阵来表达,而不宜运用 Jones 矢量和 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 Kostnski 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<sup>[28]</sup>。

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<sup>[29]</sup>是英国学者 A. J. Poelman 在 20 世纪 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和单凹口自适应极化滤波技术,可以有效地对抗变极化的积极干扰。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,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。

为直接研究极化信息的利用,许多极化雷达已被研制出来。从国际来看,极化雷达的作战部署越来越多,下面列举几种国外已报道过的极化雷达。

美国:NASA 的 JPL/CV—990 多波段(L, C, X)极化合成孔径雷达;

陆军导弹司令部的 Ku 波段极化雷达;

空军 RADC 的 S 波段极化跟踪雷达。

英国:SERC 的 CHILBOLTON S 波段极化雷达。

德国:DFVLR 的 POLDIRAD C 波段极化气象雷达。

加拿大:NRCC 的双波段(S, C)极化雷达。

意大利:由航管雷达 ATCR - 33 改装成的 S 波段 GPM - 500C 极化多普勒雷达。

日本:Ku 波段极化雷达。

由于极化雷达直接用于军事目的,国外对极化雷达技术实行了很严格的保密。虽然我们起步较晚,起点较低,但一些专家学者看准了极化雷达在战争中的重要作用,也正在努力追赶。在理论研究上,不少专家、院士介绍了他们在极化信息处理领域的理论研究成果和极化技术上的研究成果。在工程研制方面<sup>[6]</sup>:1997 年空军 XX 学院在 XXX 雷达上加装变极化器,实现圆极化变换用以抗气象干扰;1999 年空军 XX 学院立项“变极化抗干扰设备”,实现 14 种极化变换用以抗有源干扰;2002 年空军 XX 研究所立项“XXX 雷达变极化改造”,实现

12种极化变换用以抗有源干扰。

虽然我国这些单通道极化变换系统还不是真正意义上的极化雷达,存在着许多不足之处,但这些有益的尝试促使有关科研部门在理论研究和技术开发上解决了部分技术问题。这些技术问题的解决,有利于朝着双通道自适应极化捷变系统的工程实现方向发展,特别是极化捷变技术、极化识别技术与极化实时测量技术的实现,将雷达极化系统推向能对电磁环境自适应的极化捷变研究领域。

未来战争,特别是高技术条件下的局部战争,电子战将首当其冲。面对复杂、多变的战场电磁环境,战争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,并致力于利用极化信息来研制极化雷达解决当前雷达面临的四大威胁和提高雷达的检测能力。

本书着眼于极化技术和极化信息在电子战中的应用研究,系统地分析和总结了这两方面的科研学术成果。由于编者水平有限,书中错误难免,还望读者批评指正。

# 目 录

第一章 电磁波极化状态的描述 .....	1
1.1 完全极化电磁波及其表征 .....	1
1.1.1 完全极化电磁波及其 Jones 矢量 .....	1
1.1.2 极化椭圆 .....	2
1.1.3 Stokes 矢量 .....	3
1.1.4 Poincare 极化球 .....	5
1.2 部分极化电磁波及其表征 .....	6
1.2.1 部分极化波的相干矩阵 .....	6
1.2.2 部分极化波的 Stokes 矢量 .....	8
1.2.3 极化度与部分极化波的分解 .....	9
第二章 极化技术的理论基础 .....	11
2.1 极化电磁波的发射与接收 .....	11
2.1.1 天线的极化 .....	11
2.1.2 极化电磁波的接收与极化匹配系数 .....	12
2.2 目标极化散射特性的表征 .....	13
2.2.1 散射坐标系与极化基 .....	13
2.2.2 极化散射矩阵 .....	15
2.2.3 Mueller 矩阵技术基础 .....	16
2.2.4 Kennaugh 矩阵技术基础 .....	18
2.2.5 极化合成技术基础 .....	19
2.3 目标最佳极化 .....	20
2.3.1 目标回波功率密度最优化 .....	21
2.3.2 目标回波接收功率最优化 .....	22
2.3.3 极化叉和极化树 .....	25
第三章 极化技术 .....	27
3.1 散射矩阵测量技术 .....	27
3.2 极化识别技术 .....	29
3.3 极化对消技术 .....	30

