

基于极化分解的目标识别方法研究*

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 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极化特性。利用极化分解将复杂目标分解为三个简单目标,并提取描述三目标关系的特征参数对四类军用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, 目标分解

分类号 TN959.1+7

The Study of Target Recognition Based on the Polarization Decomposition

Li Dun Xiao Shunping Wang Xuesong Lv Tongguang

(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, the property of radar target in the optics region is investigated on the basis of polarimetric and high-resolution radar system. By means of polarization decomposition theory, one complex target is decomposed into three simple targets. Polarization feature parameter extracted to describe the relationship of these simple targets is used in target recognition of four kinds of aircraft. Good results are obtained.

Key words polarization, target recognition, target decomposition

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^[1,6]。在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的刻画,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^[6,7,8]。

飞机目标是由多个子散射体组成的复杂目标^[1],将复杂的飞机目标分解为简单目标,可以得到用于飞机目标识别的有用信息。本文针对四种飞机目标,对其相干矩阵进行特征值分解,将它分解为三个简单目标,并提取有关信息作为目标识别特征,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。

1 极化雷达目标分解方法

1970年, Huynen 首先提出了极化雷达目标分解理论^[2]。目标分解主要针对的是复杂目标(或非确定性目标)。复杂目标对入射波的散射行为可以看作一个随机过程,对此类目标散射特性的描述需要采用统计的方法,其数学表征主要是相干矩阵 T 或 Mueller 矩阵。

先从确定性目标(简单目标)的 Sinclair 散射矩阵 S 入手^[3],且

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

令

$$k_p = \frac{1}{2} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad S_{HV} + S_{VH} \quad i(S_{HV} - S_{VH})]^T \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助

1999年2月5日收稿

第一作者: 李盾, 男, 1971年生, 博士生

于是可以生成 4×4 相干矩阵 T

$$T = k_p k_p^H \quad (3)$$

对于单站情况下传播介质满足互易性条件的雷达目标, 在后向散射的情况下, 若采用如图 1 的天线坐标系, 则此时相干矩阵 T 的第 4 行和第 4 列元素均为 0, 因此相干矩阵 T 可以写成等价的 3×3 Hermite 矩阵 T_A (采用下标 A 是为了表明使用天线坐标系)。

对于不确定性目标(复杂目标), 它的散射行为可以看作一个随机过程, 必须求集合平均, 此时 S_A 、 T_A 分别写作 S_A 、 T_A 。对目标的分解主要基于 T_A 。

根据矩阵理论, 3×3 Hermite 矩阵 T_A 可以分解为三个矩阵之和^[4]:

$$T_A = \lambda_1 e_1 e_1^H + \lambda_2 e_2 e_2^H + \lambda_3 e_3 e_3^H \quad (4)$$

其中 $\lambda(i = 1, 2, 3)$ 是矩阵 T_A 的三个特征值, $e_i(i = 1, 2, 3)$ 为矩阵 T_A 的特征矢量, 它们分别对应着三种不同的简单目标(确定性目标)。因此, 任何复杂目标都可以看成三种简单目标的合成, $\lambda(i = 1, 2, 3)$ 为三种目标的权值, 可以理解为它们发生的概率。

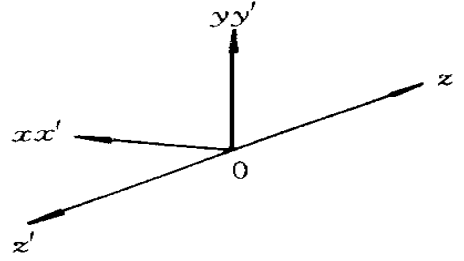


图 1 天线坐标系

Fig. 1 Antenna coordinates

3 飞机目标散射波极化特征提取

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目标总的散射特性, 飞机目标的整体散射特性可以用相干矩阵 T_A 表示。根据上面的讨论, 可以按(4)式将一个飞机目标分解为三个简单目标, 通过分析三种简单目标之间的关系提取用于飞机目标识别的特征量。

