



丛 书

# 雷达极化理论和应用

王 被 德

电子工业部第十四研究所

PDF

## 前 言

当雷达电波照射到目标时,目标自身的种种信息便调制在其散射波上。迄今为止,各种类型的雷达对目标散射波中信息的利用,还主要限于其幅度、相位、频移和波形。对回波中极化信息的利用,虽自五十年代初起就有人开始研究,但是直到最近十几年方陆续取得具有实用意义的成果。特别是最近几年,已把极化信息的利用推到了重要位置,成为雷达新技术发展的重要方面。美国著名学者 R. T. Hill 在 1992 年 10 月召开的国际军事微波会议上发表的文章《雷达地平线(Radar Horizons)》中,把雷达极化列为代表雷达技术发展方向的“雷达地平线”上的首要项目。

电磁波的极化(Polarization)在光学中称为偏振,研究和应用比较早。雷达极化的研究始于本世纪五十年代初。早期的主要研究学者有 G. Sinclair 和 H. Müller 等人,特别是 E. M. Kennaugh 在 1952 年提出最佳目标极化的概念,成为雷达极化研究的奠基人。J. R. Huynen 在 1970 年提出雷达目标的极化现象学理论,使雷达目标的极化特性研究前进了一大步。近若干年来,英国的 A. J. Poelman,美国的 W. -M. Boerner 等人做了大量理论研究。德国的 G. Wanielik 和 D. J. R. Stock,法国的 E. Pottier 和 J. Saillard,意大利的 D. Giuli 和我国的柯有安等许多学者也做了许多理论和实验研究。已形成一门新兴的边缘学科——雷达极化学(Radar Polarimetry),集中了许多雷达学者和电波传播学者的研究成果,在现代雷达中开始了日益广泛深入的应用。据 IEEE Transactions AES 杂志的统计,从 1984 到 1989 年,在国际主要学术杂志上共发表了雷达极化方面的重要文章 128 篇,另有气象雷达极化方面文章 66 篇。

利用了目标回波中的极化信息,现代雷达能够获得多方面的得益。就对空、对海、对地探测目标的雷达而言,主要得益在以下三个方面:提高目标检测能力,提高抗干扰性能、开辟目标识别的新途径。提高目标检测能力包含两个方面,一是通过雷达发射和接收的极化状态选择,使特定目标的回波增强,便于检测;二是对既定信噪比的目标回波,藉提取其中的极化信息,使检测能力提高。提高抗干扰性能,主要是利用干扰电波与目标回波之间的极化状态差别,提取回波而抑制干扰,提高目标的信干比。开辟雷达目标识别的新途径,是在频域和时域之外,在极化域中提取不同目标回波的特征,进行分类和识别。这几个方面,都对当前解决军用雷达面临的“四大威胁”(干扰、反雷达导弹、隐形目标、低空入侵)有着直接的好处。因此,我国应该对雷达极化问题引起足够的重视,并投入力量进行研究和试验,使有关技术更臻成熟而得到实际应用。

本书的目的即是系统地介绍雷达极化的基本理论和主要应用,特别是近年(直到1992年底)已发表的最新研究成果,供国内开展这方面研究工作参考。全书内容安排为六章。第一章共3节概要地阐明电磁波极化原理。第二、三章共13节阐述雷达目标的极化特性。第四至六章共10节分别介绍雷达极化理论在目标检测、抗干扰和目标识别三方面的应用,但未包括在气象雷达上的应用。每章后面均附有主要参考文献目录。

本书的出版,得到了电子工业部第十四研究所SSS丛书编委会的大力支持,特别是黄为倬、林守远两位老总仔细审阅了原稿,提出了修改意见,吕康平同志作了大量编辑工作,在此谨向他们表示衷心的感谢。

