

# 宽带全极化雷达目标 HRRP 极化特征提取与优选\*

郭雷\*\* 肖怀铁 赵宏钟 付强

国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室, 长沙 410073

**摘要** 充分有效地利用全极化雷达目标 HRRP 极化信息是雷达目标特征提取领域一个热点问题. 文中主要研究了宽带全极化雷达目标 HRRP 的三类极化特征的提取与优选: (1) 将 SAR 领域常用的熵特征引入全极化 HRRP 中, 分析了反映目标 HRRP 散射随机性的熵特征; (2) 根据目标散射矩阵相似性参数理论, 定义了目标 HRRP 与 6 种标准体散射矩阵相似性参数概率形式描述, 并将其作为特征, 这类特征反映了目标的物理结构特性; (3) 提出了反映目标散射能量特性的 Mueller 矩阵相似性参数特征, 并且证明了该参数特征的旋转不变性. 这几类特征具有明确的物理意义. 采用飞机目标多个姿态的实测数据进行了特征有效性验证和特征优选, 并利用优选后的特征组成特征矢量对飞机目标识别, 实验结果表明, 提出的 HRRP 极化特征具有良好的稳健性和可分性.

**关键词** 全极化 HRRP 极化特征 特征提取 特征优选

宽带全极化雷达目标高分辨距离像 (high resolution range profile, 简称 HRRP) 包含了目标的全部结构信息, 反映了目标散射中心在纵向距离上的分布情况, 它提供了比单极化 HRRP 无法比拟的更多信息量. 随着全极化高分辨成像技术在末制导雷达中逐步走向应用, 基于全极化高分辨距离像的舰船、飞机等目标特征提取与识别技术受到广泛的关注和研究.

近年来, 基于极化目标分解理论的目标特征提取与识别方法成为研究热点. 极化目标分解就是将目标回波的复杂散射过程分解为几种单一的散射过程, 每种散射过程都有个对应的散射机理. 1970 年, Huynen 第一次提出“极化目标分解”的概念<sup>[1]</sup>, 之后 Van Zyl<sup>[2]</sup>, Krogager<sup>[3]</sup>, Cloude<sup>[4,5]</sup>, Lee<sup>[6]</sup>等不断改进和完善, 使得目标极化分解逐步迈向了实用, 先后出现了许多基于目标分解的极化 SAR 图像分类算法. 到目前为止, 极化目标分解方法归纳起来主要有三大类: (1) 以 Mueller 矩

阵为基础的分解理论, 包括 Huynen 分解和 Van Zyl 分解等; (2) 以 Sinclair 散射矩阵分解为基础的分解理论, 包括 Pauli 分解、Krogager 分解和 Cameron 分解等; (3) 以目标相关矩阵的特征值和特征矢量分析为基础的分解理论, 包括 Cloude 等提出的  $H/\alpha$  分解以及 Lee 提出的  $H/\alpha$  改进方法, 该方法更适合用于目标回波部分极化的情况, 在极化 SAR 分类中应用尤为广泛. 此外, Yang 等<sup>[7]</sup>基于目标散射矩阵提出了能够反映目标特征的散射矩阵相似性参数理论, 并且在极化 SAR 分类中得到应用<sup>[8]</sup>.

对于末制导雷达而言, 获得高质量的目标宽带全极化 HRRP 比全极化 SAR 技术更加成熟, 成本更低, 因此研究基于全极化 HRRP 的目标极化特征提取与识别具有重要的理论价值和现实意义.

$H/\alpha$  分解方法得到的极化熵  $H$  和散射角  $\alpha$  只反映了目标散射过程的随机性, 不能全面的反映目标极化特性. 为此, 本文将散射矩阵相似性参数概率

2008-12-29 收稿, 2009-03-09 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 60572138)和“十一五”重点预研项目(批准号: 51301050104)资助

\*\* E-mail: thunderblastg@yahoo.com.cn

描述特征从 3 个扩展到 6 个, 用这些特征描述目标结构特性, 并且提出了描述目标散射能量特性的 Mueller 矩阵相似性参数特征. 这几类特征具有清晰的物理意义, 利用这些从不同角度反映目标特性的特征进行优选后组成目标特征矢量, 通过实测数据实验, 证明了这些特征的可分性和稳健性, 并且取得了理想的识别结果.

## 1 目标全极化 HRRP 的 $H/\alpha/A/P$ 特征

### 1.1 相关矩阵分解基本理论

熵是描述自然界混乱程度的量, 1997 年, Cloude<sup>[5]</sup>将“熵”的概念引入极化理论中, 提出了对目标散射相关矩阵  $T$  进行特征分解的分解理论, 定义了散射熵  $H$  和平均散射角  $\alpha$ , 用于分析目标的散射特性.

令目标极化散射矩阵  $S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$ , 对于单静态互易后向散射的情况  $S_{HV} = S_{VH}$ . 在 Pauli 基下对散射矩阵  $S$  矢量化, 可以得到散射矢量  $k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T$ , 相关矩阵定义为  $T = k \cdot k^H$ .  $T$  为半正定 Hermit 矩阵, 对  $T$  进行特征分解, 可以得到

$$T = \lambda_1 u_1 \cdot u_1^H + \lambda_2 u_2 \cdot u_2^H + \lambda_3 u_3 \cdot u_3^H = \sum_{i=1}^3 \lambda_i u_i \cdot u_i^H \quad (1)$$

其中  $\lambda_i$  为第  $i$  个特征值, 并且  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ,  $u_i$  为归一化的第  $i$  个特征矢量, 即

$$u_i = e^{j\varphi_i} [\cos\alpha_i \quad \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{j\delta_i} \quad \sin\alpha_i \sin\beta_i e^{j\gamma_i}]^T \quad (2)$$

式中  $\alpha_i$  表征了目标的散射机理,  $\beta_i$  为目标定向角,  $\varphi_i$  为  $S_{HH} + S_{VV}$  的相位,  $\delta_i$  为  $S_{HH} + S_{VV}$  与  $S_{HH} - S_{VV}$  之间的相位差,  $\gamma_i$  为  $S_{HH} + S_{VV}$  与  $S_{HV}$  之间的相位差.

