

基于极化度分布特征的目标识别方法研究¹

李 盾 肖顺平 王雪松 吕彤光

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘 要 该文在全极化、高距离分辨力雷达体制背景下,研究了光学区雷达目标回波极化度的分布特性,并利用分布特征参数进行定量描述,在此基础上对四类飞机目标进行了识别实验研究,获得了良好的目标分类识别效果。

关键词 极化, 目标识别, 极化度

中图分类号 TN953

1 引 言

众所周知,雷达发射的电磁波在目标表面感应面电流并进行再辐射,从而产生散射电磁波,散射波的性质通常不同于入射波的性质。目标作为一个散射变换算子,它将入射波参数空间映射到散射波参数空间^[1,2]。散射波与入射波在幅度特性、相位特性、频率特性及极化特性等方面的差异,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。目标的极化散射特性中包含了有关目标的空间取向和精密几何结构等重要的物理属性信息,在高距离分辨雷达体制下,利用极化信息可以对目标的散射结构进行细致精确地刻画,从而获取目标更丰富的识别信息。目前基于目标极化散射特性的识别方法已经成为极具潜力的目标识别途径之一^[2-4]。

飞机目标是由多个子散射体组成的复杂目标^[1],可以利用其回波极化度在 Poincare 极化球上的分布特征进行目标识别。本文针对四种飞机目标,提取目标回波极化度在 Poincare 极化球上的分布参数作为目标识别特征,最后设计了树状分类识别器,这种分类器结构简单,实时性强,易于实现,对四种军用飞机目标的识别实验取得了良好的效果。

2 部分极化波与极化度

单色波是一种完全极化波,或者叫做纯极化波,其电场矢量端点在传播空间任一点处描绘出一个具有恒定椭圆率角和倾角的极化椭圆,这个极化椭圆是不随时间而变化的,因而单色波的极化性质可以由极化椭圆或者它的各种等价派生参数作完全地描述。但在实际情况中,波的场矢量的端点在传播空间给定点处描绘出的轨迹一般不是一个非时变的椭圆,而是一条形状和方向都随时间变化的类似于椭圆的曲线,这样的波称为部分极化波^[5]。显然,完全极化波仅仅是部分极化波的一个特殊情形。

设一个平面波沿 +z 轴方向传播,其电场分量为^[6]

$$E_x(t) = a_x(t) \exp\{j[\omega t + \phi_x(t) - kz]\}; \quad (1a)$$

$$E_y(t) = a_y(t) \exp\{j[\omega t + \phi_y(t) - kz]\}; \quad (1b)$$

式中 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ 、 $\phi_x(t)$ 和 $\phi_y(t)$ 分别代表电场分量的幅度项和绝对相位项,它们均是关于时间的缓变过程,把电场用矢量形式表示为

¹ 1999-01-22 收到, 1999-08-14 定稿

$$\mathbf{E}(t) = [E_x(t) \ E_y(t)]^T. \quad (2)$$

式中上标“T”表示转置, 显然这是一个时变的二维复矢量. 定义波的相干矩阵为

$$C = \langle \mathbf{E}(t)\mathbf{E}(t)^H \rangle. \quad (3)$$

式中上标“H”表示共轭转置, $\langle \cdot \rangle$ 表示求系统平均 (也称为集合平均) 算符. 由上式易知, C 是一个 Hermite 矩阵. 对于 (1) 式中定义的平面波, 其场分量的幅度和相位通常可以认为是具有各态历经性的缓变随机过程, 这样在波的相干矩阵的定义 (3) 式中出现的系统平均运算可以用时间平均来等效地代替, 这一点对于工程上的实际计算是有利的, 这时 (3) 式可以写成

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} C_T = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \mathbf{E}(t)\mathbf{E}^H(t) dt. \quad (4)$$

若记波的相干矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则定义波的相干因子 μ 为

$$\mu = \frac{C_{xy}}{\sqrt{C_{xx}C_{yy}}}. \quad (6)$$

μ 是一个复数, 且 $|\mu| \leq 1$, $|\mu|$ 的大小反映了波的电场分量之间的相关程度. 当 $|\mu| = 1$ 时, 波的两个正交场分量之间具有完全相干性, 称之为完全极化波; 当 $|\mu| < 1$ 时, 波的两个场分量之间是部分相干的, 即为部分极化波.