作者水平有限,书中错误和不当之处,请读者给予批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第一章 电磁波极化原理概要</b> .....	(1)
1.1 电磁波的极化 .....	(1)
1.2 天线的极化 .....	(13)
1.3 部分极化波 .....	(18)
<b>第二章 雷达目标的极化特性</b> .....	(26)
2.1 目标的退极化作用 .....	(26)
2.2 平面的极化特性 .....	(26)
2.3 目标的后向散射和极化散射矩阵 .....	(31)
2.4 目标散射的雷达截面积同极化散射矩阵的关系 .....	(37)
2.5 目标的功率型极化散射矩阵 .....	(41)
2.6 实际天线极化不纯的影响 .....	(43)
<b>第三章 雷达目标极化特性的深入探讨</b> .....	(47)
3.1 极化基的变换 .....	(47)
3.2 目标的最佳极化 .....	(51)
3.3 极化散射矩阵诸元素同目标几何特征的关系 .....	(57)
3.4 时变目标及目标分解定理 .....	(68)
3.5 双基地雷达情况下的目标极化散射矩阵 .....	(71)
3.6 目标回波趋向特征极化的特性 .....	(73)
3.7 目标极化特性的某些实测结果 .....	(74)
<b>第四章 极化在雷达目标检测中的应用</b> .....	(82)
4.1 利用极化信息的现代雷达技术 .....	(82)
4.2 目标回波的极化增强 .....	(87)
4.3 目标回波的极化检测 .....	(97)

4.4 极化分集 .....	(110)
<b>第五章 极化在雷达抗干扰中的应用</b> .....	(114)
5.1 用极化技术抗积极干扰 .....	(114)
5.2 用极化技术抗消极干扰和杂波干扰 .....	(124)
<b>第六章 极化在雷达目标识别中的应用</b> .....	(133)
6.1 根据极化散射矩阵识别目标 .....	(133)
6.2 目标形状的极化重构技术 .....	(144)
6.3 利用瞬态极化响应识别目标 .....	(148)
6.4 雷达目标极化识别的有关问题 .....	(156)
<b>附录:专用字符和缩写词表</b> .....	(162)

# 第一章 电磁波极化概要

本章的内容是扼要地介绍电磁波极化的物理概念和数学表述,天线和电波在极化方面的相互关系,以及在雷达实践中常遇到的部分极化波。本章是为尔后各章在概念和表述上打基础的。

## 1.1 电磁波的极化

### 1.1.1 定义和概念

电磁波的极化,表明其电场强度的取向和幅度随时间而变化的性质。如此种变化具有确定的规律,就称该电磁波为极化波。在空间传播的平面极化波的电场强度矢量位于同传播方向相垂直的平面内。在此平面内,矢量端点移动的轨迹称为极化曲线,并按极化曲线的形状对极化命名。任何单一频率的电磁波,均是

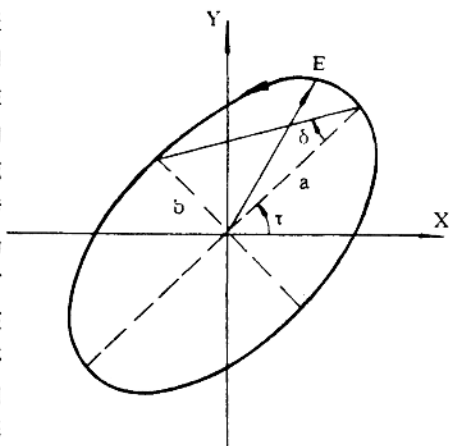


图 1-1 极化椭圆

椭圆极化的。极化椭圆具有长短轴比、长轴倾斜度和电场矢量旋转方向等要素。一种特定的极化状态和一个特定的归一化椭圆相对

应,该归一化椭圆由两个参数即可决定。在图 1-1 中,极化方向角 (polarization orientation angle)  $\tau$  代表长轴倾斜度,取值范围为  $0 \leq \tau \leq \pi$ 。极化椭圆率角 (polarization ellipticity angle)  $\delta$  代表轴比和旋转方向,  $\tan \delta = \pm b/a$ , 取值范围  $-\pi/4 \leq \delta \leq +\pi/4$ , 取正号为左旋, 取负号为右旋。关于旋转方向的规定是这样的: 顺着电磁波的传播方向看, 若空间某点的电场矢量随时间的旋转是顺时针方向的, 符合右螺旋法则, 则称为右旋椭圆极化波, 反之则为左旋椭圆极化波。但须注意的是, 在某一时刻, 右旋椭圆极化波电场矢量随不同传播距离的旋转却是反时针的, 见图 1-2。此外, 光学上常采用与上述相反的旋向规定。在电磁学中, 原来的旋向规定是不统一的。某些早期的电磁学著作, 包括 J. A. Stratton 的名著《Electromagnetic Theory》, 也作了相反的旋向规定。七十年代初期还曾发生过因极化旋向规定不同而使某些通信卫星接收站收不到卫星信号的事件。后来, 由 IEEE 统一作了标准规定。