3.4	极化自适应技术 .....	33
3.5	极化检测技术 .....	34
3.6	铁氧体移相技术 .....	36
3.7	极化捷变技术 .....	39
3.8	矢量处理技术 .....	43
<b>第四章</b>	<b>自适应极化捷变系统设计 .....</b>	<b>45</b>
4.1	设计思想 .....	45
4.2	系统设计 .....	47
4.3	系统工作过程 .....	49
<b>第五章</b>	<b>极化系统抗有源干扰原理 .....</b>	<b>54</b>
5.1	正交极化抗有源干扰原理 .....	54
5.1.1	极化纯度分析 .....	54
5.1.2	正交抗干扰原理 .....	59
5.2	极化凹口抑制滤波抗干扰原理 .....	63
5.2.1	极化凹口抑制滤波器组成 .....	64
5.2.2	抗干扰初步原理 .....	65
5.3	极化检测优化抗干扰原理 .....	66
5.3.1	相干情况下目标的极化滤波增强 .....	66
5.3.2	部分极化情况下目标的极化滤波增强 .....	68
5.3.3	有源干扰环境中目标的极化滤波增强 .....	69
<b>第六章</b>	<b>极化信息抗气象干扰原理 .....</b>	<b>73</b>
6.1	雨滴极化散射特性 .....	73
6.2	雾滴极化散射特性 .....	76
6.2.1	雾滴的后向散射特性研究 .....	76
6.2.2	海雾的后向散射特性 .....	78
6.3	多凹口逻辑乘积极化抑制滤波器的设计 .....	79
6.3.1	多凹口逻辑乘积极化抑制滤波器描述 .....	79
6.3.2	设计理论 .....	80
6.3.3	滤波器的设计 .....	87
<b>第七章</b>	<b>极化信息反低空突防原理 .....</b>	<b>91</b>
7.1	杂波零极化处理 .....	91
7.1.1	地杂波与海杂波特性 .....	92
7.1.2	杂波零极化处理 .....	93
7.2	地空目标散射功率优化处理 .....	96

7.3	信杂比最大优化处理 .....	99
7.4	天线极化自适应 .....	103
7.5	虚拟极化自适应 .....	104
<b>第八章</b>	<b>极化信息反目标隐身原理 .....</b>	<b>106</b>
8.1	共零极化和接收零极化 .....	106
8.2	隐身目标的微弱信号检测 .....	108
8.2.1	利用虚拟自适应双通道极化系统反隐身方法 .....	108
8.2.2	利用极化技术增大目标的 RCS 和反隐身 .....	115
<b>第九章</b>	<b>极化信息提高目标识别可靠性原理 .....</b>	<b>117</b>
9.1	极化特征提取与目标识别技术 .....	117
9.1.1	极化比和交叉极化比特征提取 .....	117
9.1.2	基于瞬时 Stokes 矢量的特征提取 .....	120
9.1.3	基于散射点回波功率的特征提取 .....	121
9.2	极化平面的目标识别技术 .....	122
9.2.1	目标极化散射特性的 $(\epsilon, \tau)$ 平面图描述 .....	122
9.2.2	目标极化特征提取 .....	123
9.3	伪本征极化的目标识别技术 .....	126
9.3.1	雷达目标的伪本征极化 .....	127
9.3.2	目标回波趋向伪本征极化的特性 .....	128
9.3.3	目标回波趋向伪本征极化特性的特征提取与识别 .....	129
9.4	零极化目标识别技术 .....	132
9.5	基于极化倾角稳定度的目标识别研究 .....	136
9.5.1	目标极化散射特性 Poincare 极化球面描述和特征提取 .....	137
9.5.2	目标识别系统考虑 .....	140
9.6	目标识别系统设计及识别结果 .....	141
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>144</b>

# 第一章 电磁波极化状态的描述

本章简要概括了有关的基本场方程，引出电磁波极化状态的表征；导出了完全极化波的椭圆方程，引入了描述电磁波极化的几种常用方法，即 Jones 矢量、极化椭圆、Poincare 球和 Stokes 矢量等；并着重介绍了部分极化波的相干矩阵和 Stokes 矢量表示法。

## 1.1 完全极化电磁波及其表征

对电磁波而言，极化描述了电场矢量端点作为时间的函数所形成的空间轨迹的形状和旋向，它表明了其电场强度的取向和幅度随时间而变化的性质。由波动方程解的形式可知，简谐平面电磁波的电矢量在横平面内随时间的变化轨迹为一个椭圆。平面电磁波的电矢量在直角坐标系中可以分解为水平和垂直两个分量，而这两个分量之间的相对关系就构成了平面电磁波的极化方式。目前，对电磁波极化状态的研究已经成为电磁场理论的一个重要分支，它在雷达、遥感、导航、制导和通信等各方面都有着广泛的应用。通常我们可以用 4 种不同方式来描述平面电磁波的极化状态，即 Jones 矢量、极化椭圆、Poincare 球和 Stokes 矢量。

