

基于极化不变量的飞机目标识别

肖顺平 王雪松[√] 庄钊文

(国防科技大学电子工程学院 ATR 国家实验室, 湖南, 长沙, 410073)

TN953

A

摘要 基于宽带毫米波极化雷达体制背景, 通过极化不变量之一的去极化系数, 研究了飞机目标的极化散射特性, 并提取了极化特征, 设计了飞机目标的分类或识别器结构, 它能对五种飞机目标进行有效的分类或识别。

关键词 毫米波, 极化散射矩阵, 极化特征, 目标识别。

雷达

引言

极化雷达目标识别是雷达目标识别中的一个重要研究方向, 随着极化理论体系的不断完善及极化测量技术的成熟, 它已成为热门研究课题。Brickel^[1]早在1965年研究目标极化散射特性时, 获得了一组与雷达天线极化基或与目标绕视线旋转无关的极化不变量。黄培康^[2]进一步指出了极化不变量与目标物理结构特性之间的简单对应关系。文献[3, 4]分别利用极化不变量组中的零极化和本征(特征)极化获得了简单目标和复杂目标的分类。极化不变量是极化雷达目标识别中具有潜在应用前景的目标特征信号^[3, 4]。

1 变基散射矩阵变换及极化不变量^[5]

极化散射矩阵变换是研究在雷达发射极化基改变情况下, 极化散射矩阵的变化问题。在变基时, 其极化散射矩阵变换形式一般是不同的。极化测量的两个基本方程是:

$$\bar{E}_R = [S]\bar{E}_i, \quad (1)$$

$$|V| = |\bar{h}^T[S]\bar{E}_i|; \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别代表电磁散射过程中的极化特性和所接收到的目标信号特性, 其理论基础是电磁场论和系统网络理论。

1.1 极化散射矩阵变换

在变基时需要一个物理不变量, 即要求在接收天线端所测得的电压式(2), 在变基时保持不变, 并要求式(1)中的散射矩阵保持与旧基下相同的物理极化状态。

当单基地测量时, 在互易条件成立的情况下, 则有无穷多个正交椭圆极化基 (\hat{X}, \hat{Y}) , 相应地也有无穷多个极化基变换。假设散射矩阵 $[S]$ 从一个正交极化基 (\hat{X}, \hat{Y}) 变换到另一个正交极化基 (\hat{X}', \hat{Y}') 过程中没有极化损失, 那么散射矩阵 $[S]$ 的变换特性在数学上既可以用极化椭圆的几何参量 ϵ 和 τ 来表示, 也可以用极化比参量 γ 和 φ 来表示, 其形式分别为:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\tau & -\sin\tau \\ \sin\tau & \cos\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\epsilon & -i\sin\epsilon \\ i\sin\epsilon & \cos\epsilon \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -e^{-i\varphi}\sin\gamma \\ e^{i\varphi}\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} = (1 + \rho\rho^*)^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\rho^* \\ \rho & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

式中 τ 、 ϵ 、 γ 、 φ 和 ρ 分别表示倾角、椭圆率角、极化关系角、相位差和线极化比。于是,在单基地情况下,借助变基时的变换矩阵式(3)或式(4),对向量 \bar{E}_R 、 \bar{E}_i 和 \bar{h} 进行逆变换可得到:

$$\bar{E}_R = [T] \bar{E}'_R, \quad \bar{E}_i = [T] \bar{E}'_i, \quad \bar{h} = [T] \bar{h}', \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),可得到:

$$V = V' \rightarrow \bar{h}^T [S] \bar{E}_i = ([T] \bar{h}')^T [S] ([T] \bar{E}'_i) = \bar{h}'^T [T]^T [S] [T] \bar{E}'_i, \dots$$

因此,新基下的散射矩阵为:

$$[S'_{\nu}] = [T]^T [S] [T]; \quad (6)$$

同理,将式(5)代入式(1),则有:

$$\bar{E}_R = [T] \bar{E}'_R [S] [T] \bar{E}'_i \rightarrow \bar{E}'_R = [T]^{-1} [S] [T] \bar{E}'_i,$$

因此,新基下的散射矩阵可写为:

$$[S'_{\rho}] = [T]^{-1} [S] [T]. \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可见,方程(1)、(2)在变基时的散射矩阵变换是不同的,而且 $[S'_{\nu}]$ 和 $[S'_{\rho}]$ 有如下关系:

$$[S'_{\nu}] = [T_0]^T [T_0] [S'_{\rho}], \quad (8)$$

式(8)中 $[T_0]$ 是一个从某个参考线性基变到另一个给定的一般基的变基矩阵。只有在正交条件下,即 $[T_0]^T = [T_0]^{-1}$ 时,才有 $[S'_{\nu}] = [S'_{\rho}]$,此时,由极化测量方程(1)、(2)即可得到变换式(6)或(7)。

