

基于 AR 模型参数双谱估计的雷达目标识别¹

姬红兵 李洁 谢维信 贺伟*

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

* (深圳机场通讯导航总站 深圳 518128)

摘要 本文利用双谱分析方法, 提出用非高斯 AR 模型对雷达目标回波信号进行参数化双谱估计, 通过对实测飞机目标回波数据的分析, 合理地选择目标特征构成特征矢量, 取得了较好的识别结果.

关键词 高阶谱, 雷达目标识别, AR 模型参数

中图分类号 TN950, TP391.4

1 引言

随着电子技术的不断发展以及现代战争需求的不断提高, 目前, 要求雷达系统不仅要能发现和跟踪目标, 同时也应对感兴趣目标进行识别分类. 目标识别就是指从目标的雷达回波中提取目标的有关信息和稳定的特征, 并判明目标属性. 这些信息通常是通过雷达目标回波的幅度和相位信号的加工处理获得的.

雷达目标回波实际上是一随机过程, 谱估计是一种有效的分析工具. 传统功率谱估计实质上是基于二阶统计量(自相关函数)的分析, 它只能完整描述一高斯随机过程. 同时, 功率谱抑制了信号的相位信息, 并且仅能描述过程的线性机理^[1]. 然而, 实际中雷达目标回波信号往往不满足这些条件, 如飞机目标回波中由喷气发动机引起的周期调制效应^[2]就是典型的非高斯信号. 此外, 实际雷达目标所处环境复杂, 目标回波中不可避免地伴有噪声和杂波, 功率谱既不能充分揭示隐含于目标回波中的高阶统计信息, 又难以消除噪声和杂波的影响, 不利于目标特征分析. 本文试图利用双谱技术分析雷达目标回波, 提取可供目标识别的双谱域特征, 实现目标识别分类.

2 AR 模型参数化双谱分析

2.1 累积量和累积量谱 设 $\{x(n)\}$ 为一零均值的 k 阶平稳随机过程, 则该过程的 k 阶累积量定义为^[1]

$$c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}\{x(n), x(n+\tau_1), \dots, x(n+\tau_{k-1})\}. \quad (1)$$

若 $c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})$ 满足绝对可和, 即

$$\sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} |c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})| < \infty, \quad (2)$$

则 k 阶累积量谱定义为 k 阶累积量的 $k-1$ 维 Fourier 变换:

$$S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) \exp \left[-j \sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i \right]. \quad (3)$$

实际中, 最常用的是三阶累积量和三阶谱(也称双谱):

¹ 1998-03-24 收到, 1998-12-02 定稿
“九五”国防预研资助课题

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = \text{cum}\{x(n), x(n + \tau_1), x(n + \tau_2)\}, \quad (4)$$

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)}. \quad (5)$$

2.2 AR 模型参数化双谱分析 双谱估计同传统功率谱估计一样, 可分为非参数化和参数化估计方法。基于下列原因我们选取 AR 模型参数化双谱估计: (1) 由于实际雷达目标回波数据较短, 而基于模型的参数化方法具有估计方差小、分辨率高的优点, (2) 参数化方法产生少量描述目标特征参数, 可直接作为目标特征, (3) 对于短波长雷达, 雷达目标常可以由少量镜面散射中心很好地近似, 其回波数据可以用 AR 模型精确建模^[3], (4) 由信号理论, 任何有限方差的 ARMA 或 MA 平稳过程都可以用可能是无限阶的 AR 模型来表达, 因此, 如果选取了一个与信号不匹配的模型, 利用高的阶数仍然可以得到较好的逼近。

设目标回波序列 $\{x(n)\}$ 满足三阶平稳, 用 p 阶 AR(p) 模型描述

$$x(n) + \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) = w(n), \quad (6)$$

式中 $w(n)$ 为零均值、三阶平稳、独立同分布 (i.i.d) 非高斯白噪声, 具有有限的非零累积量 γ_{kw} , $\{x(n)\}$ 的三阶累积量序列 $c_{3x}(\tau, p) = E\{x(n)x(n+\tau)x(n+p)\}$ 满足下列三阶递归关系^[4]

$$c_{3x}(-k, -l) + \sum_{i=1}^p a_i c_{3x}(i-k, i-l) = \gamma_{3w} \delta(k, l), \quad (k, l) \geq 0, \quad (7)$$