散射熵  $H$ 、平均散射角  $\alpha$ 、反熵  $A$  分别定义为

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3 p_i, \text{ 其中 } p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^3 \lambda_j} \quad (3)$$

$$\alpha = p_1 \alpha_1 + p_2 \alpha_2 + p_3 \alpha_3 \quad (4)$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} = \frac{p_2 - p_3}{p_2 + p_3} \quad (5)$$

此外还可以定义参数  $P$ , 它反映了主散射分量能量与次散射能量的比值<sup>[9]</sup>

$$P = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} \quad (6)$$

$H$  值在  $[0, 1]$  之间, 描述了目标散射的随机性. 当  $H=0$  时, 说明目标只有一种主要的散射机理, 相关矩阵只有一个特征值不为 0, 此时处于完全极化状态; 随着  $H$  的增大, 去极化程度增加, 说明目标散射由几种散射过程组成, 不再认为仅存在一个占主要地位的散射机理; 在  $H=1$  的极限情况下, 所能获得的极化信息为 0, 目标的散射完全随机, 处于完全非极化状态.

$\alpha$  在  $0^\circ - 90^\circ$  之间, 反映了目标的主要散射机理. 当  $\alpha=0^\circ$  时, 表示目标的主要散射机理是各向同性的表面散射; 随着  $\alpha$  角度的增加, 反映出的散射机理变为各向异性的表面散射; 当  $\alpha=45^\circ$  时, 表示偶极子散射模型; 在  $\alpha=90^\circ$  的极限时, 表示二面角散射.

### 1.2 全极化 HRRP 的 $H/\alpha/A/P$ 特征

上述相关矩阵分解理论多用于极化 SAR 分类中, 在全极化 HRRP 分解中应用该理论可按如下步骤进行<sup>[10]</sup>.

在步进频全极化雷达体制下, 令目标频域极化散射矩阵为

$$S(f_n) = \begin{bmatrix} S_{HH}(f_n) & S_{HV}(f_n) \\ S_{VH}(f_n) & S_{VV}(f_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $f_n = f_0 + n\Delta f$ ,  $n=0, 1, \dots, N-1$ . 采用逆 Fourier 变换到时域后各个极化通道的高分辨距离像为

$$\begin{cases} s_{HH}(n) = s_{HH}(r_n) = \text{IFFT}(S_{HH}(f_n)) \\ s_{HV}(n) = s_{HV}(r_n) = \text{IFFT}(S_{HV}(f_n)) \\ s_{VH}(n) = s_{VH}(r_n) = \text{IFFT}(S_{VH}(f_n)) \\ s_{VV}(n) = s_{VV}(r_n) = \text{IFFT}(S_{VV}(f_n)), \\ r_n = n\Delta r \\ n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (8)$$

(1) 计算 Pauli 变换  $k(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} [s_{HH}(n) + s_{VV}(n) \quad s_{HH}(n) - s_{VV}(n) \quad 2s_{HV}(n)]^T$ ;

(2) 计算单个距离单元的相关矩阵  $\mathbf{T}(n) = \mathbf{k}(n) \cdot \mathbf{k}^H(n)$ ;

(3) 估计相关矩阵  $\mathbf{T} = \langle \mathbf{T}(n) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{T}(n)$ ;

(4) 特征值分解  $\mathbf{T} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_i^H$ ;

(5) 根据(3)–(6)式计算得到熵  $H$ 、反熵  $A$ 、散射角  $\alpha$  和参数  $P$ 。

需要说明的是, 以上  $H/\alpha/A/P$  特征的提取虽然是在频率步进全极化雷达体制下讨论, 但特征提取方法不限于该种体制雷达, 因为特征是从全极化 HRRP 中提取(而不是频率步进雷达频域回波信号), 与雷达体制无关, 所以由其他宽带雷达获取的全极化 HRRP 也可采用这种方法提取  $H/\alpha/A/P$  特征。

## 2 目标 HRRP 散射矩阵结构相似性参数概率形式特征

### 2.1 散射矩阵结构相似性参数的基本定义

Yang 等为了研究目标特征提取, 提出了目标极化散射矩阵间的相似性参数<sup>[7]</sup>。该相似性参数可以用来表征两个目标之间的散射特征, 它与目标定向角(即目标绕雷达视线的旋转角)和目标回波总功率无关。

如第1节所述, 将目标极化散射矩阵  $\mathbf{S}$  矢量化, 得到  $\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T$ , 在此基础上, 可以定义两个散射矩阵  $\mathbf{S}_1$  和  $\mathbf{S}_2$  之间的相似性参数

$$r(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2) = \frac{|\langle \mathbf{k}_1 \rangle^H \langle \mathbf{k}_2 \rangle|^2}{\|\mathbf{k}_1\|_2^2 \|\mathbf{k}_2\|_2^2} \quad (9)$$