极化状态是无限多的, 是一个连续域。电场矢量方向不变的线极化, 和极化椭圆轴比为 1 的圆极化, 仅是极化状态中的特例。

### 1.1.2 琼斯矢量

当将电场矢量分解为沿两个相互正交的极化状态(称极化基)的分量时, 可以用琼斯(Jones)矢量的形式来表述某种极化状态。常用的正交极化基为水平与垂直线极化, 或右旋与左旋圆极化。但任何一对正交的椭圆极化都可以作为极化基。广义的正交极化的含意将在本节第 8 点中阐述。

当以水平与垂直线极化作为极化基时, 电场强度为  $\mathbf{E}$  的电磁波, 其极化状态的琼斯矢量为  $[E_x, E_y]^T$  或  $|\mathbf{E}| \cdot [\cos \alpha, \sin \alpha e^{j\varphi}]^T$ 。  $\alpha$  为矢量的绝对相位,  $\varphi$  为垂直分量超前于水平分量的相对相位,  $\varphi$  为正值时左旋,  $\varphi$  为负值时右旋。它们和前述极化椭圆参数之间的关

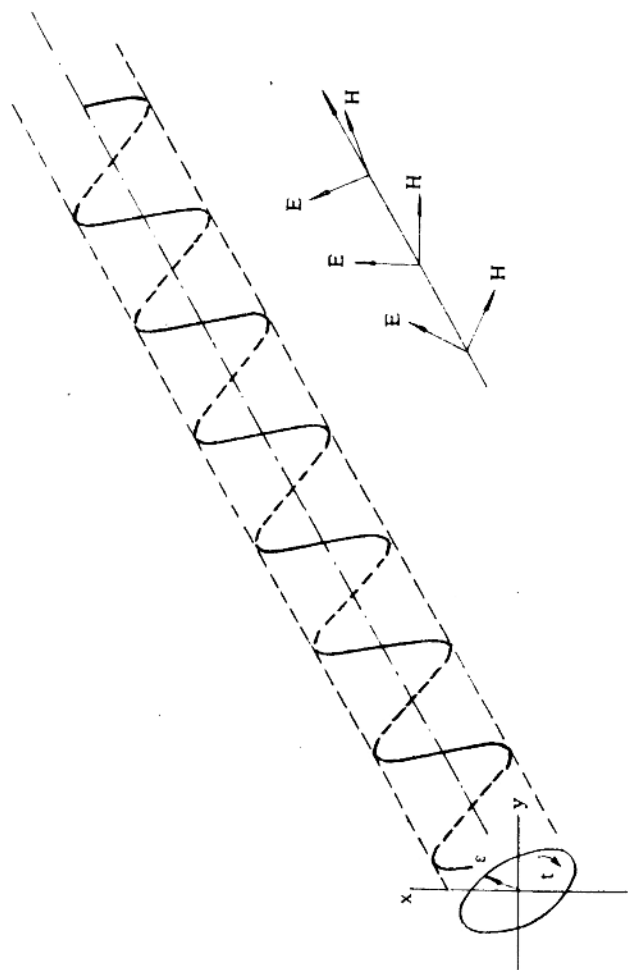


图 1-2 右旋椭圆极化波电场矢量在同一时刻随不同传播距离的旋转情况



系为

$$\begin{aligned}\tan 2\tau &= \tan 2\alpha \cos \varphi \\ \sin 2\delta &= \sin 2\alpha \sin \varphi\end{aligned}\quad (1-1)$$

或

$$\begin{aligned}\cos 2\alpha &= \cos 2\tau \cos 2\delta \\ \tan \varphi &= \csc 2\tau \tan 2\delta\end{aligned}\quad (1-2)$$

