

文章编号 1001-2486(2001)05-0093-05

# 基于高分辨距离象的雷达目标识别特征分析\*

苗雨 姜文利 周一宇

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 高分辨距离象是高频区雷达目标识别的最基本的依据。文中对高分辨距离象用于目标识别的两个方面的特征进行了分析,提出了相关角度的概念。该概念反映了距离象与目标整体之间的相似性,是基于距离象目标识别的又一个重要特征,分析了距离象相位信息的重要性,指出了利用距离象相位信息进行目标识别的方法和途径。

**关键词** 雷达;目标识别;距离象;频谱;相关

**中图分类号** TN957.52 **文献标识码** A

## A Study of Target Recognition Based on Radar Target High Resolution Range Profile

MIAO Yu, JIANG Wen-li, ZHOU Yi-yu

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** In high frequency region, the radar range profiles are chosen as feature vectors for target recognition. The profile is seriously affected by the bearing. In order to make the radar target recognition more effective, the definitions of correlation length and correlation angle are given. In frequency domain, the most important feature of the shape of a profile is mainly contained in its spectral phase, but not in its spectral magnitude. So the spectral phase is important feature information for RTR (Radar Target Recognition) in high frequency region, and should be utilized effectively.

**Key words** radar; target recognition; range profiles; spectrum; correlation

在低频区,目标的多频测量数据可以作为识别特征,且测量频点数目可以很少<sup>[1]</sup>。对于特定的目标类型,雷达工作频率范围可以优化<sup>[2]</sup>。而在高频区,由于目标散射特性、散射机理的不同,对于复杂目标,仅依据有限几个频率点的测量是难以识别的,必须在较大的带宽内获取较多的采样数据,用以得到目标的高分辨距离象。宽带高分辨距离象是高频区雷达目标识别的最基本的依据,它反映了三维目标的反射特性在一维距离域上的投影。距离象的结构随目标姿态的变化而变化,因此基于距离象的特征分析是十分必要的。

### 1 相关角度

不同的目标在不同的姿态下,其归一化距离象可能极为相似。在姿态未知的情况下,由它所造成的误判是任何分类方法所不能避免的。常规的判决依据为匹配度,但匹配度所能提供的仅是距离象两两之间的相似程度。为反映距离象与目标整体之间的相似性,我们提出了相关角度的概念。本文所用目标距离象是用步进频率方法得到的缩比飞机模型的距离象。

设有两种不同的飞机目标模型 A、B。它们各自对应的距离象模板数据库分别为 X 和 Y,

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_i \quad \dots \quad x_N]$$

$$Y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_i \quad \dots \quad y_N]$$

其中  $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, N)$  为归一化列矢量。X、Y 中相邻距离象之间的姿态间隔相等,均为  $\Delta\theta$ 。

假定一未知距离象  $x$ , 不考虑配准过程,  $x$  与  $x_i (i=1, 2, \dots, N)$  之间的相关系数(匹配度)为  $\rho_i =$

\* 收稿日期 2001-06-20  
基金项目 国防预研基金资助项目  
作者简介 苗雨(1977-)男,硕士生。

$x^T x_i (i=1, 2, \dots, N)$  对于目标  $A$  有

$$\text{Cor} = x^T X = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad \dots \quad \rho_i \quad \dots \quad \rho_N] \quad (1)$$

目标相邻距离象之间一般具有比较大的相关性。若目标距离象之间的姿态间隔  $\Delta\theta$  比较小,则相邻姿态的距离象之间的匹配度也随之提高,即距离象之间相似程度提高<sup>[5]</sup>。

设  $\rho_i$  为  $\text{Cor}$  中最大的元素,或  $\rho_i$  大于给定阈值  $T$ ,在  $x_i$  附近的某个姿态范围内,假定有  $M$  个相邻距离象与  $x$  的相关系数大于  $T$ ,则分别称  $\theta = M\Delta\theta$ 、 $M$  为相关角度和相关长度。当  $X$  包含的姿态范围很大时, $\text{Cor}$  中大于阈值  $T$  的区域可能不止一个,此时,称其中最大的  $\theta$  为相关角度。

图 1(a)为来自目标  $A$  的一个距离象  $x$ ,图 1(b)(c)分别给出了  $x$  与  $X$ 、 $Y$  之间的相关曲线。两曲线对应的目标  $A$ 、 $B$  的方位角范围均为  $20^\circ$  到  $150^\circ$ 。距离象  $x$  与目标  $A$ 、 $B$  的相关角度如图所示。