1.2 极化不变量

对雷达观测者来说,雷达极化基的改变,或者目标绕视线旋转,都不增加新的信息。因此,人们企图消除目标三维姿态(横滚、俯仰、偏航)变化中的一维变化,寻找与目标横滚或与雷达极化基无关的一组极化不变量作为目标特征信号,用于目标的分类或识别。

设横滚旋转角 τ_0 ,则相应的旋转矩阵为:

$$[R(\tau_0)] = \begin{bmatrix} \cos\tau_0 & -\sin\tau_0 \\ \sin\tau_0 & \cos\tau_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

它相当于雷达发射的椭圆极化波的轴线旋转了 τ_0 角。如果用

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{XX} & S_{XY} \\ S_{YX} & S_{YY} \end{bmatrix} \quad (10)$$

表示单基地线基极化散射矩阵, $S_1 = S_{XX} + S_{YY}$ 和 $S_2 = S_{XX} - S_{YY}$ 分别表示散射矩阵的迹和反

迹,则经过横滚旋转之后的极化散射矩阵为:

$$[S'] = [R(\tau_0)]^T [T] [R(\tau_0)] \\ = \begin{bmatrix} S_{XX}\cos^2\tau_0 + S_{XY}\sin^2\tau_0 + S_{YY}\sin^2\tau_0 & S_{XY}\cos^2\tau_0 - \frac{1}{2}S_2\sin^2\tau_0 \\ S_{XY}\cos^2\tau_0 - \frac{1}{2}S_2\sin^2\tau_0 & S_{XX}\sin^2\tau_0 - S_{XY}\sin^2\tau_0 + S_{YY}\cos^2\tau_0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

且有:

$$S'_1 = S_1, S'_2 = S_2\cos 2\tau_0 + 2S_{XY}\sin 2\tau_0, S'_{XY} = S_{XY}\cos 2\tau_0 - \frac{1}{2}S_2\sin 2\tau_0. \quad (12)$$

极化不变量将涉及到格雷伍斯(Graves)功率散射矩阵的概念,其定义为:

$$[G] = [S]^+ [S], \quad (“+”表示共轭转置)$$

另外,推导极化不变量还用如下关系式:

$$\det[R(\tau_0)]^T = \det[R(\tau_0)] = 1, [R(\tau_0)]^* = [R(\tau_0)]; \quad (13)$$

由以上可得到:

$$\det[S'] = \det\{[R(\tau_0)]^T [S] [R(\tau_0)]\} = \det[R(\tau_0)]^T \det[S] \det[R(\tau_0)] = \det[S], \quad (14)$$

$$\text{Tr}[S'] = S_{XX}\cos^2\tau_0 + S_{XY}\sin^2\tau_0 + S_{YY}\sin^2\tau_0 + S_{XX}\sin^2\tau_0 - \\ S_{XY}\sin^2\tau_0 + S_{YY}\cos^2\tau_0 = S_{XX} + S_{YY} = \text{Tr}[S], \quad (15)$$

$$\det[G'] = \det\{[S]^+ [S]\} = \det\{([R(\tau_0)]^T [S] [R(\tau_0)])^+ ([R(\tau_0)]^T [S] [R(\tau_0)])\} \\ = \det\{[S]^+ [S]\} = \det[G], \quad (16)$$

$$\text{Tr}[G'] = (S_{XX}^*\cos^2\tau_0 + S_{XY}^*\sin^2\tau_0 + S_{YY}\sin^2\tau_0)(S_{XX}\cos^2\tau_0 + S_{XY}\sin^2\tau_0 + S_{YY}\sin^2\tau_0) + \\ (S^*\cos^2\tau_0 - \frac{1}{2}S_2^*\sin^2\tau_0)(S_{XY}\cos^2\tau_0 - \frac{1}{2}S_2\sin^2\tau_0) + \\ + (S_{XY}^*\sin^2\tau_0 - S_{XY}^*\sin^2\tau_0 + S_{YY}\cos^2\tau_0)(S_{XX}\sin^2\tau_0 - S_{XY}\sin^2\tau_0 + S_{YY}\cos^2\tau_0) \\ = |S_{XX}|^2 + |S_{XY}|^2 + |S_{YX}|^2 + |S_{YY}|^2 = \text{Tr}[G], \quad (17)$$

$$D = 1 - \frac{|\text{Tr}[S]|^2}{2\text{Tr}[G]} = \frac{\frac{1}{2}|S_2|^2 + 2|S_{XY}|^2}{|S_{XY}|^2 + 2|S_{XY}|^2 + |S_{YY}|^2}, \quad (18)$$