### 1.1.1 完全极化电磁波及其 Jones 矢量

对电磁波而言，极化描述了电场矢量端点作为时间的函数所形成的空间轨迹的形状和旋向，是由电场强度的方向决定的。电磁波的极化是电磁波的一种基本特性，它表明其电场强度的取向和幅度随时间而变化的性质。一般情况下，一个沿+z 方向传播的单色电磁波的电场矢量  $E$  既有  $x$  方向的分量，又有  $y$  方向的分量，可以用复矢量表示为

$$E = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad (1.1)$$

式中  $\hat{x}$  和  $\hat{y}$  分别代表 + $x$  和 + $y$  方向的单位基矢量， $E_x = E_{0x} \cos(\theta + \phi_x)$ ， $E_y = E_{0y} \cos(\theta + \phi_y)$ 。上式也可以写为

$$E = E_0(\cos \gamma \cdot \hat{x} + \sin \gamma \cdot e^{j\phi} \cdot \hat{y}) \quad (1.2)$$

式中,  $E_0 = (E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^{1/2}$ ,  $\gamma = \arctan(E_{0y} / E_{0x})$ ,  $\phi = \phi_y - \phi_x$ 。

可见, 只需用  $E_0$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$  三个参数就可以完全表示平面电磁波电场矢量的轨迹形状。为此, 我们定义如下形式的 Jones 矢量

$$\mathbf{E}_{\text{Jones}} = E_0 \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma e^{j\phi} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

在很多应用领域, 我们只对电场向量在  $x$  轴和  $y$  轴上分量的相对关系感兴趣。在这种情况下, 我们可以采用归一化的 Jones 矢量

$$\mathbf{E}'_{\text{Jones}} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma e^{j\phi} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

值得特别指出的是, 单色波是一种完全极化波, Jones 矢量只适用于完全极化电磁波。而后面定义的 Stokes 矢量还能表示不完全极化波、完全极化波两种状况。

### 1.1.2 极化椭圆

式(1.2)给出了沿  $+z$  轴方向传播的平面电磁波电场矢量的解, 当  $E_x \neq 0$ 、 $E_y \neq 0$  并且  $\phi \neq 0$  时, 消去其中的参数  $\gamma$ , 即可得到一般情况下的椭圆方程

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\frac{E_x}{E_{0x}}\frac{E_y}{E_{0y}}\cos\phi = \sin^2\phi \quad (1.5)$$

可见, 平面波的极化椭圆是由  $E_{0x}$ 、 $E_{0y}$  和  $\phi$  三个参量惟一确定的。如果只考虑椭圆的形状而忽略其大小, 那么只需两个参数  $\phi$  和  $\gamma$  即可描述一个极化椭圆, 这里  $\gamma = \arctan\left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right)$ 。根据式(1.5)可以画出平面电磁波电场矢量的轨迹图, 这是一个带有方向性的椭圆, 如图 1.1 所示。

极化椭圆的旋转方向是这样规定的(IEEE Test Antenna Standard, 1979), 若电场矢量旋向与传播方向满足右手螺旋定则, 则称为右旋极化; 若电场矢量旋向与传播方向满足左手螺旋定则, 则称之为左旋极化。对于任意一个极化椭圆, 可以用 3 个几何参量来完全描述, 即椭圆倾角  $\tau$ 、椭圆率角  $\varepsilon$  和椭圆尺寸  $A$  (长轴/短轴)。椭圆倾角  $\tau$  是指极化椭圆的长轴与电磁波所处的坐标系  $x$  轴正方向之间的夹角; 椭圆率角  $\varepsilon$  定义为以椭圆长轴和短轴为边的直角三角形中的最小

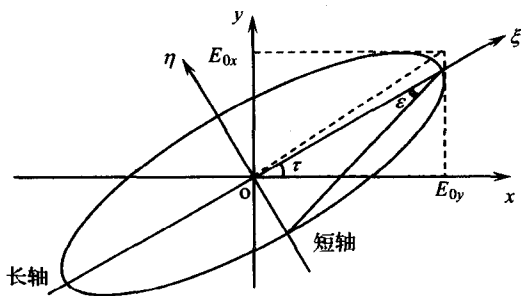


图 1.1 平面电磁波的极化椭圆

内角，也即与短轴直角边相对的那个内角，如图 1.1 所示。椭圆倾角  $\tau$  和椭圆率角  $\epsilon$  的取值范围分别为  $\tau \in [0, \pi]$ ， $\epsilon \in [-\pi/4, \pi/4]$ 。通过这两个角度，我们就能完全描述极化椭圆的形状。此外，椭圆率角  $\epsilon$  的符号还能标示极化椭圆的方向性，当  $\epsilon < 0$  时，此时椭圆是右旋极化；当  $\epsilon > 0$  时，椭圆是左旋极化。椭圆尺寸  $A$  定义为极化椭圆长半轴与短半轴所构成的直角三角形的斜边长，它代表了电磁波的功率密度。