在一个复杂的飞机目标被分解为三个简单目标之后, 每个目标对应着一个极化散射矩阵。极化散射矩阵表征了目标在给定取向的散射特性, 它随目标姿态角的变化而变化。对于极化散射矩阵而言, 存在一组与目标绕视线旋转或雷达极化基无关的极化不变量^[6], 包括 Sinclair 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、功率散射矩阵的 Frobenius 范数、去极化系数 D 等。在这几个极化不变量中, 值得注意的是去极化系数 D , 研究表明, 去极化系数 D 大致反映了目标散射中心的数量^[6]。去极化系数 D 被定义为:

$$D = \frac{2^{-1} S_2^2 + 2 S_{HV}^2}{S_{HH}^2 + S_{VV}^2 + 2 S_{HV}^2} \quad (5)$$

其中 $S_1 = S_{HH} + S_{VV}$, 而 $S_2 = S_{HH} - S_{VV}$ 。

若把一个复杂目标分解为三个简单目标, 分别记为目标 1、目标 2 和目标 3, 它们对应的特征值为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 而去极化系数分别为 D_1 、 D_2 和 D_3 。如前所述, 特征值 $\lambda(i = 1, 2, 3)$ 为三种目标的权值, 表示它们发生的概率, 而去极化系数大致反映了目标散射中心的数量, 于是定义一个参量 DD 来大致反映复杂目标散射中心的数量, 即:

$$DD = \sum_{i=1}^3 P_i D_i \quad (6)$$

其中

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^3 \lambda_j} \quad (7)$$

这样, DD 可以作为目标识别的特征之一。

此外, 利用散射矩阵和 Mueller 矩阵的关系, 还可提取第二种用于识别的特征。目标 1、2、3 对应的 Sinclair 散射矩阵为 S_1 、 S_2 、 S_3 , 其对应的 Mueller 矩阵为 M_1 、 M_2 和 M_3 。对于某一个发射波 J_T (采用 Stokes 矢量表示), 目标 1、2、3 的散射回波为 $J_{Si}(i = 1, 2, 3)$, 且^[5]

$$J_{Si} = M_i J^T \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

显然, $J_{Si} (i = 1, 2, 3)$ 唯一地对应着 Poincare 极化球上之一点。记 $J_{Si} (i = 1, 2, 3)$ 为

$$J_{Si} = [g_{i0} \ g_{i1} \ g_{i2} \ g_{i3}]^T \quad i = 1, 2, 3$$

将 $J_{Si} (i = 1, 2, 3)$ 归一化使得 $g_{i0} = 1 (i = 1, 2, 3)$, 这样, $J_{Si} (i = 1, 2, 3)$ 可以用准 Stokes 矢量表示为 $J_{Si} (i = 1, 2, 3)$, 且

$$J_{Si} = [g_{i1} \ g_{i2} \ g_{i3}]^T \quad i = 1, 2, 3$$

则散射回波就对应于单位 Poincare 极化球上的点^[6], 且坐标分别为 (g_{11}, g_{12}, g_{13}) 、 (g_{21}, g_{22}, g_{23}) 和 (g_{31}, g_{32}, g_{33}) 。记三点在球面上所围成球面面积为 S_{Δ} , 选择 S_{Δ} 作为体现目标散射特性的参量。显然, S_{Δ} 与所选择的初始发射波极化状态有关。可以这样来选择初始发射波极化状态, 使得同一目标在不同方位下的 S_{Δ} 近似相同而不同目标的 S_{Δ} 有较大区别。因此, 这样选择得到的 S_{Δ} 也可以作为目标识别的特征。

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; 四类军用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 ~ 30°, 方位角采样间隔为 1°。

实验中分别选择水平线极化和垂直线极化作为发射波的极化状态, 其对应的 Stokes 矢量为 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 和 $[1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$, 对应的 S_{Δ} 分别记为 $S_{H\Delta}$ 和 $S_{V\Delta}$ 。图 2 给出了是四种飞机目标回波的极化特征参数 DD 、 $S_{H\Delta}$ 和 $S_{V\Delta}$ 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 $H_a = 3^\circ$ 的方位窗口, 在方位窗口内对特征量进行平滑^[6], 平滑公式为:

$$DD_s(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} DD(p) \quad (9)$$

$$S_{H\Delta_s}(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} S_{H\Delta}(p) \quad (10)$$

$$S_{V\Delta_s}(p_0) = \frac{1}{N_a} \sum_{p=p_0}^{p_0+N_a-1} S_{V\Delta}(p) \quad (11)$$