式(14)~(18)分别表示当目标姿态横滚或雷达极化基改变时,散射矩阵行列式值和迹、功率散射矩阵行列式值和迹以及去极化系数大小等均保持不变,它们是极化不变量.另外,还有本征(特征)极化和零极化两个不变量,其推导过程复杂,可参考文献[4].极化不变量含有粗糙的目标物理结构信息:粗细或“胖瘦”、目标的大小等.

2 目标极化特性的去极化系数描述及极化特征的提取

在特定观测频率下,雷达回波为目标各散射点散射信号的矢量合成.在光学区、宽频带观测条件下,目标上各散射点散射信号之间的相位差,因散射点间相对位置不同而随频率呈现不同的变化趋势,导致目标回波幅度和相位随频率产生较大起伏,这种由目标结构决定的

起伏特性可以充分反映在去极化系数上. 图 1 是 2 种目标(W, Y)在 2 个方位角(3°, 7°)上的去极化系数. 随频率的变化情况, 由图 1 可见, 同一种目标的去极化系数在不同方位上随观测频率的变化有较好的相似性, 而不同目标的去极化系数变化有较大差异. 因此, 用去极化系数描述不同目标的极化散射特性, 并进一步提取极化特征用于目标分类或识别具有潜在的可能性. 问题的关键在于能否提取到不敏感目标姿态的稳定的极化特征. 根据去极化系数变化情况, 一种直观的认识是, 可以采用相关运算或将去极化系数当作一种信号通过谱分析来提取特征. 但实验结果表明, 这种基于谱分析或相关运算的方法得到的特征仅对少数几种目标具有可分性, 而且这些特征是敏感于目标姿态变化的. 在这里, 我们根据目标去极化系数的物理涵义(即目标在给定频率上的去极化能力的一种度量), 提出一种波形局部特征提取的方法, 即将去极化系数大小变化区间[0, 1]划分成 M 个子区间:

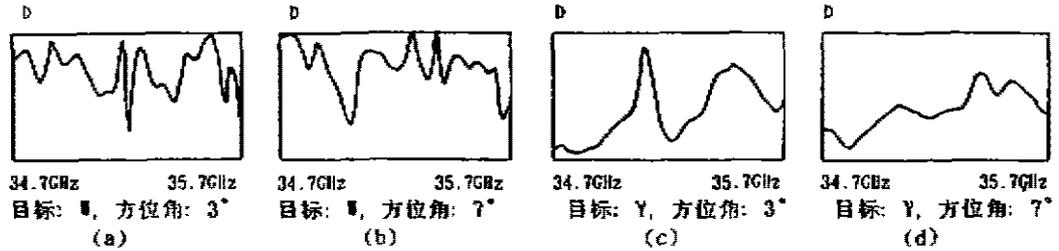


图 1 去极化系数随频率的变化

Fig. 1 Depolarization coefficient as a function of frequency

$$[C_j, C_j + \Delta C], (j = 0, 1, \dots, M-1);$$

其中, $C_j = j \cdot \Delta C, \Delta C = 1/M$. 在每个子区间定义如下两个统计参量:

$$d_j = \sum_{D=C_j}^{C_j+\Delta C} D, \quad r_j = \sum_{D=C_j}^{C_j+\Delta C} 1, \quad (j = 0, 1, \dots, M-1)$$

则一个去极化系数波形可用如下参数矩阵来表示:

$$[V]_{M \times 2} = \begin{bmatrix} d_0 & r_0 \\ d_1 & r_1 \\ \vdots & \vdots \\ d_{M-1} & r_{M-1} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

对于目标的极化特征选择(即选择 $[V]$ 中具有不敏感目标姿态, 且异类目标间有明显差异), 对这样两个不同特性的元素作为目标特征, 这一过程可以看成 $[V]$ 与一个加权矩阵(其元素只有 0 和 1)的乘积, 即 $[f] = [W][V]$, 其中 $[f]$ 表示特征矩阵, 其不为 0 的元素可作为目标特征.

