

## 基于时频分析的飞机目标识别\*

鲜 明 庄钊文 郭桂蓉 肖顺平 陈曾平

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室 长沙 410073)

**摘 要** 本文利用小波变换对五种飞机目标的雷达回波进行时频分析, 得到了回波信号的时频分布图。全面清楚地描述了目标的散射特性。文中通过提取时频分布图的矩特征量为目标特征量, 对五种飞机的目标作了识别实验, 取得了良好的识别效果。

**关键词** 小波变换, 时频分布, 矩特征, 特征向量, 目标识别

**分类号** 959.17

## Targets Recognition Based on Time-Frequency Analysis

Xian Ming Zhuang zhaowen Guo Guirong Xiao Shunping Chen Zengping  
(ATR Lab. NUDT, changsha, 410073)

**Abstract** The time-frequency distribution of radar echoes of airplanes has been analysed by the wavelet transform. With the time-frequency distribution, which clearly exposed the scattering characteristics of targets, this paper also applies the moments method for target recognition, and get satisfactory results.

**Key words** wavelet transform, time-frequency analysis, moments, target recognition

高分辨率雷达目标的后向散射回波(时域或频域)含有目标精细的物理结构特征信息。然而单一的时域或频域方法难以完整地刻划目标的雷达特性, 为此, 本文把上述两种方法结合起来, 利用目标的时间—频率联合分布来刻划目标的散射特性, 并以此为基础进行目标识别的实验。

信号的时间—频率联合分布描述了信号能量在时间—频率坐标系中的分配, 它同时在时域和频域上表征信号, 从而能提供更多的反映目标物理结构特征的信息。时频分析是信号处理的一个基本手段, 是研究时变信号的重要途径。信号时频分析的方法比较多, 常用的有短时傅立叶变换(STFT)、Wigner-Ville 变换和小波变换。它们各具特点。其

\* 1996 年 10 月 14 日收稿

中短时傅立叶变换 (STFT) 在时频分析中受时域和频域固定分辨力的限制; Wigner-Ville 变换虽然具有时频平面上良好的分辨精度, 却引入了时间频率的“交叉项”, 需要专门消除“交叉项”的办法; Morlet 等在 1984 年提出的小波理论为信号时频分析提供了新的有效工具。小波分析已经在语音、图像和通信等领域得到成功的应用。在作时频分析时, 小波变换的优点是具有可变的时间频率域分辨能力, 既不象 STFT 那样受其在时域和频域的固定分辨力限制, 也不象 Wigner-Ville 变换那样会引入“交叉项”。由于多尺度窗的引入, 小波变换在高频时使用较窄的时域窗, 低频时使用较宽的时域窗, 故为信号分析提供了可变的时间多尺度和频域多分辨手段, 成为信号时频分析一个更好的工具。

小波变换在时频域上有良好的分辨力, 能把目标在时域上的局部散射特性或频域上的局部散射性质以及其它各种复杂的多散射机制, 清楚地表现在时间—频率分布平面上。因而, 此平面图为目标有效特征量的提取及可靠识别提供了更充分的依据。

## 1 小波变换用于雷达回波的时频分析

记信号为  $f(t)$ , 其频率响应记作  $F(w)$ 。利用小波变换, 信号的时频分布定义为

$$W_f(\tau, \Omega) = F(w) \tau^{1/2} H[\tau(w - \Omega)] dw \quad (1)$$

上式中  $H(w)$  一般在小波理论中称为母小波。(1) 式可解释为由平移和伸缩的小波族对  $F(w)$  作带通滤波。式中  $\tau$  称为多尺度因子,  $\Omega$  代表频率。对于较小的  $\tau$ ,  $H[\tau(w - \Omega)]$  是较宽的频域窗; 对于较大的  $\tau$ ,  $H[\tau(w - \Omega)]$  是较窄的频域窗。若固定  $\tau$ , 平移  $\Omega$ , 则  $F(w)$  在  $1/\tau$  尺度下的特征就能被局部化并提取出来; 若固定  $\Omega$ , 改变  $\tau$ , 则  $F(w)$  在频率  $\Omega$  处的多尺度性质就表现了出来。这便是小波分析的多分辨特征。(1) 式写成时域形式为

$$W_f(\tau, \Omega) = f(t) \tau^{1/2} h(-t/\tau) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

上式中  $h(t)$  是  $H(w)$  的傅立叶变换。注意到(2) 式其实就是  $[f(t) \tau^{1/2} h(-t/\tau)]$  的傅立叶变换形式, 表明在实际的数字计算时, 可以采用 FFT。须指出的是, 上述  $h(t)$  应满足“可容许性条件”<sup>[5]</sup>, 即  $h(t) \Big|_{t=0} = 0$ 。另外要注意的是, 这里所定义的小波变换与通常所定义的小波变换不同, (1) 式 (或 (2)) 所定义的小波变换是进行信号时频分析一种更为有利的形式。