C 可以唯一地作如下形式的分解:

$$C = C_1 + C_2. \quad (7)$$

C_1 表征一个未极化波, C_2 表征一个完全极化波. 这就是说, 一个部分极化波可以分解为一个完全极化波和一个未极化波, 定义部分极化波的极化度为其完全极化分量的平均功率密度 P_p 与波总的平均功率密度 P_w 之比, 记为 PD(Polarization Degree), 且

$$PD = \frac{P_p}{P_w} = \frac{\sqrt{(\text{Tr}[C])^2 - 4\text{Det}[C]}}{\text{Tr}[C]}. \quad (8)$$

显然有 $0 \leq PD \leq 1$, 且当 $PD = 1$ 时, 波是完全极化的; 当 $PD = 0$ 时, 波是未极化的.

同样, 根据 (1) 式, 部分极化波的 Stokes 矢量 \mathbf{J} 可定义为^[5,6]

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle a_x(t)^2 \rangle + \langle a_y(t)^2 \rangle \\ \langle a_x(t)^2 \rangle - \langle a_y(t)^2 \rangle \\ 2\langle a_x(t)a_y(t) \cos \phi(t) \rangle \\ 2\langle a_x(t)a_y(t) \sin \phi(t) \rangle \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中 $\phi(t) = \phi_y(t) - \phi_x(t)$. 由 Stokes 参数可以给出与 (8) 式等价的极化度表达式:

$$PD = \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{g_0} \quad (10)$$

部分极化波的完全极化波分量的 Stokes 矢量在形式上与单色波的 Stokes 矢量完全相同, 因此用以描述单色波极化的各种参数和方法也同样地适用于部分极化波的完全极化分量。事实上, 一个部分极化波完全极化分量的极化描述符 (如极化椭圆几何描述子) 加上这个部分极化波的极化度就可以完全地表征这个部分极化波的极化性质。

3 飞机目标散射波极化特征提取

对一个简单的确定性目标, 当以完全极化的单色波照射时, 它在给定观测条件下的电磁散射特性可以由一个极化散射矩阵进行完全的表征, 这种确定性目标对单色电磁波的散射在雷达领域中称为相干散射。但是, 在雷达测量中所遇到的情况并非总是如此简单。我们研究的飞机目标是由一组独立的子散射体所构成的复杂目标, 各子散射体的散射特性及相互关系决定了飞机总的散射特性, 本文认为, 在雷达测量过程中, 飞机目标的散射特性表现出了一定的随机性, 必须采用统计的方法研究目标的电磁散射特性。这时只能用 Mueller 矩阵来描述飞机目标的电磁散射特性^[7]。

相干散射情况下, 若记入射电场和目标后向散射场 Jones 矢量分别为 E_T 和 E_S (E_S 可以是完全极化的, 也可以是部分极化的), 则有

$$E_S = S E_T \quad (11)$$

式中 S 是 Sinclair 散射矩阵。定义一个中间矩阵 W 为

$$W = S \otimes S^* \quad (12)$$

式中 “ \otimes ” 为 Kronecker 积。并记

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & -j & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

若入射波与散射波的 Stokes 矢量分别记为 J_T 和 J_S , 则有

$$J_S = R W R^{-1} J_T \quad (14)$$

则 Mueller 矩阵为^[7]

$$M = R W R^{-1} \quad (15)$$

Mueller 矩阵是一个实矩阵, 且通常是非对称的。

对于非相干情况, 目标的散射特性是时变的, 或者目标本身由一组互相独立的子散射体构成时 (这些子散射体之间的相对空间位置以及空间取向随时间而独立地变化), 目标的散射回波具有起伏特性, 无法用一个极化散射矩阵来描述起伏目标的极化电磁散射特性。通常, 起伏目标的电磁散射可以看作是一个平稳的随机过程, 可用统计的方法来刻画起伏目标的散射特性。即便如此, 目标的 Mueller 矩阵在形式上与 (15) 式仍是完全相同的, 但起伏性目标的 Mueller 矩阵元素是对散射矩阵元素的乘积进行集合平均运算后得到的。因此,

Mueller 矩阵从统计的角度描述了目标在特定观测条件下的极化散射特性, 它反映了目标对于入射波和散射波 Stokes 矢量的极化变换关系。目标的 Mueller 矩阵不但取决于目标本身的物理特性, 同时也与入射波频率、雷达视角以及目标姿态取向等客观观测条件有关。