式中 $\delta(k, l)$ 是二维单位冲激函数, $\gamma_{3w} = E[W^3(n)]$ 是 $w(n)$ 的偏度。

从 (7) 式可以推得, 在 $k=l$ 直线上的 $2p+1$ 个三阶累积量值满足矩阵方程:

$$Ca = \beta, \quad (8)$$

式中

$$C = \begin{bmatrix} c_{3x}(0, 0) & c_{3x}(1, 1) & \cdots & c_{3x}(p, p) \\ c_{3x}(-1, -1) & c_{3x}(0, 0) & \cdots & c_{3x}(p-1, p-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{3x}(-p, -p) & c_{3x}(-p+1, -p+1) & \cdots & c_{3x}(0, 0) \end{bmatrix},$$

$$a = [1, a_1, \cdots, a_p]^T, \quad \beta = [\gamma_{3w}, 0, \cdots, 0]^T.$$

当我们给定一组回波样本 $\{x(1), \cdots, x(N)\}$ 时, 可以利用三阶递归法 (TOR) 和约束三阶均值法 (CTOM)^[4] 来估计出系统 AR 参数 (a_1, a_2, \cdots, a_p) 。序列的参数化双谱估计为

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \gamma_{3w} / [A(\omega_1)A(\omega_2)A^*(\omega_1 + \omega_2)], \quad (9)$$

式中

$$A(\omega) = \left[1 + \sum_{i=1}^p a_i \exp(-j\omega i) \right].$$

3 雷达目标回波的双谱分析

3.1 目标多普勒补偿 我们知道, 实际中目标相对于雷达总是运动的, 在目标回波中表现为多普勒分量。它对于信号检测是有用的, 而对于雷达目标识别, 这一分量除提供目标速度信息外, 并不能反映目标本身的属性。实验表明, 具有不同运动速度的同类目标, 其回波的双谱结构差异很大^[5], 不利于目标识别。因此, 必须先对回波数据进行多普勒补偿, 具体方法如下: (1) 根据连续 N 个重复周期 (T_r) 目标回波数据估计出其间的目标径向距离变化量 ΔR ; (2) 假设 NT_r 期间目标运动速度 v 恒定, 则可计算出 $v = \Delta R/NT_r$; (3) 设雷达视频回波信号为 $V(t) = a(t) \exp\{j[\phi(t) + (4\pi/\lambda)R_0 - (4\pi/\lambda)vt]\}$, 其中 $a(t)$ 为信号幅度, $\phi(t)$ 为信号相位, λ 为雷达工作波长, R_0 为所选起始距离, 指数项中前两项为固定项, 第三项为多普勒相移。从而, 可构成补偿信号 $B(t) = e^{j(4\pi/\lambda)vt}$ 乘以 $V(t)$ 得

$$U(t) = V(t)B(t) = a(t) \exp\{j[\phi(t) + (4\pi/\lambda)R_0]\}.$$

3.2 实测飞机目标回波双谱分析 利用第 2 节中介绍的 AR 模型参数化双谱估计方法, 我们对在某警戒雷达 (VHF 波段) 上录取的几种飞机目标回波数据进行了双谱分析。AR 模型阶数取为 $p = 10$, 单次扫描数据长度为 128。图 1 所示为同类目标的四组回波的幅度双谱, 图 2 所示为四类不同目标的回波幅度双谱, 图中纵坐标为归一化幅度, 两横坐标为角频率, 单位弧度/秒。显然, 目标回波存在明显的双谱谱峰, 证明了目标回波是典型的非高斯信号, 包含有丰富的阶统计信息。实验表明^[5], 经过多普勒补偿后的目标回波在双谱域, 同类目标在双谱形状和谱峰位置上均表现出良好的相似性, 而异类目标有明显差异。可用于实现目标分类。