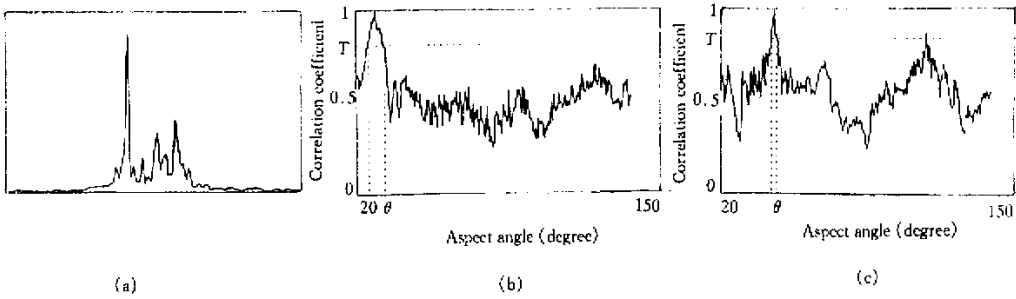


图 1 (a)距离象  $x$  (b) $x$  与  $X$  之间的相关曲线 (c) $x$  与  $Y$  之间的相关曲线

Fig.1 (a)Radar range profile(b)Correlation curve of  $x$  and  $X$ (c)Correlation curve of  $x$  and  $Y$

相关角度(与阈值  $T$  有关)描述了未知距离象与目标一定姿态角范围内的多个距离象的相关特性,是距离象与目标整体之间的相似性的一种度量方法。相关角度是基于距离象目标识别的又一个重要特征,可与匹配度等联合用于决策判别。在图 1 中,仅用匹配度最大的方法难以判别  $x$  属于目标  $A$  还是属于目标  $B$ 。而用相关角度最大的方法可以准确地判定  $x$  属于目标  $A$ 。

相关角度最大的方法是基于单个距离象的目标识别方案,它充分利用了未知距离象与目标在全角度范围内的相关信息。在此基础上,还可以利用多距离象联合识别的方法进一步提高识别率,即获取未知目标不同姿态下的多个距离象,分别对每个距离象进行判决,然后根据多数判决确定未知目标的归属。

## 2 距离象谱特征分析

距离象可以看作是一维波形。在利用距离象进行目标识别时,首先要解决的问题是距离配准,否则即便是相同的距离象,由于距离失配,其相关系数也会很小。通常,距离象配准的方法是使距离象之间的线性位移相关最大。这种方法给识别过程带来的计算量是巨大的。另外,在噪声环境下,也不可能得到很好的配准<sup>[6]</sup>。由于信号的 Fourier 变换的幅度具有位移不变性,因此,为解决配准问题,现有的识别方法均为先对距离象进行 Fourier 变换,然后取其幅度矢量作为识别特征<sup>[7][8]</sup>,完全忽略了其相位信息。

距离象反映了目标主要散射中心的散射强度和相对距离分布。当目标姿态角变化不太大时,各散射中心的回波幅度可能会有比较大的起伏,但是,回波位置一般变化不大。因此,文献[7]指出,实际的高分辨距离象识别将是基于目标的主要散射中心之间的相对距离分布的,回波幅度信息作为识别特征来讲是第二位的。目标的主要散射中心之间的相对距离分布主要反映在距离象 Fourier 变换的相位之中,因此不考虑相位信息的识别方法是不恰当的。

Oppenheim 等对二维图像的 Fourier 变换的幅度与相位特性进行了较为全面的研究<sup>[9]</sup>,认为幅度和相位在图像表示与分析中的作用是不同的。图像的绝大多数信息可以从其谱相位以及与之相似的图像的平均谱幅度中得到恢复。他们的工作成为只用图像的相位信息求图像间相关的基础。近年来,大

量的关于光学模式识别,如字符识别等的研究工作都集中在 Phase-only 滤波器方面,将图像的谱幅度弃置不用<sup>[10][11][12][13]</sup>。

我们用类似的方法对距离象进行了研究,发现距离象的形状信息主要包含在其 Fourier 变换的相位中,而幅度中所含的有关距离象形状的信息很少。这与文献[9]的结论是一致的。因此,在识别过程中必须考虑相位信息的利用。相对而言,幅度信息的重要性要小的多。