根据上述关系可以导出琼斯矢量以椭圆参数来表达的另一种形式,在作某些演算时有用:

$$\begin{aligned}E &= \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = |E| \cdot e^{j\omega t} \begin{pmatrix} \cos \tau & -\sin \tau \\ \sin \tau & \cos \tau \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \delta \\ j \sin \delta \end{pmatrix} \\ &= |E| e^{j\omega t} \begin{pmatrix} \cos \tau \cos \delta - j \sin \tau \sin \delta \\ \sin \tau \cos \delta + j \cos \tau \sin \delta \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (1-3)$$

当以右旋与左旋圆极化作为极化基时,极化状态的琼斯矢量为  $[E_R, E_L]^T$ 。

有时仅须考虑电磁波的极化状态而不计及其幅度,可用归一化的单位琼斯矢量来表达,如  $[\cos \alpha, \sin \alpha e^{j\varphi}]^T$  或  $[\cos \tau \cos \delta - j \sin \tau \sin \delta, \sin \tau \cos \delta + j \cos \tau \sin \delta]^T$ 。

### 1.1.3 极化比

琼斯矢量的两个分量之比称为极化比 (polarization ratio), 也称极化系数。它也是常用来代表极化状态的参数。在以水平与垂直直线极化为基时,定义

$$\text{极化比} \quad p = E_y / E_x = \frac{|E_y|}{|E_x|} e^{j\varphi} = \tan \alpha e^{j\varphi}$$

$$\text{修正极化比} \quad p' = jp$$

此时,电场强度为  $E$  的电磁波的琼斯矢量和单位琼斯矢量可分别写为

$$E = [E_x, E_y]^T = E_x [1, p]^T$$

$$\begin{aligned}
 E_n &= E/|E| = E/(E^H E)^{1/2} = E/(E_x^* E_x + E_y^* E_y)^{1/2} \\
 &= \frac{E_x}{(E_x^* E_x + E_y^* E_y)^{1/2}} [1, p]^T = \frac{1}{(1 + p^* p)^{1/2}} [1, p]^T \\
 &= (1 + |p|^2)^{-1/2} [1, p]^T \quad (1-4)
 \end{aligned}$$

其中矢量右上角的符号“H”表示赫米特共轭(Hermitian conjugate), 即转置后取共轭, 或反之, 也可用符号“\*”表示。

注意, 极化比并不是极化椭圆的轴比, 它们之间的关系是

$$\text{轴比} \quad \rho = \left| \frac{|1 + jp| + |1 - jp|}{|1 + jp| - |1 - jp|} \right| \quad (1-5)$$

由极化比的实部和虚部可看出极化的旋转方向, 因为  $p = \frac{|E_y|}{|E_x|} e^{j\varphi} = \frac{|E_y|}{|E_x|} \cos\varphi + j \frac{|E_y|}{|E_x|} \sin\varphi$ , 所以当极化右旋时,  $\text{Im}(p) < 0$  或  $\text{Re}(p') > 0$ ; 当极化左旋时,  $\text{Im}(p) > 0$  或  $\text{Re}(p') < 0$ 。

在以右旋与左旋圆极化为基时, 定义

$$\text{圆极化比} \quad q = E_L/E_R$$

对同一极化状态, 当其极化基在正交线极化和正交圆极化之间变换时, 其极化比之间满足下列关系

$$q = \frac{1 - jp}{1 + jp} = \frac{1 - p'}{1 + p'}, \quad p = -j \frac{1 - q}{1 + q}, \quad p' = \frac{1 - q}{1 + q} \quad (1-6)$$

#### 1.1.4 斯托克斯矢量

当以功率形式来表达电磁波的极化状态时, 则引入斯托克斯(Stokes)矢量  $\mathbf{T} = [T_0, T_1, T_2, T_3]^T$ , 其诸元在以正交线极化为基时分别为

$$\begin{aligned}
 T_0 &= E_x E_x^* + E_y E_y^* = |E_x|^2 + |E_y|^2 = |E|^2 \\
 T_1 &= E_x E_x^* - E_y E_y^* = |E_x|^2 - |E_y|^2 \\
 T_2 &= E_x E_y^* + E_y E_x^* = 2|E_x| \cdot |E_y| \cos\varphi \\
 T_3 &= -j(E_x E_y^* - E_y E_x^*) = 2|E_x| \cdot |E_y| \sin\varphi
 \end{aligned}$$