其中矢量  $\mathbf{k}_1$  和  $\mathbf{k}_2$  分别对应  $\mathbf{S}_1$  和  $\mathbf{S}_2$ 。符号  $\|\cdot\|_2$  表示矢量各元素模的平方和。由此可以推导得到任意散射矩阵  $\mathbf{S}$  与几种标准体之间的相似性参数。

(1) 与平板的相似性参数

$$r_{\text{plane}} = r(\mathbf{S}, \text{diag}(1, 1)) =$$

$$p_{\text{plane}} = \frac{\sum_{m=n_1}^{n_2} r_{\text{plane}}(m)}{\sum_{m=n_1}^{n_2} [r_{\text{plane}}(m) + r_{\text{dihedral}}(m) + r_{\text{dipole}}(m) + r_{\text{cylinder}}(m) + r_{\text{thelix}}(m) + r_{\text{rhelix}}(m)]} \quad (16)$$

$$\frac{|S_{HH} + S_{VV}|^2}{2(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2)} \quad (10)$$

(2) 与二面角的相似性参数

$$r_{\text{dihedral}} = r(\mathbf{S}, \text{diag}(1, -1)) = \frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{2(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2)} \quad (11)$$

(3) 与水平偶极子的相似性参数

$$r_{\text{dipole}} = r(\mathbf{S}, \text{diag}(1, 0)) = \frac{|S_{HH}|^2}{|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2} \quad (12)$$

(4) 与圆柱体的相似性参数

$$r_{\text{cylinder}} = r(\mathbf{S}, \text{diag}(2, 1)) = \frac{|2S_{HH} + S_{VV}|^2}{5(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2)} \quad (13)$$

(5) 与左螺旋体的相似性参数

$$r_{\text{thelix}} = r\left(\mathbf{S}, \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}\right) = \frac{|S_{HH} - S_{VV} - 2jS_{HV}|^2}{4(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2)} \quad (14)$$

(6) 与右螺旋体的相似性参数

$$r_{\text{rhelix}} = r\left(\mathbf{S}, \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}\right) = \frac{|S_{HH} - S_{VV} + 2jS_{HV}|^2}{4(|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2)} \quad (15)$$

### 2.2 全极化 HRRP 的结构相似性参数概率特征

假设时域距离像如(8)式所示, 经过预处理后, 目标所占的距离单元区域为  $[n_1, n_2]$ 。在目标散射矩阵相似性参数的基础上, 可以构造参数的概率形式描述。在目标区域, 定义目标与平板相似性参数的概率为

依次可以定义目标与其他几种标准体相似性参数的概率  $p_{\text{dihedral}}$ ,  $p_{\text{dipole}}$ ,  $p_{\text{cylinder}}$ ,  $p_{\text{helix}}$ ,  $p_{\text{rhelix}}$ . 将这些相似性参数的概率组成一组特征, 实际上描述了目标结构的后向散射相似性.

### 3 目标全极化 HRRP 能量特征

#### 3.1 目标全极化 HRRP 的 Mueller 矩阵

飞机、舰船等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作用决定了飞机总的散射特性. 在雷达测量过程中, 这些复杂目标的散射特性表现出一定的随机性, 必须采用统计的方法研究复杂目标的能量特性, 这时只能用 Mueller 矩阵来描述<sup>[11]</sup>. Mueller 矩阵的定义为

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}(\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{R}^{-1} \quad (17)$$

其中  $\mathbf{S}$  为目标极化散射矩阵,  $\otimes$  表示 Kronecker 乘积,  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{bmatrix}$ , “\*” 表示复共轭.

由于飞机、舰船等复杂目标的散射具有一定的随机性, 所以这些目标 HRRP 的 Mueller 矩阵需要对散射矩阵元素的乘积进行集合平均运算后得到, 即

$$\mathbf{M}_{\text{HRRP}} = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{m=n_1}^{n_2} \mathbf{R}(\mathbf{S}_m \otimes \mathbf{S}_m^*) \mathbf{R}^{-1} \quad (18)$$

其中  $\mathbf{S}_m$  表示目标第  $m$  个距离单元的散射矩阵,  $[n_1, n_2]$  为目标所占距离单元区域. 目标 HRRP 的 Mueller 矩阵是功率型散射矩阵, 它反映了目标对入射波和散射波 Stokes 矢量的能量变换关系.

#### 3.2 Mueller 矩阵的相似性参数

为了提取目标全极化 HRRP 的能量特征, 本文定义 Mueller 矩阵的相似性参数. 令两类目标 HRRP 的 Mueller 矩阵分别为  $\mathbf{M}_1$  和  $\mathbf{M}_2$ , 那么  $\mathbf{M}_1$  和  $\mathbf{M}_2$  的相似性参数可以定义为

$$r(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2) = \frac{\sum_{i,j=1}^4 \mathbf{M}_{1ij} \mathbf{M}_{2ij}}{\sqrt{\|\mathbf{M}_1\|_F^2 \cdot \|\mathbf{M}_2\|_F^2}} \quad (19)$$

其中  $F$  表示 Frobenius 范数.

按照(19)式定义的 Mueller 矩阵相似性参数具

有绕雷达视线的旋转不变性, 下面给出具体证明过程.