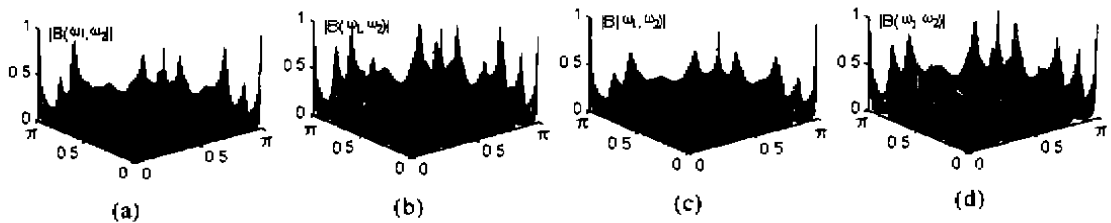


图 1 同类目标的四组回波的双谱

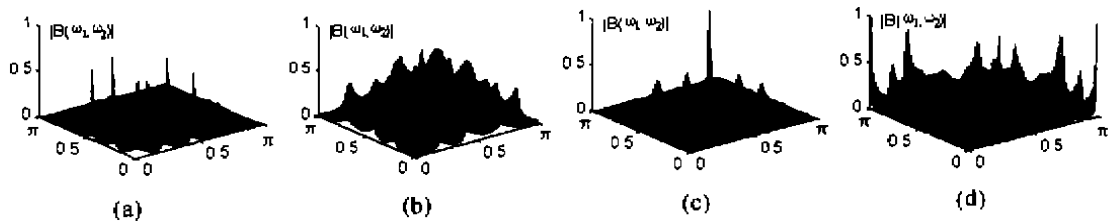


图 2 不同类目标的四组回波的双谱

3.3 目标特征选择 虽然第 3.2 节中飞机目标回波的双谱较好地反映出了同类间的相似性和异类间的差异性。然而, 由于双谱是二维的, 若直接用于目标识别分类, 其计算量是非常庞大的, 构造分类器困难。因此, 必须进行数据降维和特征选择。由双谱定义, 可以获得许多一维切片。通过大量实验分析^[5], 选取双谱的主对角线切片作为特征, 即 $B_x(\omega_1, \omega_2)$ 当

$\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 时, 使特征降为一维信号。图 3 和图 4 分别为图 1 和图 2 对应的双谱主对角线切片, 很好地保留了同类目标的相似性和异类目标的差异性。图中纵坐标为归一化幅度, 横坐标为角频率, 单位弧度 / 秒。

此外, 我们还可以选取 AR 模型参数 a_1, a_2, \dots, a_p 中起主要作用的一些参数, 以及双谱谱峰位置坐标 $(\omega_{1i}, \omega_{2i})$ 构成目标特征矢量, 用于后续目标识别。