为了刻画几种飞机目标的极化散射特性, 本文设计了如下实验:

众所周知, 所有极化状态与单位 Poincare 球上的点集构成了一一对应关系, 而单位极化球上每一点又可用几何描述子 (ε, τ) 表示, 且 $-\pi/4 \leq \varepsilon \leq \pi/4$, $-\pi/2 \leq \tau \leq \pi/2$ (实际上, 2τ 和 2ε 分别对应着 Poincare 球上一点的方位角和俯仰角), 因此改变 2τ 和 2ε 即可遍历每一种极化状态。

发射一系列单色波 P_1, P_2, \dots , 其极化状态分别对应着 $(\varepsilon_1, \tau_1), (\varepsilon_2, \tau_2), \dots$ 若摒除能量因素, 只考虑极化问题, 发射的单色波序列可用准 Stokes 矢量表示为

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\varepsilon \cos 2\tau \\ \cos 2\varepsilon \sin 2\tau \\ \sin 2\varepsilon \end{bmatrix}, \quad (16)$$

即是

$$\mathbf{J}_T = [1 \quad g_1 \quad g_2 \quad g_3]^T. \quad (17)$$

用单色波序列分别照射飞机目标, 得到回波序列, 即

$$\mathbf{J}_S = M \mathbf{J}_T. \quad (18)$$

且

$$\mathbf{J}_S = [g'_0 \quad g'_1 \quad g'_2 \quad g'_3]^T.$$

根据前面分析, 这些回波都是部分极化波, 它们的部分极化特性可用极化度表征, 即

$$PD = \frac{\sqrt{g_1'^2 + g_2'^2 + g_3'^2}}{g'_0}. \quad (19)$$

这样可以得到一个极化度序列, 让发射的单色波极化状态遍历整个极化球, 最后得到的极化度序列就较全面地反映了飞机目标回波的极化特性。图 1 给出了两种飞机目标回波在整个极化球上极化度的分布情况, 其中 $\varepsilon \in [-\pi/4, \pi/4]$, 而 $\tau \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。

图 1 中给出了两种飞机目标在方位角 1° , 3° , 5° 的极化度分布情况, 比较各图可看出, 同一目标在不同方位上其极化度的分布相似而不同目标极化度的分布有较大的区别。因此, 提取体现极化度分布的特征即可用于识别。

为此, 利用统计分布参数对极化度分布特征进行了定量分析, 这些统计分布参数非常简单, 包括 τ 轴和 ε 轴方向的均值、方差、最大值、最小值、中值等, 还包括文献 [2] 中所定义的称为隶属度的分布参数 (如下文中参数 B)。我们选取其中一些分布参数作为识别特征, 它们具有这样的特点: 同一目标的此类特征对方位变化不太敏感, 而不同目标的此类特征则具有较大区别。若将 τ 轴和 ε 轴分别划分为 M 和 N 个区间, 则每一个子区间表示一种发射的极化状态, 对于每一种发射的极化状态可得到一个目标回波极化度值, 记为 $PD(m, n)$, 其中 m 和 n 分别是 τ 轴和 ε 轴各子区间序号, 且 $m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$ 。选取来用于识别的五个特征参数定义如下:

$$\text{参数 } A: \sup_{1 \leq n \leq N} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M PD(m, n) \right\}$$

$$\text{参数 } B: \frac{[\sup_{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\}]^2 - [\inf_{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\}]^2}{[\sup_{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\}]^2 + [\inf_{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\}]^2},$$