**证明** 假设绕雷达视线的旋转矩阵为

$$\mathbf{J}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (20)$$

则旋转后的散射矩阵为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{J}(-\varphi) \mathbf{S} \mathbf{J}(\varphi) \quad (21)$$

那么旋转后的 Mueller 矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}' &= \mathbf{R}(\mathbf{S}' \otimes \mathbf{S}'^*) \mathbf{R}^{-1} = \\ &= \mathbf{R}[(\mathbf{J}(-\varphi) \mathbf{S} \mathbf{J}(\varphi)) \otimes (\mathbf{J}(-\varphi) \mathbf{S}^* \mathbf{J}(\varphi))] \mathbf{R}^{-1} = \\ &= \mathbf{R}[(\mathbf{J}(-\varphi) \otimes \mathbf{J}(-\varphi)) (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \\ & \quad (\mathbf{J}(\varphi) \otimes \mathbf{J}(\varphi))] \mathbf{R}^{-1} \end{aligned} \quad (22)$$

令  $\mathbf{Y} = \mathbf{J}(\varphi) \otimes \mathbf{J}(\varphi)$ , 显然  $\mathbf{Y}^{-1} = \mathbf{Y}^H = \mathbf{J}(-\varphi) \otimes \mathbf{J}(-\varphi)$ ,  $H$  表示共轭转置, 所以  $\mathbf{Y}$  是酉矩阵, 则有

$$\mathbf{M}' = \mathbf{R}[\mathbf{Y}^H (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{Y}] \mathbf{R}^{-1} \quad (23)$$

令  $\mathbf{U} = \mathbf{R} \mathbf{Y} \mathbf{R}^{-1}$ , 由  $\mathbf{R}$  矩阵的定义易推得  $\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{I}$ , 则  $\mathbf{U}$  是一个 4 阶酉矩阵, 那么有

$$\begin{aligned} \mathbf{M}' &= \mathbf{R}[\mathbf{Y}^H (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{Y}] \mathbf{R}^{-1} = \\ &= (\mathbf{R} \mathbf{Y} \mathbf{R}^{-1})^H (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{R} \mathbf{Y} \mathbf{R}^{-1}) = \\ &= \mathbf{U}^{-1} \mathbf{R} (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{U} = \\ &= \mathbf{U}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{U} \end{aligned} \quad (24)$$

所以  $\mathbf{M}'$  是  $\mathbf{M}$  的酉变换.

易得到性质  $r(\mathbf{M}'_1, \mathbf{M}'_2) = r(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2)$ , 即相似性系数具有旋转不变性. **证毕.**

根据(19)式定义的 Mueller 矩阵之间的相似性参数, 可以得到目标 HRRP 的 Mueller 矩阵  $\mathbf{M}$  与平板、二面角、圆柱体、偶极子、左螺旋体和右螺旋体等标准体的能量相似性参数, 分别用  $\mathbf{M}_{\text{plane}}$ ,  $\mathbf{M}_{\text{dihedral}}$ ,  $\mathbf{M}_{\text{cylinder}}$ ,  $\mathbf{M}_{\text{dipole}}$ ,  $\mathbf{M}_{\text{helix}}$  和  $\mathbf{M}_{\text{rhelix}}$  表示, 表达式分别是

$$\mathbf{M}_{\text{plane}} = \frac{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M}_{\text{plane}} \rangle_F^2}{\sqrt{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M} \rangle_F^2 \cdot \langle \mathbf{M}_{\text{plane}}, \mathbf{M}_{\text{plane}} \rangle_F^2}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{plane}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$M_{r_{\text{dihedral}}} = \frac{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M}_{\text{dihedral}} \rangle_F^2}{\sqrt{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M} \rangle_F^2 \cdot \langle \mathbf{M}_{\text{dihedral}}, \mathbf{M}_{\text{dihedral}} \rangle_F^2}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{dihedral}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$M_{r_{\text{cylinder}}} = \frac{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M}_{\text{cylinder}} \rangle_F^2}{\sqrt{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M} \rangle_F^2 \cdot \langle \mathbf{M}_{\text{cylinder}}, \mathbf{M}_{\text{cylinder}} \rangle_F^2}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{cylinder}} = \begin{bmatrix} 2.5 & 1.5 & 0 & 0 \\ 1.5 & 2.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$M_{r_{\text{dipole}}} = \frac{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M}_{\text{dipole}} \rangle_F^2}{\sqrt{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M} \rangle_F^2 \cdot \langle \mathbf{M}_{\text{dipole}}, \mathbf{M}_{\text{dipole}} \rangle_F^2}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{dipole}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$M_{r_{\text{helix}}} = \frac{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M}_{\text{helix}} \rangle_F^2}{\sqrt{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M} \rangle_F^2 \cdot \langle \mathbf{M}_{\text{helix}}, \mathbf{M}_{\text{helix}} \rangle_F^2}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{helix}} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$M_{r_{\text{rhelix}}} = \frac{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M}_{\text{rhelix}} \rangle_F^2}{\sqrt{\langle \mathbf{M}, \mathbf{M} \rangle_F^2 \cdot \langle \mathbf{M}_{\text{rhelix}}, \mathbf{M}_{\text{rhelix}} \rangle_F^2}}$$

$$\mathbf{M}_{\text{rhelix}} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

纵观以上特征,  $H/\alpha/A/P$  特征反映了目标 HRRP 散射的随机性, 散射矩阵相似性参数特征反映了目标的结构特征, Mueller 矩阵相似性特征反映了目标的能量特征, 这些特征从不同的侧面反映了目标 HRRP 的极化特征. 下一节将采用实测数据验证这些特征的有效性, 然后对特征进行优

选, 采用优选后的特征进行目标识别.