3 目标识别的实验研究与结果

本文实验是在外场进行; 阶跃变频雷达系统工作频率范围为 34.7~35.7GHz, 阶跃变频间隔为 2MHz, 水平、垂直极化分时发射、同时接收; 五种飞机目标模型长宽约为 1.0~1.

8m, 姿态均为 0° 横滚角、 0° 俯仰角、方位角 (A) 范围为 $0^\circ \sim 28^\circ$, 方位角采样间隔为 1° . 图 2 是特征参量随目标观测方位角的变化情况. 参数矩阵式 (1) 中的元素 d_0, d_1, r_0, r_5 分别是去极化系数子区间 $[0, 1/11], [0, 4/11], [5/11, 6/11]$ 和 $[9/11, 10/11]$ 中的值. 由图 2, 适当地设置特征参数门限, 就可以设计出图 3 有关五种飞机目标的分级识别器结构. 而目标识别就是一个逐级细化分类或识别的过程. 由这一识别器结构可以获得各目标的识别率 (见表 1). 由于识别过程中的特征提取与树状分类单元仅涉及简单代数加、乘法及比较运算, 具有良好实时性. 实验中, 在 Compaq 386/25e 上进行仿真, 整个识别过程仅需 $0.01 \sim 0.1$ s 的时间.

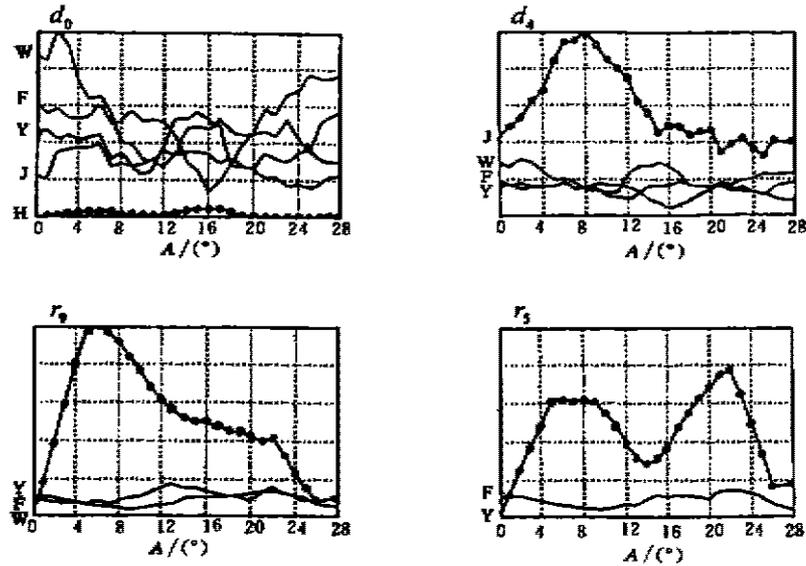


图 2 目标极化特征参数

Fig. 2 Polarization features of targets



图 3 目标识别器结构

Fig. 3 The structure of target recognition system

表 1 目标识别率

Table 1 Target recognition rate

目标姿态	横滚 0° , 俯仰 0° , 方位角 $0^\circ \sim 28^\circ$				
	H	J	W	F	Y
识别率 (%)	100	100	85.7	89.3	89.3

4 结语

本文结果表明,极化不变量用于描述目标的极化散射特性以及应用于极化雷达目标识别是可行的.寻找不敏感目标姿态的极化特征量是困难的,为此我们设计了简单、高效的识别器结构,并获得较好的目标识别效果.

参考文献

- 1 Brickel S H. *Proc. IEEE*, 1965, pp. 1070~1072
- 2 黄培康. *雷达目标特征信号*, 北京:宇航出版社, 1993, 126~132
- 3 Huynen J R. A new approach to radar cross-section measurement, *IRE International Conf.*, rec., Pt. 5, Vol. x, 1962
- 4 肖顺平, 郭桂蓉, 等. *国防科技大学学报*, 1995, (4): 43~50,
- 5 Kostinski A B, Boerner W M. *IEEE Trans.* 1986, AP-34(12): 12

AIRCRAFT TARGET RECOGNITION BASED ON POLARIZATION INVARIANT

Xiao Shunping Wang Xuesong Zhuang Zhaowen
(ATR Laboratory, Institute of Electronic Engineering, University of
National Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The polarization scattering properties of aircraft targets were investigated by using depolarization coefficient, one of the polarization invariants, based on wideband millimeter wave polarization radar. Furthermore, the polarization features of targets were extracted and the target recognizer which can classify or recognize effectively five kinds of aircraft targets was designed.

Key words millimeter waves, polarization scattering matrix, polarization feature, target recognition.