四个参数中只有三个是独立的,  $T_0^2 = T_1^2 + T_2^2 + T_3^2$ ,  $T_0$  的物理意义为电磁波的功率密度。与琼斯矢量不同, 斯托克斯矢量诸元均是实数。

### 1.1.5 常见极化状态的参数值

综上所述, 电磁波的极化状态可以用多种参数形式来表达。为便于应用, 现将几种常见极化状态的诸参数值集中列于表 1-1。

各参数之间的关系式除前述的以外, 有用的还有以下一些。

$$|E_x| = \sqrt{\frac{1}{2}(T_0 + T_1)}, \quad |E_y| = \sqrt{\frac{1}{2}(T_0 - T_1)}, \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{T_3}{T_2} \quad (1-7)$$

$$2\tau = \tan^{-1} \frac{T_2}{T_1}, \quad 2\delta = \sin^{-1} \frac{T_3}{T_0} \quad (1-8)$$

$$T_1 = T_0 \cos 2\tau \cos 2\delta, \quad T_2 = T_0 \sin 2\tau \cos 2\delta, \quad T_3 = T_0 \sin 2\delta \quad (1-9)$$

$$p = \frac{T_2 + jT_3}{T_0 + T_1}, \quad p' = \frac{-T_3 + jT_2}{T_0 + T_1}, \quad q = \frac{T_1 - jT_2}{T_0 - T_3} \quad (1-10)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{1 - |p|^2}{1 + |p|^2}, \quad \frac{T_2}{T_0} = \frac{2R_c(p)}{1 + |p|^2}, \quad \frac{T_3}{T_0} = \frac{2I_c(p)}{1 + |p|^2} \quad (1-11)$$

$$p = \frac{(\sin 2\tau \cos 2\delta + j \sin 2\delta)}{(1 + \cos 2\tau \cos 2\delta)} \quad (1-12)$$

### 1.1.6 极化的几何描述

电磁波的极化状态常用庞加莱球(Poincare sphere)来进行几何描述, 见图 1-3。球心位于右旋坐标系的原点。球面上的每一点对应于一种极化状态。点的位置同电磁波的极化参数的关系是这样的: 点的经度是  $2\tau$ , 代表极化椭圆的斜度; 点的纬度是  $2\delta$ , 代表极化椭圆的椭圆度。另外, 斯托克斯参数  $T_0, T_1, T_2, T_3$  恰好是球的半径和极化点 P 的三个直角坐标值。有些资料中规定庞加莱球的

表 1-1 常见极化状态的参数值

极化状态	$\tau$	$\delta$	$\rho$	$p$	$p'$	$q$	$T_1/T_0$	$T_2/T_0$	$T_3/T_0$	单位琼斯矢量
水平线极化	0	0	$\infty$	0	0	1	1	0	0	$[0, 1]^T$
垂直线极化	$\pi/2$	0	$\infty$	$\infty$	$j\infty$	-1	-1	0	0	$[1, 0]^T$
右旋圆极化	任意	$\pi/4$	1	-j	1	0	0	0	-1	$[1, -j]^T$
左旋圆极化	任意	$-\pi/4$	1	j	-1	$\infty$	0	0	1	$[1, j]^T$
$\pi/4$ 线极化	$\pi/4$	0	$\infty$	1	j	-j	0	1	0	$[1, 1]^T$
$3\pi/4$ 线极化	$3\pi/4$	0	$\infty$	-1	-j	j	0	-1	0	$[1, -1]^T$

半径为 1, 则三个坐标值分别为  $T_1/T_0, T_2/T_0, T_3/T_0$ 。这样, 所有的线极化均位于赤道上, 赤道与 X、Y 轴的交点分别代表水平极化 H、垂直极化 V 和  $\pi/4$  线极化、 $3\pi/4$  线极化。球的南、北极分别代表右旋圆极化 RC 和左旋圆极化 LC。所有的右旋椭圆极化均在南半球, 所有的左旋椭圆极化均在北半球。如通过极化点 P 和水平线极化点 H 作大圆弧, 则该弧与赤道的交角为  $\varphi$ , 弧所对的球心角为  $2\alpha$ , 见图 1-4。