椭圆倾角  $\tau$ 、椭圆率角  $\epsilon$  与电磁波参数  $\phi$  和  $\gamma$  之间的转换关系为

$$\begin{cases} \cos 2\gamma = \cos 2\tau \cos 2\epsilon \\ \tan \phi = \tan 2\epsilon / \sin 2\tau \\ \tan 2\tau = \tan 2\gamma \cos \phi \\ \sin 2\epsilon = \sin 2\gamma \sin \phi \end{cases} \quad (1.6)$$

式中  $\tan \gamma = E_{0y} / E_{0x}$  为两电场矢量的归一化幅度比。

在某些特殊的条件下，极化椭圆会发生变形。当  $E_{0x} = 0$  或  $E_{0y} = 0$  时，极化椭圆蜕化为一条线段，对应的极化方式是线极化，特别是当  $\tau$  为 0 或  $\pm\pi/2$  时，电磁波的极化方式分别为水平线极化和垂直线极化；当  $E_{0x} = E_{0y}$  并且  $\phi = \pm\pi/2$  时，极化椭圆蜕化为圆极化，正负号分别对应左旋圆极化和右旋圆极化。

### 1.1.3 Stokes 矢量

前面讨论的都是完全极化波，即波的两个正交极化分量的振幅和它们之间的相位差是常数，电场矢量的端点在一个极化椭圆上随时间做周期性的运动。如果矢量端点的运动完全是无规则的，我们说它是处于完全非极化状态。处于两者之间状态的则称之为部分极化波。前面所讨论的极化电磁波的 Jones 矢量



表示法只适用于完全极化波，而对于部分极化波则需要引进新的表示方法来描述。

1852年，George Stokes 在部分极化波(准单色光)的研究中<sup>[7~9]</sup>，引入了表征一个波的振幅和极化的4个具有强度量纲的参数，称为 Stokes 参数。下面就对完全极化波的 Stokes 参数进行讨论，而关于部分极化波 Stokes 参数的讨论将在 1.2 节中进行。对于严格的单色波，其电场的 Jones 矢量记为  $E$ ，则4个 Stokes 参数为

$$\begin{cases} g_0 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ g_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ g_2 = 2|E_x| \cdot |E_y| \cdot \cos \phi \\ g_3 = 2|E_x| \cdot |E_y| \cdot \sin \phi \end{cases} \quad (1.7)$$

式中  $|E_x|$ 、 $|E_y|$  和  $\phi$  分别为表示电场两个正交极化分量的振幅和相位差。显然，这些参数足以描述波的振幅和极化：参数  $g_0$  直接给出波的振幅，两个正交极化分量的振幅  $|E_x|$  和  $|E_y|$  可由  $g_0$  和  $g_1$  求出，相位差  $\phi$  可以由  $g_2$  和  $g_3$  求出。不难看出，对于完全极化波这4个参数中只有3个是独立的，它们之间满足如下关系

$$g_0^2 = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (1.8)$$

经过简单的数学推导，可将 Stokes 参数与前面讨论过的描述极化椭圆的各参数联系起来

$$\begin{cases} g_0 = |E_x|^2 + |E_y|^2 = A^2 \\ g_1 = g_0 \cos 2\varepsilon \cos 2\tau = g_0 \cos 2\gamma \\ g_2 = g_0 \cos 2\varepsilon \sin 2\tau = g_0 \sin 2\gamma \cos \phi \\ g_3 = g_0 \sin 2\varepsilon = g_0 \sin 2\gamma \sin \phi \end{cases} \quad (1.9)$$

现在，将4个 Stokes 参数构成一个列矢量，记为  $J$ ，称之为电磁波的 Stokes 矢量。

$$J = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = g_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\varepsilon \cos 2\tau \\ \cos 2\varepsilon \sin 2\tau \\ \sin 2\varepsilon \end{bmatrix} = g_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\gamma \\ \sin 2\gamma \cos \phi \\ \sin 2\gamma \sin \phi \end{bmatrix} \quad (1.10)$$