## 4 实测数据实验与分析

### 4.1 特征的有效性

本节从类可分性角度验证几种 HRRP 特征的有效性. 如果同类别目标特征分布比较密集, 不同类别目标特征相距较远, 分类识别就比较容易正确. 在实际目标提取特征时, 要求所提取的特征对不同类别的目标差别很大而同类目标差别较小. 但是提取的特征不一定会使目标之间可分性很好. 因此, 需要制定一定的准则——类别可分性度量准则, 来度量不同类别目标特征的可分性. 为此, 选用常用的类内、类间离差矩阵作为可分性度量的准则. 设  $\mathbf{S}_w$ ,  $\mathbf{S}_b$  分别表示类内、类间离差矩阵, 可分性判据值如下表示<sup>[12]</sup>:

$$J = \frac{\text{trace}(\mathbf{S}_b)}{\text{trace}(\mathbf{S}_w)} \quad (31)$$

$J$  越大, 说明选用的特征使得不同类别的可分性越好.

实验采用的是暗室实测数据. 测量雷达为频率步进体制雷达, 工作频率范围是 34.7-35.7 GHz, 频率步进间隔为 2 MHz, 观测频率点数  $N=500$ , 水平、垂直极化分时发射、同时接收; 五类飞机目标分别为: F, H, J, W, Y; 目标为缩比模型, 长约 1.5—3.0 m, 宽约 1.0—1.8 m; 测试姿态为  $0^\circ$  横滚角、 $0^\circ$  和  $15^\circ$  俯仰角, 方位角范围为  $0^\circ-30^\circ$ ,  $70^\circ-110^\circ$  和  $150^\circ-180^\circ$ , 方位  $0^\circ$  表示从飞机鼻锥方向入射, 方位角采样间隔为  $1^\circ$ .

**4.1.1  $H/\alpha/A/P$  特征的有效性** 选用方位  $0^\circ-30^\circ$ , 俯仰  $0^\circ$  和  $15^\circ$  姿态下的全极化 HRRP, 提取  $H/\alpha/A/P$  4 个特征, 得到每个特征对于不同类别目标的可分性值, 如图 1 所示. 图 1 所示的可分性结果包括两方面: (i) 5 类飞机两两之间特征的可分性, 共有 10 种组合方式, 图 1(a), (b) 横轴表示任意两类飞机目标组合, 纵轴表示选用不同特征得到的横轴相应类别之间的可分性值  $J$ . (ii) 单类与多类飞机之间的可分性, 图 1(c) 表示每类飞机与其他四类飞机之间的可分性值, 前 5 个横坐标 (Y, F, H, J, W) 表示俯仰  $0^\circ$  下五类飞机, 后 5 个横坐标表示俯仰  $15^\circ$  下五类飞机,

纵轴表示每个特征对每类飞机的可分性值  $J$ 。以下几幅图横纵坐标定义与此类似。

从图1中可以看出, 无论是两两之间分类还是单类与多类之间分类, 特征  $H$  和  $\alpha$  对不同类别目标之间可分性值比较稳定, 在俯仰  $0^\circ$  和  $15^\circ$  俯仰角下, 可分性值均保持在6以上。特征  $A$  和  $P$  不稳定, 在俯仰  $0^\circ$  时, 对于 Y-F, 特征  $A$  的可分性值超过了  $H$ ,  $\alpha$  的可分性值, 但是在俯仰  $15^\circ$  下可分性值相对于特征  $H$  和  $\alpha$  要小些, 而特征  $P$  的可分性值均比较小, 这说明特征  $A$  和  $P$  属于不稳健的特征, 其姿态敏感性较强, 若选取这两个特征, 会降低目标识别性能。

#### 4.1.2 散射矩阵结构相似性参数概率特征有效性

根据第2节定义的散射矩阵结构相似性参数概率形式特征, 图2给出了相应特征在俯仰  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  对任

意两类之间和多类之间的可分性值。观察图2(a), (b)所示结果, 目标结构与 Plane, Dihedral 和 Cylinder 的相似性概率特征可分性较高, 在识别中选用这三个特征, 各个类别的分类性能比较好。目标姿态在俯仰  $15^\circ$  时, 三个特征的可分性值均在15以上, 说明各类飞机在俯仰  $15^\circ$  时的可分性优于俯仰  $0^\circ$  时的可分性。相对而言, Dipole、LHelix 和 RHelix 三个特征对可分性的贡献较小。观察图2(c)给出的多类飞机之间的可分性结果, 虽然可分性值不如两两飞机之间高, 但是几个特征对可分性贡献的相对大小关系与两两飞机相同。需要指出的是, 本文定义的与 Dipole 相似性参数是指与水平偶极子的相似性参数, 即只反映了目标 HH 同极化的结构相似特性。对于飞机这种复杂目标, 若定义与垂直偶极子的相似性参数, 反映了 VV 同极化的结构相