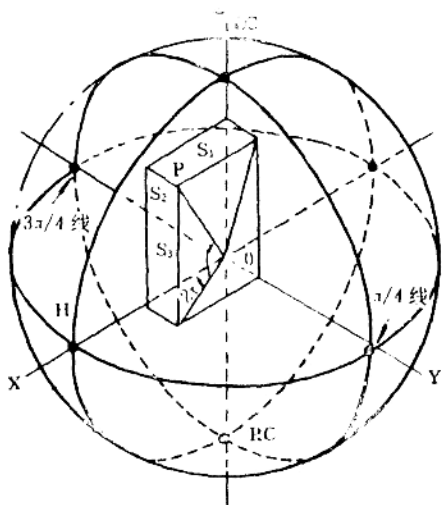


图 1-3 庞加莱极化球

若干文献中还提出了下列三种平面型的极化图, 以平面上的位置点代表各种极化状态。第一种是将庞加莱球面上的点投影到赤道平面, 见图 1-5, 极化点的极坐标为  $\rho = T_0 \cos 2\delta, \theta = 2\tau$ 。为区

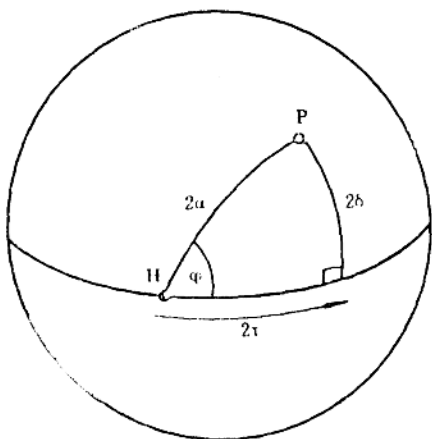


图 1-4 庞加莱球上的  $\varphi$  和  $\alpha$

分右旋和左旋,需要两张平面图或在图中加注旋转方向。第二种是仿照地图绘制方法,将庞加莱球面按一定投影规则(如 Mollweide 等面积伪圆柱投影)投影至平面上,见图 1-6。第三种是  $\tau$ - $\delta$  平面极化图,见图 1-7。其  $\tau$  轴上为所有的线极化,右旋和左旋圆极化分别在  $\delta$  轴的两端。三种平面极化图,尤其是前二种,都获得广泛的应用。

### 1.1.7 极化波的合成与分解

对于向着同一方向传播的相干电磁波,可以方便地通过琼斯矢量的运算来进行合成和分解。例如两个等幅同相的右旋和左旋圆极化波合成时,合成波应该是一个振幅为 2 倍的水平线极化波,这可通过琼斯矢量的下列运算求得:

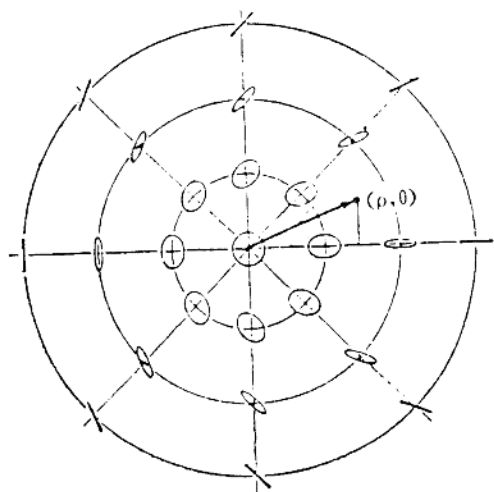


图 1-5 赤道面投影极化图

$$|E| \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} + |E| \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = |E| \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} = 2|E| \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

又如,任意极化波总可以分解为二个正交的极化分量,可用琼斯矢量运算表达如下:

分解为正交线极化波时,

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

分解为正交圆极化波时

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{2}(A + jB) \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} + \frac{1}{2}(A - jB) \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