实验中, 我们利用上面所介绍的小波变换对实际雷达信号回波进行了时频分析。所用的数据是由带宽 1GHz 左右的 8mm 阶梯变频雷达, 在微波暗室对 F117 飞机、运八飞机等 5 种目标的缩比模型测量得到的。实验中对目标进行了在多姿态角的全极化测量, 得到了每类飞机目标从 0 到 30 度方位角范围内的测量样本值。根据这些样本, 由上述小波变换进行时频分析处理, 得到的结果部分如下图 1、图 2、图 3、图 4 和图 5 所示。图中的灰度值由  $|W_f(\tau, \Omega)|^2$  表示。

从信号的时频分析图可以得出结论: 不同的飞机目标, 由于具有不同的散射特性, 显示在时间频率分布平面上就具有不同的  $|W_f(\tau, \Omega)|^2$  分布。这是由不同目标物理结构特征的散射性质不同造成的。但是同一目标在不同方位角的时频分布却有“相似”的地方, 即目标的时频分布对方位角变化不敏感。这是由目标本身固有的物理结构性性质决定的。目标时频分布的这个特点对目标识别特别有用。

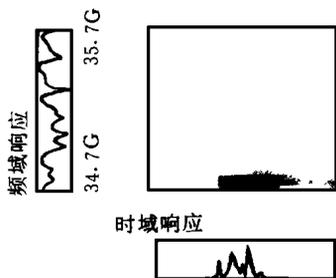


图 1

左图为 H 飞机在 HH 极化下某角度的频率响应分布图, 下图为其时域响应图, 中间部分的图是波变换 (小波为墨西哥小帽) 得到的时间—频率分布图。

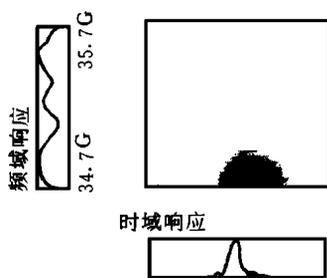


图 2

左图为 F 飞机在 HH 极化下某角度的频率响应分布图, 下图为其时域响应图, 中间部分的图是由小波变换 (小波为墨西哥小帽) 得到的时间—频率分布图。

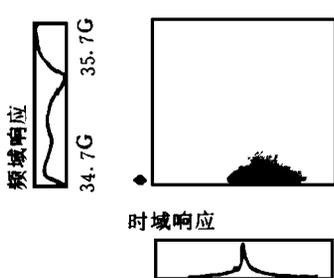


图 3

左图为 Y 飞机在 HH 极化下某角度的频率响应分布图, 下图为其时域响应图, 中间部分的图是由小波变换 (小波为墨西哥小帽) 得到的时间—频率分布图。

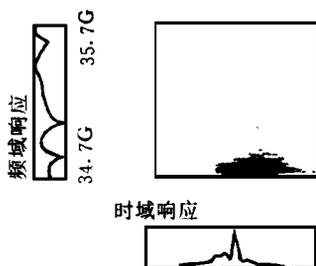


图 4

左图为 J 飞机在 HH 极化下某角度的频率响应分布图, 下图为其时域响应图, 中间部分的图是由小波变换 (小波为墨西哥小帽) 得到的时间—频率分布图。

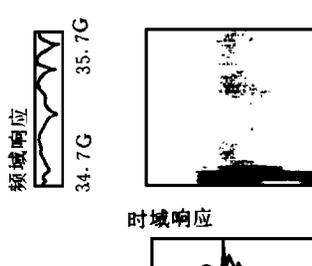


图 5

左图为 W 飞机在 HH 极化下某角度的频率响应分布图, 下图为其时域响应图, 中间部分的图是由小波变换 (小波为墨西哥小帽) 得到的时间—频率分布图。

## 2 基于散射回波时频分布的雷达目标特征提取

目标识别在本质上是一个映射过程。它将模式空间映射到类别空间, 其中特征量的提取是一个关键技术, 要求提取的特征量具有相对的稳定性, 特征之间尽量不相关, 特征空间的维数不宜太大等等。有效特征量的提取一直是研究的热点。在雷达目标识别领域, 如何提取特征量是理论与实际研究中的重要课题。

虽然目标的一维距离像反映了目标本身部分的物理结构特征信息, 可是对观测方位角的变化极为敏感, 给有效目标识别造成困难。如果在时间—频率分布平面上分析目标散射回波, 特征量的提取就不象一维情形那样困难。时频平面上, 目标时域中的局部散射行为 (如散射中心) 或目标频域中的局部散射行为 (包括谐振频率点等信息) 以及其它各种散射机制的作用都清楚地暴露出来。因为不同目标的时频分布差别较大, 同一目标的时频分布较为“相似”, 因而可以抽取可靠的目标识别特征量。本文在用目标散射回波的时频分布进行识别时, 采用矩特征<sup>[3]</sup>作为目标识别分类的特征向量。

一般地, 二维函数  $f(x, y)$  的  $(p+q)$  阶几何矩定义为:

$$\tilde{m}_{pq} = \int \int x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (3)$$

这种矩依赖于待识别图像模式在坐标系中的位置, 不具备平移不变性, 不宜用作模式识别的特征向量。把几何矩平移到图像的重心而得到的中心矩却是平移不变的, 其  $(p+q)$  阶中心矩定义为:

$$\tilde{\mu}_{pq} = \int \int (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy \quad (4)$$