式中 DD_s 、 $S_{H\Delta_s}$ 和 $S_{V\Delta_s}$ 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 $p_0 = 0^\circ; 1^\circ; \dots; 30^\circ - N_a$ 。

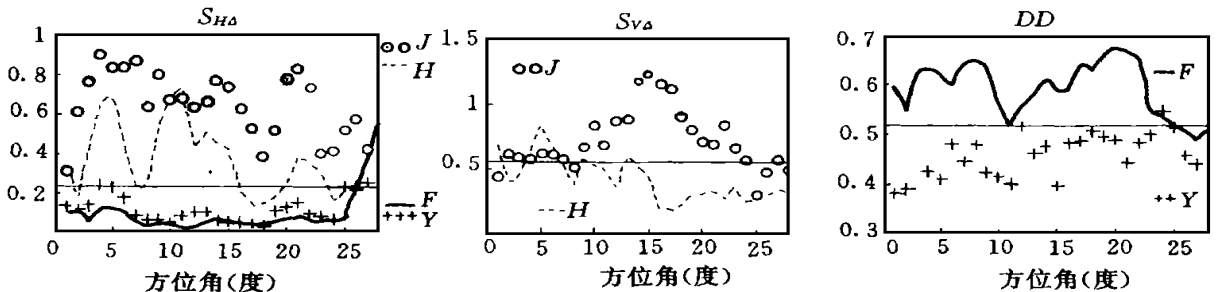


图 2 目标极化特征参数

Fig. 2 Polarization feature parameter of targets

根据图 2 可以设计出如图 3 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 的目标识别率。在理想情况下, 总希望在各级分类器中都能选择到与目标方位无关的门限值, 但对于光学区复杂目标识别问题, 特别是待识别目标类别数目较大时, 这是很难做到的。

不过, 只要提取到不敏感于目标姿态的特征参数, 同时不同目标类间的特征参数差别又较大, 就有可能选择到较理想的分类器判门限, 这种门限基本上不依赖于目标的观测方位。

表 1 识别结果

Tab. 1 Recognition results

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%	86.2	75.8	89.6	93.1

实验结果表明, 可以将飞机这样的复杂目标分解为简单单个目标, 并提取有关特征用于识别。实验中利用了 DD 、 $S_{H\Delta}$ 和 $S_{V\Delta}$ 等参数作为特征进行识别实验, 并获得了较好的识别率。因此, 文中所提取的 DD 、 $S_{H\Delta}$ 和 $S_{V\Delta}$ 等参数是对方位不太敏感的特征, 具有一定的同类聚合性和异类之间的分离性, 使用简单的树状分类器即可获得良好的分类识别效果。

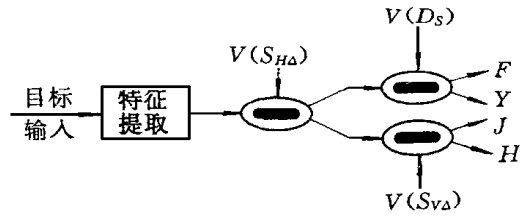


图 3 目标识别器结构示意图

Fig. 3 Target recognizer

参考文献

- 1 图契科夫 П Т 主编, 马清海 等译. 飞行器的雷达特性. 河南: 信息获取与处理技术交流中心, 1988: 1 ~ 4
- 2 Huynen J R . Phenomenological theory of radar targets. Ph. D. dissertation . Technical Univ. Delft . The Netherlands, 1970
- 3 Cloude S R . A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry, IEEE Trans. GRE, 3, 1996, GRE- 34(2): 498 ~ 518
- 4 Pottier E . On Radar Full Polarimetric Target Decomposition Theorems with Application to Classification and Identification of Real Target Cross Section, Int'l Conf. Oo Radar, Paris, 1994: 330 ~ 335
- 5 Kostinski A B, Boerner W M . On Foundations of Radar Polarimetry. IEEE Trans. On AP, 12, 1986, AP- 34(12): 1395 ~ 1404
- 6 肖顺平. 宽带极化雷达目标识别的理论与应用. : 国防科技大学电子技术系博士论文. 12, 1995
- 7 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
- 8 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. 北京: 电子学报, 1997, 25(3): 32 ~ 36