图 2 中,(a)(b)所示为两个不同的距离象 a 和 b。分别对它们作 Fourier 变换,并进行以下操作:

(1)将距离象 a、b 的 Fourier 变换的相位均变为 0,幅度保持不变,然后进行 IFT 并取其幅度。所得距离象如图 2(c)(d)所示,称为 Magnitude-only 距离象;

(2)将距离象 a、b 的 Fourier 变换的幅度均变为 1,相位保持不变,然后进行 IFT 并取其幅度。所得距离象如图 2(e)(f)所示,称为 Phase-only 距离象;

(3)用距离象 a 的 Fourier 变换的相位和距离象 b 的幅度合成一距离象,其时域形状如图 2(g)所示;

(4)用距离象 b 的 Fourier 变换的相位和距离象 a 的幅度合成一距离象,其时域形状如图 2(h)所示。

很明显,将图 2(c)~(f)与原始距离象相比较,可以看出,距离象的形状信息主要包含在其 Fourier 变换的相位中,幅度中所含形状信息很少。

将图 2(g)(h)与图 2(a)(b)相比较,可以看出,合成距离象的形状完全取决于其相位信息。

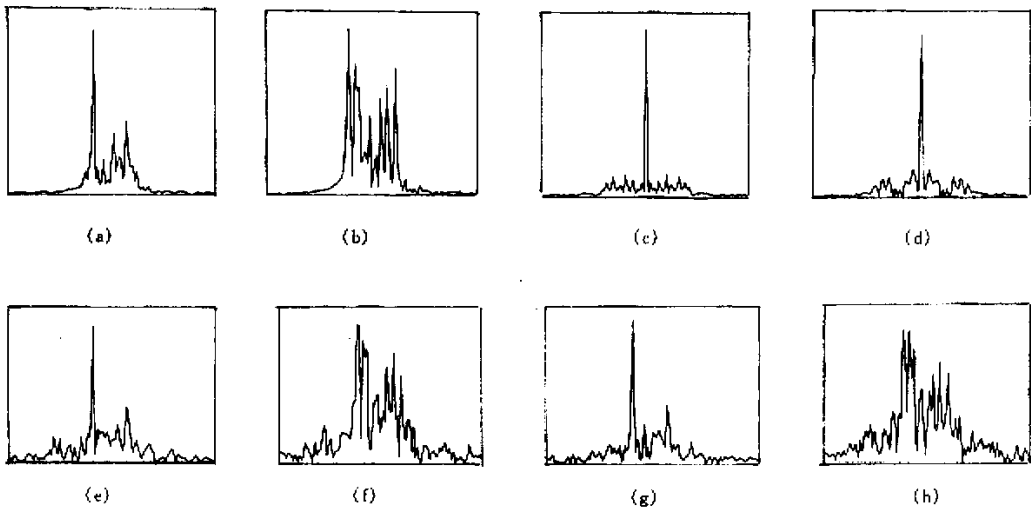


图 2 (a)(b)原始距离象 a 和 b; (c)(d) Magnitude-only 距离象  
(e)(f) Phase-only 距离象  
(g) 由距离象 a 的谱相位和距离象 b 的谱幅度合成的距离象  
(h) 由距离象 b 的谱相位和距离象 a 的谱幅度合成的距离象

Fig. 2 (a)(b)Original profile  $x_1$  and  $x_2$  (c)(d) Magnitude-only profiles of  $x_1$  and  $x_2$  (e).

(f) Phase-only profiles of  $x_1$  and  $x_2$  (g) Profile synthesized from spectral phase of  $x_1$  and spectral magnitude of  $x_2$ ;

(h) Profile synthesized from spectral phase of  $x_2$  and spectral magnitude of  $x_1$

我们的研究目的不是通过信号的部分信息重构信号,而是寻找有效的识别特征。基于距离象目标识别的基本依据是距离象之间的相似性。不同距离象 Fourier 变换的幅度信息之间的相关以及相位信息之间的相关在多大程度上反映了原始距离象之间的相似性?下面要研究的一个问题。