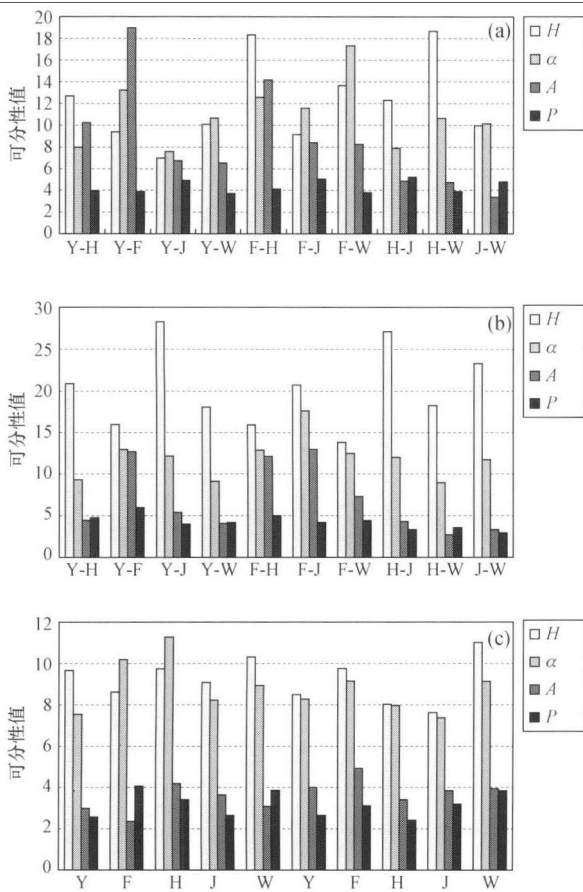


图1  $H/\alpha/A/P$  特征的可分性值

(a) 俯仰  $0^\circ$ , 方位  $0^\circ$  -  $30^\circ$  两两目标之间可分性值; (b) 俯仰  $15^\circ$ , 方位  $0^\circ$  -  $30^\circ$  两两目标之间可分性值; (c) 方位  $0^\circ$  -  $30^\circ$  单类与其他类目标之间可分性值

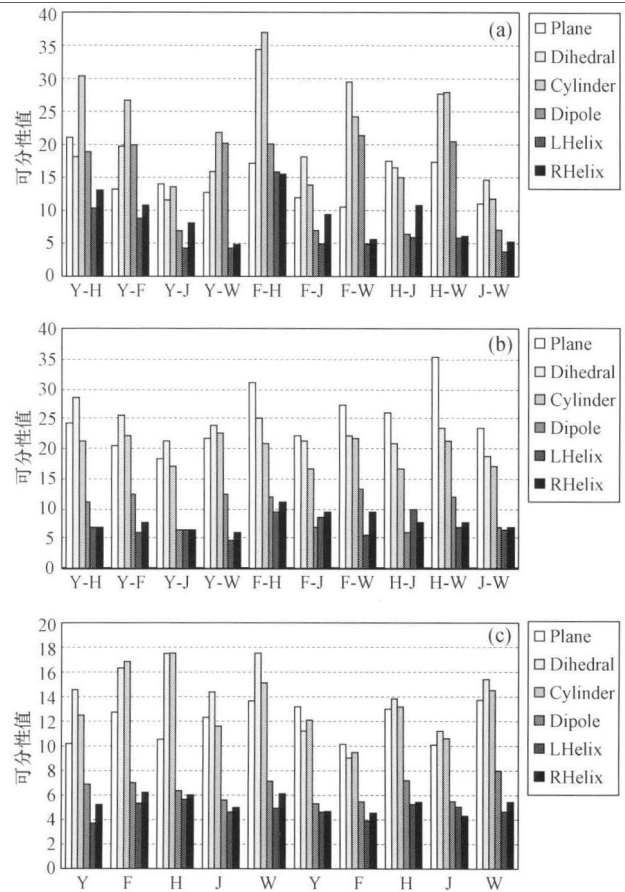


图2 散射矩阵相似性参数概率形式特征的可分性值

(a) 俯仰  $0^\circ$ , 方位  $0^\circ$  -  $30^\circ$  两两目标之间可分性值; (b) 俯仰  $15^\circ$ , 方位  $0^\circ$  -  $30^\circ$  两两目标之间可分性值; (c) 方位  $0^\circ$  -  $30^\circ$  单类与其他类目标之间可分性值

似性，对可分性的贡献与水平偶极子相似。

**4.1.3 HRRP 的能量特征有效性** 反映目标 HR-RP 能量特性的 Mueller 矩阵相似性参数特征可分性值如图 3 所示。在俯仰 0°和 15°，目标 Mueller 矩阵与 Plane, Dihedral, Cylinder, LHelix 和 RHelix 五种标准体的能量散射相似性参数特征对各类飞机分类具有较好的稳定性。相对而言，与 Plane, Dihedral, Cylinder 三种标准体的相似性参数特征可分性较好。与 Dipole 散射能量相似性特征的可分性极小，几乎无法分开任意两类，这是因为任意两类目标的 HH 同极化散射能量均比较接近，不适合作为分类特征。

**4.1.4 各个特征的姿态敏感性** 为了观察上述几种类型特征的姿态敏感性，设计了如下实验：以 Y, W

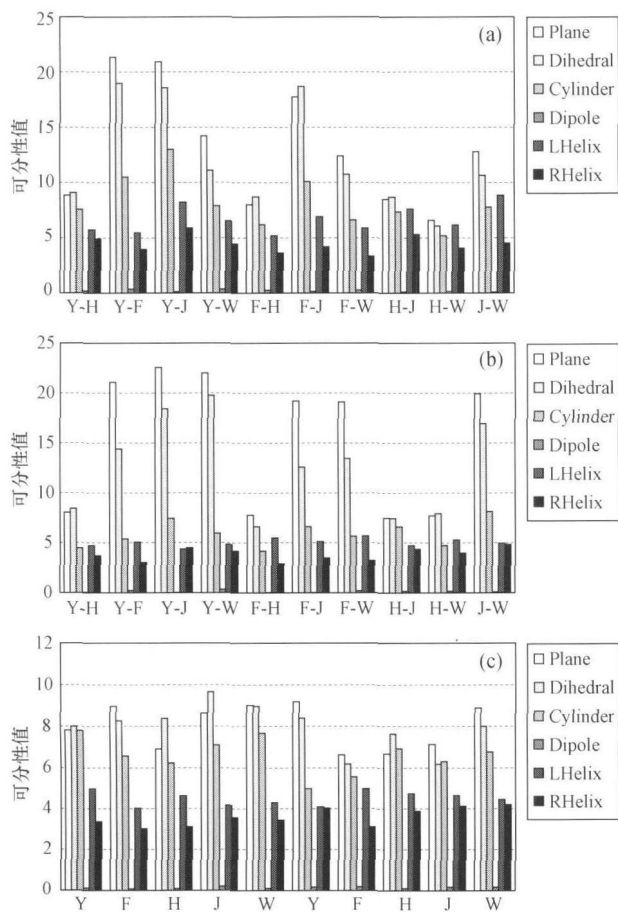


图 3 HRRP 的能量特征的有效性

(a) 俯仰 0°，方位 0°~30° 两两目标之间可分性值；(b) 俯仰 15°，方位 0°~30° 两两目标之间可分性值；(c) 方位 0°~30° 单类与其他类目标之间可分性值