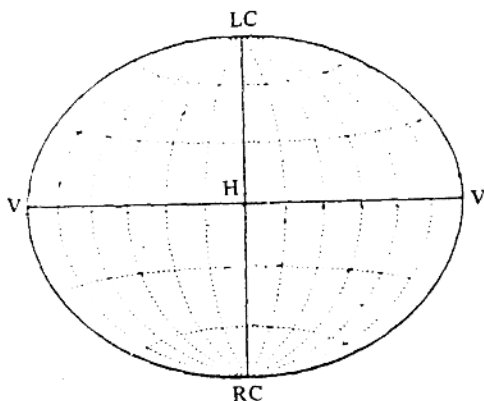


图 1-6 地图投影极化图

### 1.1.8 正交极化与共轭极化

正交极化 (cross polarization, 或称交叉极化) 与共轭极化 (conjugate polarization) 是两个常见的概念。对二个向着同一方向传播的电磁波, 极化正交的充要条件是, 它们的琼斯矢量满足

$$E_1^H E_2 = [E_{z1}^*, E_{y1}^*] \begin{pmatrix} E_{z2} \\ E_{y2} \end{pmatrix} = E_{z1}^* E_{z2} + E_{y1}^* E_{y2} = 0 \quad (1-15)$$

若用极化比来表示, 以  $E_{z1}^* E_{z2}$  除 (1-15) 式各项, 得

$$1 + p_1^* p_2 = 0, \quad p_2 = -\left(\frac{1}{p_1}\right)^* \quad (1-16)$$

由上式可以导出, 一般情况下两个椭圆极化波互相正交时, 应满足下列几何关系: 轴比相等; 极化方向角  $\tau$  相差  $\pi/2$ ; 极化椭率角  $\delta$  数值相等, 符号相反 (旋转方向相反), 见图 1-8。

两个正交极化波在庞加莱球上的相互位置关系是, 分别位于



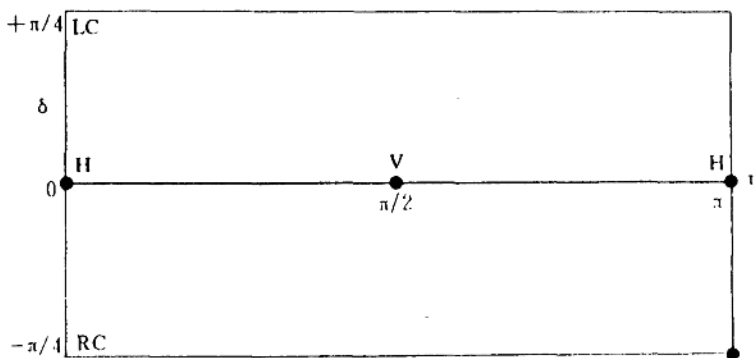


图 1-7  $\tau$ - $\delta$  平面极化图

同一直径的两端。这可以从(1-16)式导出

$$\frac{|E_{r2}|}{|E_{s2}|} e^{j\varphi_2} = - \frac{|E_{r1}|}{|E_{s1}|} e^{j\varphi_1} = \frac{E_{r1}}{E_{s1}} e^{j(\varphi_1 + \pi)}$$

$$\therefore |E_{r2}|/|E_{s2}| = |E_{r1}|/|E_{s1}|, \varphi_2 = \varphi_1 + \pi$$

再根据斯托克斯矢量的定义式,在归一化( $|E_{x1}|^2 + |E_{y1}|^2 = T_{01} = T_{02} = |E_{x2}|^2 + |E_{y2}|^2$ )情况下即可推得,二个波的  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  值分别等值异号,表明极化点  $P_1$  和  $P_2$  位于同一直径的两端。也可导出,二个正交极化波的斯托克斯矢量满足下列关系

$$T_1^2 T_2 = T_{01} T_{02} + T_{11} T_{12} + T_{21} T_{22} + T_{31} T_{32} = 0 \quad (1-17)$$

对二个向着同一方向传播的电磁波,满足下列条件称为极化共轭:  $p_2 = p_1^*$ 。由(1-12)式即可知  $\tau_1 = \tau_2$ ,  $\delta_1$  与  $\delta_2$  等值异号。斯托克斯矢量的关系则为  $T_1$  与  $T_2$  各各相等,  $T_3$  等值异号。可见,共轭极化波仅是极化椭圆旋转方向相反;因庞加莱球上,共轭极化波的位置相对于 XOY 平面上下(南北)对称。