图 3 给出了 9 个不同的原始距离象。距离象  $x$  如图 1(a)所示。 $x$  与图 3 中的 9 个距离象的归一

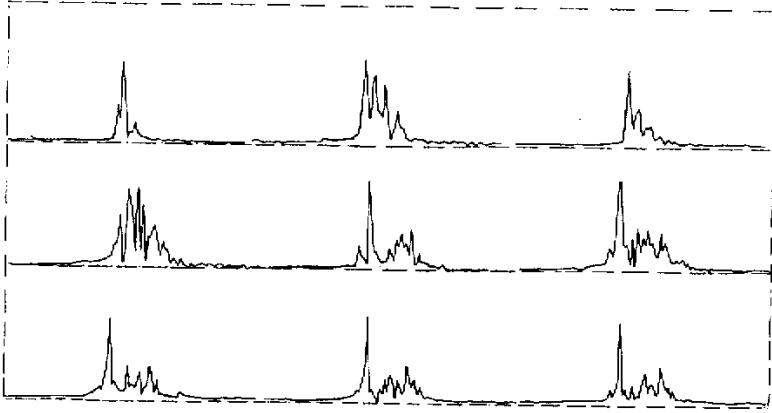


图3 目标模型的原始距离象

Fig.3 Profiles from target A and B

化相关系数  $\rho_i (i=1, 2, \dots, 9)$  的变化范围为 0.25~1。

图4中有三条相关曲线,横坐标表示相关系数  $\rho_i$ 。 $C$ 表示  $x$  与图3中各距离象之间的原始相关关系; $C_m$ 表示  $x$  的谱幅度与图3中各距离象的谱幅度的相关系数随  $\rho_i (i=1, 2, \dots, 9)$  的变化; $C_p$ 表示  $x$  的谱相位与图3中各距离象的谱相位的相关系数随  $\rho_i (i=1, 2, \dots, 9)$  的变化。

可以看出,距离象谱幅度之间的相关关系与原始距离象之间的相关关系相去甚远。在形状上与  $x$  差别很大、相关系数很小的距离象,它们与  $x$  的谱幅度之间的相关系数仍在 0.9 以上。因此,若仅以谱幅度作为特征矢量,则任意距离象之间的距离均很小,从而使得模式可分性变差,分类更加困难。

图5与图4类似,其中  $C_m$ -only 表示  $x$  的 Magnitude-only 距离象与图3中各距离象对应的 Magnitude-only 距离象之间的相关系数随  $\rho_i (i=1, 2, \dots, 9)$  的变化; $C_p$ -only 表示  $x$  的 Phase-only 距离象与图3中各距离象对应的 Phase-only 距离象之间的相关系数随  $\rho_i (i=1, 2, \dots, 9)$  的变化。可见,当  $\rho_i$  大于 0.8 时,Phase-only 距离象很好地反映了原始距离象之间的相似关系;反之,其相关系数下降很快,这一特性会使相关峰更突出,从而有利于识别。Magnitude-only 距离象之间的相关与距离象的谱幅度之间的相关基本一样。

通过上面的分析我们认为,在高频区雷达目标识别中,高分辨距离象的谱相位信息的开发利用至关重要,而谱幅度信息的作用不大。

Fourier 变换的相位不具有位移不变性,因此可以考虑高阶谱的应用。高阶谱即高阶累积或高阶相关的多维 Fourier 变换。与功率谱相比,高阶谱如双谱有以下三个方面的显著特点:

- (1) 由于高斯过程的高阶谱为零,因此高阶谱本身具有很好的抑制高斯噪声的能力;
- (2) 高阶谱能够同时提供信号幅度和相位信息,而且其幅度和相位均具有位移不变性;
- (3) 高阶谱能够检测信号相位耦合。

目前所见将高阶谱用于雷达目标识别的文献基本上只有 Walton 和 Jouny 的几篇论文<sup>[14][15][16][17]</sup>,他们的工作主要是用双谱去分析高分辨雷达回波中的多次反射成分,即利用了上述高阶谱的第三个特点。而在识别过程中他们所使用的特征是时域(距离域)信号的高阶相关,同样存在配准问题,没有考虑利用高阶谱的位移不变性去挖掘距离象的相位信息。因此,如何用高阶谱构造既具有位移不变性又能充分反映距离象相位信息的目标识别特征,是高频区雷达目标识别中一个值得进一步研究的课题。

### 3 结束语

相关角度是距离象与目标整体之间的相似性的一种度量,可用相关角度最大的方法进行目标识别,它充分利用了未知距离象与目标在全角度范围内的相关信息。为解决距离象相关过程中的配准问

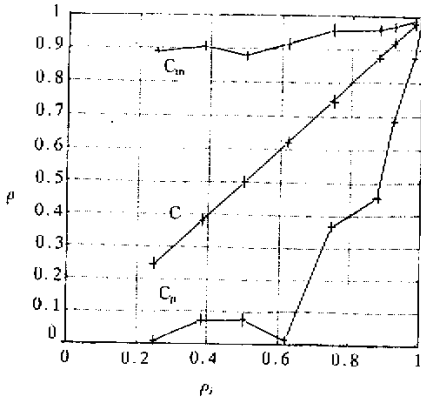


图4 距离象谱幅度之间、谱相位之间的相关特性

Fig.4 Comparison of correlation coefficients for original entire profiles, only the magnitude and only the phase of the original profiles.