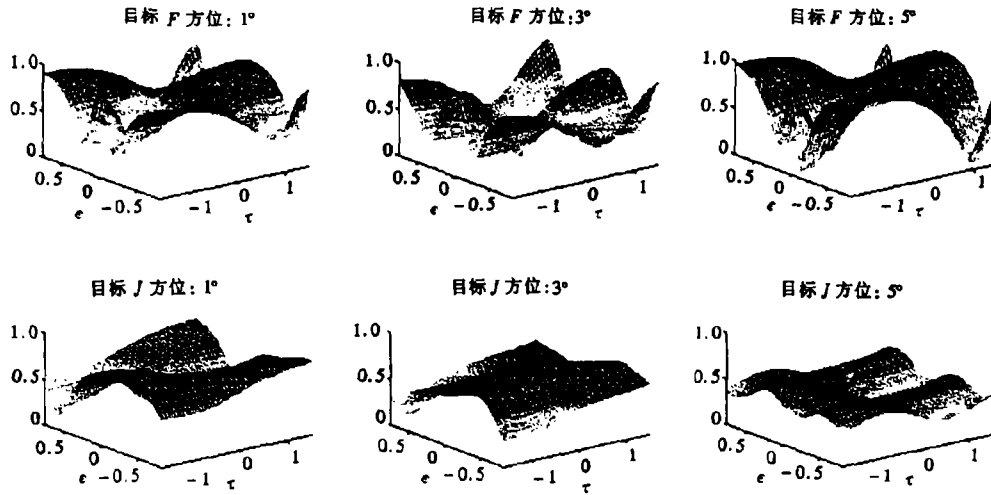


图1 飞机目标 F 和 J 在 Poincare 球上极化度分布 (俯仰角: 0° , 横滚角: 0°)

参数 C : $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [\sup_{1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\}]$,

参数 D : $\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M [\sup_{1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\} - C]^2$,

参数 E : $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [\inf_{1 \leq n \leq N} \{PD(m, n)\}]$.

上述五个参数构成了表征飞机目标回波部分极化特性的特征矢量, 记为: (A, B, C, D, E) .

4 目标识别实验研究结果

本文实验是利用 8mm 幅相测量系统在外场进行的。阶梯变频雷达测量系统的工作频率范围为 34.7GHz~35.7GHz, 频率步进间隔为 2MHz, 观测频率点数 $N=500$, 水平、垂直极化分时发射、同时接收; 四类飞机的缩比模型长约 1.5~3.0m, 宽约 1.0~1.8m, 测试姿态为 0° 横滚角、 0° 俯仰角, 方位角范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$, 方位角采样间隔为 1° 。

图 2 给出了实验中提取的极化特征 A 、 B 、 C 、 D 、 E 随目标方位角变化的曲线。考虑到在实际测量中, 目标姿态会由于各种因素的干扰而呈现出较随机的变化, 因此在特征提取过程中, 开了一个 $N_a = 3^\circ$ 的方位窗口, 在方位窗口内对特征量进行平滑^[2], 平滑公式为

$$A_s(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} A(p), \quad B_s(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} B(p), \quad C_s(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} C(p),$$

$$D_s(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} D(p), \quad E_s(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} E(p),$$

式中 A_s , B_s , C_s , D_s 和 E_s 分别表示经空间积累平滑后的极化特征, p_0 代表目标方位角, 且 $p_0 = 0^\circ, 1^\circ, \dots, 30^\circ - N_a$ 。