两类飞机之间的可分性为例，分别改变飞机的方位角、俯仰角，计算每个特征对 Y 和 W 的可分性值，结果如图 4 所示。纵轴表示各个特征，其中 Plane\_S 表示散射矩阵的相似性参数概率特征，Plane\_M 表示 Mueller 矩阵相似性参数特征，其他类似，横轴表示在相应姿态下各个特征的可分性值 J。

RHelix\_S, LHelix\_S, Dipole\_M, RHelix\_M, LHelix\_M, P, A 等特征在俯仰和方位姿

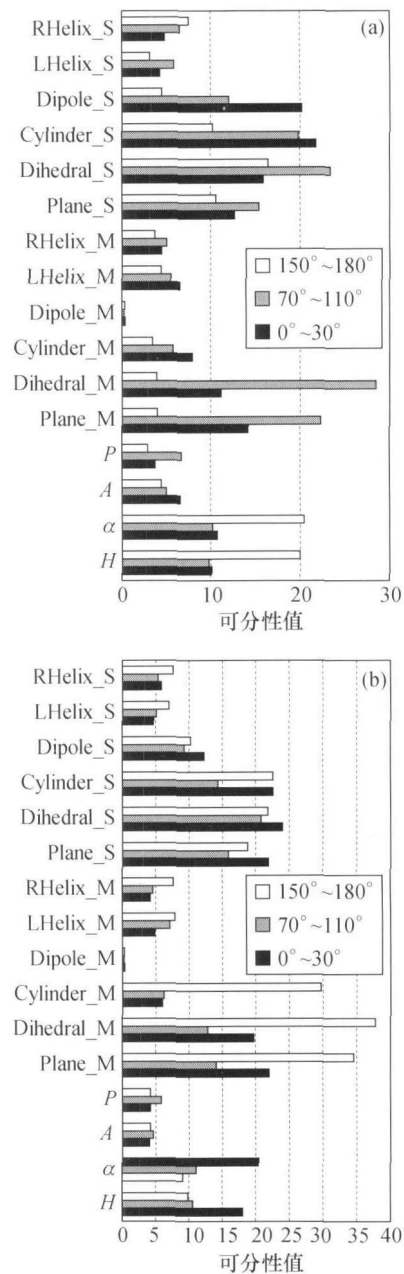


图 4 各个特征的姿态敏感性

(a) 俯仰 0°特征姿态敏感性；(b) 俯仰 15°特征姿态敏感性

态发生变化时, 其可分性值均比较小, 而且变化较小, 表明这几个特征对可分性贡献较小, 不适合选取这几个特征为分类所用. Cylinder\_S, Dihedral\_S, Plane\_S, H,  $\alpha$  等特征可分性值比较大, 而且随方位俯仰姿态变化较稳定, 这是因为散射矩阵相似性特征和熵特征反映了目标的结构特征, Y飞机和W飞机在结构上的差异反映在这种特征差异上, 所以这类特征比较适合作为分类特征. Cylinder\_M, Dihedral\_M, Plane\_M三个能量特征可分性值随方位姿态变化较大, 这是反映了飞机散射能量差异随姿态的变化情况, 在俯仰15°、方位150°—180°姿态范围内, 三个特征的可分性值远大于其他特征的可分性值, 此时选用这类特征能达到良好的分类性能.

#### 4.2 特征优选与识别性能

根据以上对各类特征有效性的实验与分析, 选取以下三类共8个特征组成特征矢量进行五类飞机目标分类识别: (i) 反映目标散射随机性的H,  $\alpha$ 特征; (ii) 反映目标结构相似性概率的特征参数Cylinder\_S, Dihedral\_S, Plane\_S; (iii) 反映目标能量特性的特征参数Cylinder\_M, Dihedral\_M, Plane\_M. 分类器采用适合小样本分类的SVM<sup>[13]</sup>作为分类器, 得到五类飞机的多次实验平均识别结果如表1所示.

表1 采用本文特征的五类飞机识别结果

目标俯仰角	单位: %									
	俯仰 0°					俯仰 15°				
	Y	F	H	J	W	Y	F	H	J	W
方位 0°—30°	92.1	96.0	97.6	96.0	95.2	95.2	96.0	91.9	96.8	94.4
方位 70°—110°	95.1	96.3	93.3	94.5	95.7	95.7	95.1	92.0	92.3	96.3
方位 150°—180°	95.2	95.1	96.3	96.7	96.7	95.9	92.7	95.1	96.7	93.6

从表1的实验结果可以看出, 采用优选后的特征组成特征矢量, 对于五类飞机的识别效果均在92%以上. 文献[14]提出了12个目标宽带极化特征, 各个特征的详细定义可参考该文献第七章, 采用这12个特征组成特征矢量对五类飞机识别, 分类器也采用SVM, 得到多次实验平均识别结果如表2所示(识别结果与原文献略有差别, 主要原因是分类器不同). 对比表1和表2的识别结果可以看出, 利用本文提出的极化特征和文献[14]提出的极

化特征对飞机进行识别, 均能达到满意的识别结果, 这也证明了本文提出的三类共8个特征是有效的. 究其原因, 首先本文定义三类特征比较全面反映了飞机目标全极化HRRP的极化特征; 其次, 对特征进行了优选, 剔除了对分类不利的特征, 选用有利于分类的特征.