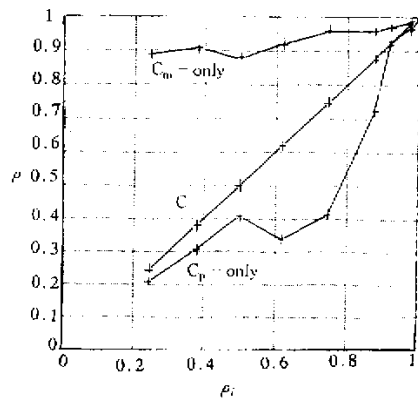


图5 Magnitude-only 距离象之间、Phase-only 距离象之间的相关特性

Fig.5 Comparison of correlation coefficients for the Magnitude-only profiles, only the magnitude and the Phase-only profiles.

题,需寻找具有位移不变性的量。距离象的幅度谱具有位移不变性,但是,上述研究结果表明,距离象的形状信息主要包含在其 Fourier 变换的相位中,而幅度中所含的有关距离象形状的信息很少。因此,必须着力研究既具有位移不变性又能充分反映距离象相位信息的目标识别特征。

### 参考文献:

- [1] Ksienski A A. Low-frequency approach to target identification [A]. Proc. IEEE, Dec. 1975: 1651-1660.
- [2] Lin H and Ksienski A A. Optimum frequencies for aircraft classification [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 1981, 11(5): 656-665.
- [3] Li H J, Yang S H. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects [J]. IEEE Trans. AP, 1993, 41(3): 261-268.
- [4] Li H J, Wang Y D and Wang L H. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets [J]. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, 1996, 44(4) 444-452.
- [5] Zyweck A and Bogner R E. Coherent averaging of range profiles [J]. IEEE International Radar Conference, 1995: 456-461.
- [6] Atkins R G, Shin R T and Kong J A. A neural network method for high range resolution target classification [J]. Progress in Electromagnetic Research, Editor: J. A. Kong, Elsevier, 1991 255-293.
- [7] Zyweck A and Bogner R E. Radar target classification of commercial aircraft [J]. IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems, April 1996, 32(2) 598-606.
- [8] 王卫东. 信号参数估计、人工神经网络及其在雷达目标识别中的应用研究 [D]. 北京理工大学, 1994. 6.
- [9] Oppenheim A V and Lim J S. The Importance of Phase in Signals [A]. Proc. IEEE [J], Vol. 69, No. 5, May 1981, 529-541.
- [10] Horner J L and Gianino P D. Phase-only matched filtering [J]. Applied Optics, 15 March, 1984, 23(6) 812-816.
- [11] Macukow K C and Braranska E. Discrimination of characters using phase information only [J]. J. Optics (Paris), 1990, 21(6): 261-266.
- [12] Yaroslavsky L P. Is the phase-only filter and its modifications optimal in terms of the discrimination capability in pattern recognition [J]. Appl. Opt. 31(11), 10 April 1992. 1677-1679.
- [13] Chen Q S, Defrise M, and Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition [J]. IEEE Trans. PAMI, 16(12), Dec. 1994, 1156-1168.
- [14] Walton E K and Jouny I. Bispectrum of radar signatures and application to target recognition [J]. Radio Science, 25(2), March-April, 1990, 101-113.
- [15] Jouny I. Description of radar targets using the bispectrum [A]. IEE Proc. -Radar [C]. Sonar Navig., 141(3), June, 1994, 159-163.
- [16] Jouny I, Moses R L and Garber F D. Classification of radar signals using the bispectrum [A]. Proc. ICASP [C], 1991, 3429-3432.
- [17] Jouny I. Radar target identification using the bispectrum: A comparative study [J]. IEEE Trans. AES, 31(1), Jan., 1995, 69-77.