其中  $\bar{x} = \tilde{m}_{10}/\tilde{m}_{00}$ ,  $\bar{y} = \tilde{m}_{01}/\tilde{m}_{00}$ 。相应地对于  $M \times N$  维的离散二维数字图像  $F(m, n)$ , 其几何矩和中心分别定义为:

$$m_{pq} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} i^p j^q F(i, j) \quad (5)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q F(i, j) \quad (6)$$

其中  $\bar{i} = m_{10}/m_{00}$ ,  $\bar{j} = m_{01}/m_{00}$ 。对中心矩归一化得到

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{[(p+q)/2]+1}} \quad (7)$$

于是可定义如下的不变矩:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \quad , \quad \Phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \Phi_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad , \quad \Phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \\ \Phi_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ \Phi_6 &= (\eta_{30} - \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} - \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \\ \Phi_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{02})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \end{aligned} \quad (8)$$

以上定义的不变矩是关于平移、旋转和拉伸尺度的不变量, 可以用作目标识别的特征量。实验中将它们用于飞机目标的识别, 取得了良好的分类和识别效果。

### 3 分类算法与识别实验结果

本文对飞机目标识别是基于其回波信号时频分布矩特征的识别, 选用式 (8) 所定义的不变矩作为目标特征向量。分类的依据是 M—距离。分类过程如下: (1) 先计算每类飞机目标在各个姿态角下相应的不变矩, 取其统计平均值作为模型特征库的初始特征向量; (2) 计算库中每一特征向量的特征元方差, 将该方差的倒数作为对应特征元的加权因子, 乘上此特征元, 形成模型特征库中真正用于识别的特征向量; (3) 未知的特征向量乘上同样的加权因子后, 与模型特征库中的特征向量进行匹配。这采取计算两个特征向量差的范数, 取其中最小值所对应的目标类型作为未知目标的识别类型。

表 1 给出了模型特征库中各类目标的特征向量, 表 2 给出识别结果。可见, 利用信号时频分布的矩特征进行目标识别是卓有成效的一个办法。本文提供的方法之所以识别率较高是因为: 通过小波变换, 目标的散射特性得到了全面的刻画, 目标在时域上的局部散射特性或频域上的局部散射性质以及其它各种复杂的多散射信息, 都清楚地表现在

时间-频率分布的二维平面上；而不变矩正好包含了目标图像全部信息，且关于平移、旋转和拉伸尺度不变，作为目标的识别特征量，必然为目标的可靠识别提供了充分的依据。

表 1 模型特征库中各类目标的特征向量

目标类型	特 征 量						
	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$	$\phi_5$	$\phi_6$	$\phi_7$
H	438.2267	37.1257	15.0284	18.5871	- 9.2589	13.5046	9.0408
F	402.0860	43.3594	21.2791	8.6022	- 5.8889	7.7525	6.0032
Y	532.3622	25.2280	16.6157	8.4382	- 4.8586	11.6839	4.8373
J	292.1560	30.4792	11.8867	6.6334	- 3.7681	3.9459	3.4885
W	420.2595	13.6529	23.8033	17.2430	- 10.8612	14.4768	9.2843

表 2 识别结果

目标姿态	俯仰角: $0^\circ$ 横滚角: $0^\circ$ 方位角: $0 \sim 30^\circ$				
目标类型	H	F	J	Y	W
识别率	95%	87.5%	93.5%	93.5%	92.7%

## 4 结 论

本文利用小波理论对 5 种飞机目标的雷达回波进行时频分析处理，得到了回波信号的时频分布图。在时频分布图上，目标在时域的局部散射行为（如散射中心）或目标频域的局部散射行为（包括谐振频率点等信息）以及其它各种散射机制的作用都得到有效的刻画；不同目标的时频分布差别较大，同一目标的时频分布较为“相似”；其中潜在的目标识别信息，通过矩特征提取，并由 5 种飞机目标识别实验验证，表明所取得的识别效果良好，说明了本文的识别方法是有效可行的。由于本文利用小波分析进行目标识别时，用到的是目标在时频域上的二维信息，因此从理论上来说，它比单一的时域方法，如提取目标一维距离像，作为目标的分类特征，也比频域方法，如利用 Prony 模型等，更容易对目标进行分类，并具有较强的可靠性。本文提供的方法算法清楚，易于实现，在工程应用上便于操作，具有较大的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 郭桂蓉, 庄钊文, 陈曾平. 电磁特征抽取与目标识别. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996
- 2 Moghaddar A, Walton E K. Time-frequency analysis of scattering from waveguide cavity, IEEE T-AP, 1993, 41: 677 ~ 680
- 3 Cho Huak Teh. On Image Analysis by the methods of Moments, IEEE T-PAMI, 1988, 10 (4)
- 4 Rioul O, Dahamel P. Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transform. IEEE T-IT, 1992, 38 (2)
- 5 Combes J M, Grossman A, Tchamitchiab, Ph. Wavelet, Time-Frequency Methods and Phase Space, Berlin: Springer-Verlag, 1989

(责任编辑 潘 生)