表2 采用文献[13]特征的五类飞机识别结果

目标俯仰角	单位: %									
	俯仰 0°					俯仰 15°				
	Y	F	H	J	W	Y	F	H	J	W
方位 0°—30°	93.5	97.4	98.0	93.6	96.7	96.8	93.6	95.2	96.5	95.7
方位 70°—110°	92.9	96.0	93.8	92.6	94.2	92.8	95.2	97.5	95.1	97.6
方位 150°—180°	96.2	93.6	97.1	96.8	96.5	95.3	98.8	93.5	93.5	96.8

#### 4.3 讨论

本节从特征的可分性值和识别率两个角度验证了三类极化特征的有效性, 三类特征从不同的角度描述了目标之间的差异, 其中H/ $\alpha$ 特征和Mueller矩阵的能量特征都是基于功率型矩阵得到的, 反映结构特征的散射矩阵相似性参数概率特征是基于目标散射矩阵得到的.

实际上, 对于飞机这种复杂目标散射的随机性, 一种更有效的描述手段是统计处理. 统计处理中用到的数据通常须具非相干可加性, 因此采用功率矩阵(如Mueller矩阵、Kennaugh矩阵、协方差矩阵和相关矩阵)对分布式复杂目标进行描述. 这些矩阵元素的获得通常有两条途径: 一条是先通过相干测量获得散射矩阵, 然后再利用散射矩阵计算得到; 另一条则不需测量散射矩阵, 而是利用不同收发天线组合直接通过功率测量获得. 后者称为非相干测量, 与散射矩阵的相干测量对应. 相干测量需要对相位进行测量, 而非相干测量则不用<sup>[15]</sup>.

对于全极化导引头雷达而言, 导引头在高速运动过程中, 由于速度、加速度和导引头震动的影响, 雷达很难测准目标极化散射矩阵的相位(绝对相位或者相对相位), 采用非相干测量得到目标的功率矩阵是比较可行的方案. 因此, 本文提出的H/ $\alpha$ /A/P特征和基于Mueller矩阵的能量特征比较适合这种背景下的目标特征提取.

另外需要说明的是, 文中对极化特征的优选是

基于两两目标之间和单类与多类目标之间的可分性,结果表明:每个特征对多类目标的可分性值虽然与两两目标之间可分性值不同,但是各个特征之间可分性值的相对大小关系与两两目标相同,所以,根据多类目标之间可分性值和两两目标之间可分性值优选的极化特征是相同的,识别结果也相同。

## 5 结论

本文研究了宽带全极化雷达目标 HRRP 熵特征、散射矩阵相似性参数概率特征,并提出了 Mueller 矩阵相似性参数特征,这三类极化特征分别表征了目标散射随机性、目标物理结构相似性、散射能量相似性,这些特征具有清晰的物理意义。采用飞机目标的实测数据,从特征对类可分性贡献和识别率两个角度验证了本文提出特征的有效性以及姿态和识别率的稳健性。实验结果证明,这三类特征能够反映目标之间的差异,取得了理想的识别效果。值得指出的是,本文提出的极化特征物理意义与文献[14]不同,同样达到了满意的识别结果。本文研究的极化特征能够更清晰、全面了解目标物理结构,丰富了目标极化特性分析技术,为目标识别提供了新的极化特征。

## 参 考 文 献

- Cloude SR, Pottier E A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498-518
- Van Zyl JJ. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(1): 36-45
- Krogager E. New decomposition of the radar target scattering matrix. *Electronics Letters*, 1990, 26(18): 1525-1527
- Pottier E, Cloude SR. Application of the  $H/A/\alpha$  polarimetric decomposition theorems for land classification. In: *SPIE Conference on Wideband Interferometric Sensing and Imaging Polarimetry*, San Diego, CA, USA, 1997, 132-143
- Cloude SR, Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 549-557
- Lee JS, Grunes MR, Ainsworth TL, et al. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2249-2258
- Yang J, Peng YN, Lin SM. Similarity between two scattering matrices. *Electronic Letters*, 2001, 37(3): 193-194
- 徐俊毅, 杨健, 彭应宁. 双波段极化雷达遥感图像分类的新方法. *中国科学, E 辑*, 2005, 35(10): 1083-1095
- 刘秀清. 全极化合成孔径雷达极化信息处理技术研究. 中国科学院电子学研究所博士学位论文, 北京: 2004
- Berizzi F, Martorella M, Capria A.  $H/\alpha$  polarimetric features for man-made target classification. In: *IEEE Radar Conference*, Rome, Italy, 2008, 1596-1601
- Kostinski AB, Boerner WM. On foundations of radar polarimetry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(12): 1395-1404
- Theodoridis S, Koutroumbas K 著, 李晶皎, 朱志良, 王爱侠, 等译. 模式识别(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2004, 113-117
- Vapnik VN. *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York: Springer, 2000, 123-170
- 王雪松. 宽带极化信息处理的研究. 国防科技大学博士学位论文, 长沙: 1999
- 周晓光. 极化 SAR 图像分类方法研究. 国防科技大学博士学位论文, 长沙: 2008