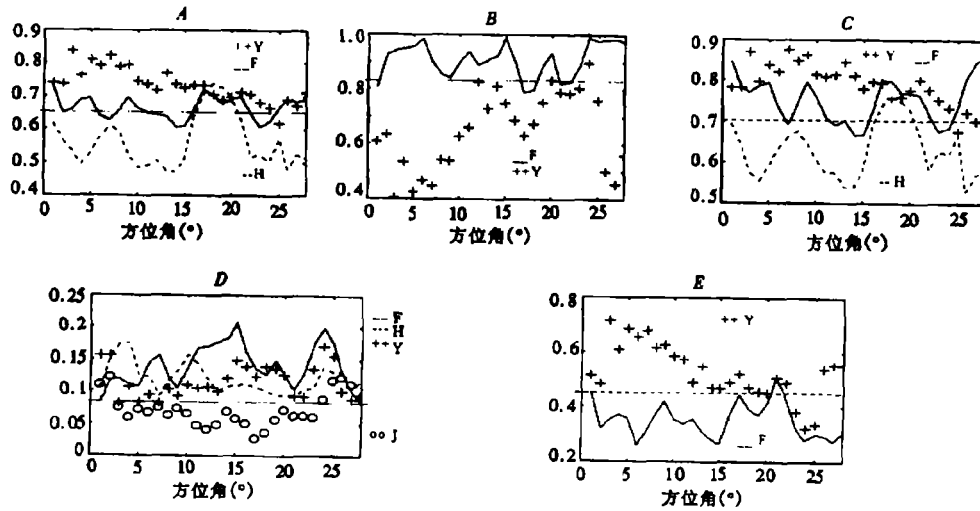


图 2 四种目标极化特征参数

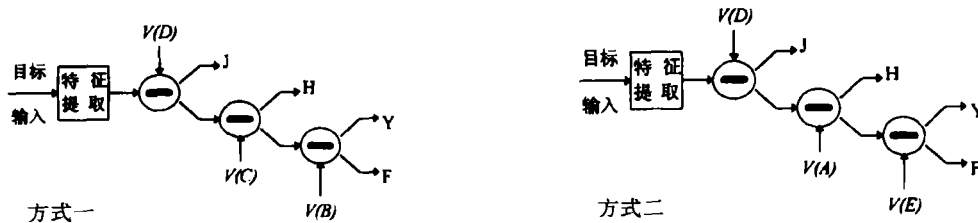


图 3 目标识别器两种方式

由图 2 可看出，本文提取的极化特征参数具有一定的同类聚合性和异类之间的分离性。根据图 2 可以设计出如图 3 的两种方式的树状分类或识别器结构，目标识别过程就是一个逐级细化分类或识别的过程，可获得如表 1 和表 2 的目标识别率。

实验结果表明，对于飞机这样的复杂目标，其回波的部分极化特性可以作为目标识别的特征。实验中采用了简单的统计参数描述目标回波在 Poincare 球上的极化度分布，并获得了一定的识别率。

5 结 束 语

飞机目标是由一组独立的子散射体所构成的复杂目标。本文研究表明，飞机目标回波是部分极化波，回波极化度在 Poincare 球上的分布特性可以作为目标识别的特征。文中所提取的统计分布参数是对方位不太敏感的特征，并具有一定的同类聚合性和异类之间的分离性，因而使用简单的树状分类器即可获得良好的分类识别效果。

表 1 采用方式一的识别结果

目标姿态	横滚角 0° ，俯仰角 0° ，方位角 $0^\circ \sim 28^\circ$			
目标类型	J	H	F	Y
识别率 %	75.8	82.8	82.8	82.8

表 2 采用方式二的识别结果

目标姿态	横滚角 0° , 俯仰角 0° , 方位角 $0^\circ \sim 28^\circ$			
目标类型	J	H	F	Y
识别率 %	75.8	82.8	89.6	82.8

参 考 文 献

- [1] П. Т. 图契科夫主编, 马清海等译. 飞行器的雷达特性. 洛阳: 信息获取与处理技术交流中心, 1988, 1-4.
- [2] 肖顺平. 宽带极化雷达目标识别的理论与应用: [博士论文]. 长沙: 国防科技大学电子技术系, 1995, 12.
- [3] 肖顺平, 郭桂蓉, 王雪松. 基于极化频率稳定度的目标识别. 现代雷达, 1995, 17(5): 1-7.
- [4] 肖顺平, 郭桂蓉, 庄钊文, 王雪松. 基于含参最小二乘估计曲线拟合的极化雷达目标识别方法. 电子学报, 1997, 25(3): 32-36.
- [5] H. Mott 著, 林昌禄等译. 天线与雷达中的极化. 成都: 电子科技大学出版社, 1989, 309-322.
- [6] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1999, 76-92.
- [7] Kostinski A B, Boerner W M. On foundations of radar polarimetry. IEEE Trans. on AP, 1986, AP-34(12): 1395-1404.

THE STUDY OF TARGET RECOGNITION BASED ON
THE POLARIZATION DEGREE DISTRIBUTION

Li Dun Xiao Shunping Wang Xuesong Lü Tongguang

(Institute of Electronic Eng., National University of Defense Tech., Changsha 410073)

Abstract In this paper, the polarization degree of the target return in the optics region is investigated, on the basis of polarimetric and high-resolution radar system. The property is described by means of distribution parameter, the recognition of four kinds of aircraft targets is investigated and good results are obtained.

Key words Polarization, Target recognition, Polarization degree

- 李 盾: 男, 1971 年生, 博士生, 主要研究领域: 信号处理, 目标识别及综合电子战技术.
 肖顺平: 男, 1964 年生, 副教授, 主要研究领域: 信号处理、雷达目标识别、模糊信息处理等.
 王雪松: 男, 1972 年生, 博士生, 主要研究领域: 雷达极化, 信号处理, 目标识别及模糊信息处理.
 吕彤光: 男, 1968 年生, 博士生, 主要研究领域: 信号处理, 综合电子战技术.