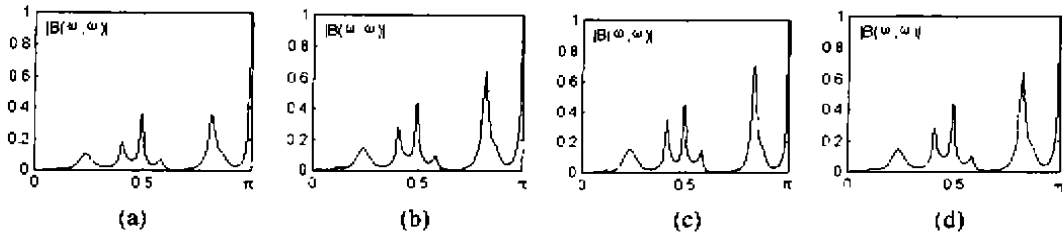


图 3 同类目标所提取的特征

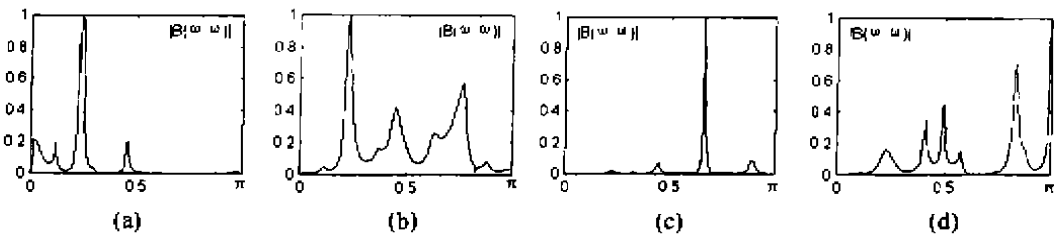


图 4 不同类目标所提取的特征

4 实验结果

根据第 3.3 节选择的特征, 通过构造最小距离分类器, 对获得的四类飞机目标 12 组样本进行分类实验, 计算机处理结果示于表 1。实验结果表明, 利用参数化双谱估计进行雷达目标识别分类, 可获得较满意的识别结果。

5 结 束 语

利用双谱分析非高斯信号的良好性能以及对高斯噪声的抑制能力, 对实测雷达目标回波信号进行了分析处理。提取和利用了隐含于回波信号中的三阶统计量信息。通过选择双谱主对角线切片、估计的 AR 模型参数和双谱谱峰位置作为目标特征, 取得了较好的分类结果。表明高阶谱技术用于雷达目标识别是有效的和实用的。本文的研究是初步的, 关于目标速度估计精度对双谱特性的影响, 雷达多次扫描回波信息的综合利用, 以及本文方法的实时实现等问题是我们后续要解决的问题。

表 1 各类样本到类中心的距离

样本		类别				识别结果
		目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	
目标 1	样本 1	0.0753	0.7526	1.2274	0.8754	目标 1
	样本 2	0.1119	0.9316	1.4311	1.0535	
	样本 3	0.0275	0.6897	0.4758	0.8013	
目标 2	样本 4	0.6707	0.0392	0.8948	0.7565	目标 2
	样本 5	0.6682	0.0225	0.7713	0.6462	
	样本 6	0.6960	0.0114	0.6113	0.5130	
目标 3	样本 7	0.9340	0.7196	0.0244	0.9771	目标 3
	样本 8	0.9340	0.7196	0.0342	0.9865	
	样本 9	0.8977	0.8086	0.0974	0.8054	
目标 4	样本 10	0.6237	0.5957	0.7736	0.0271	目标 4
	样本 11	0.5072	0.7070	0.8879	0.0163	
	样本 12	0.6649	0.6174	0.7324	0.0370	

参 考 文 献

- [1] Nikias C L. Higher-Order Spectra Analysis: A nonlinear signal processing framework. Eaglewood Cliff, New Jersey. PTR Prentice Hall, chapter 1, 1993.
- [2] Bell M R, Grubbs R A. JEM modeling and measurement for radar target identification. IEEE Trans. on AES, 1993, AES-29(1): 73-87.
- [3] Moses R L, Carl J W. Autoregressive modeling of radar data with application to target identification. Proc. of 1988 National Radar Conference, Ann, Arbor USA: 1988, 220-224.
- [4] Raghuveer M R, Nikias C L. Bispectrum estimation: A parametric approach. IEEE Trans. on ASSP, 1985, ASSP-33(5): 1213-1230.
- [5] 李洁. 常规雷达目标识别的高阶谱分析方法研究: [硕士论文]. 西安: 西安电子科技大学, 1998.2.

AR MODEL PARAMETRIC BISPECTRUM ESTIMATION BASED
RADAR TARGET IDENTIFICATION

Ji Hongbing Li Jie Xie Weixin He Wei*

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

*(ATC Administration Shenzhen CAAC, Shenzhen 518128)

Abstract With bispectrum analysis, an AR model parametric bispectrum estimation is presented for radar target echoes. A detail analysis of actual aircraft echoes and a reasonable selection of target signature are made, with a formation of signature vector for target identification. The experimental results show that the method is feasible and effective.

Key words High-order spectrum, Radar target identification, AR parameters

姬红兵: 男, 1963 年生, 博士生, 副教授, 主要从事雷达信号处理理论与应用研究.

李洁: 女, 1972 年生, 助教, 主要从事信号处理教学和科研.

谢维信: 男, 1940 年生, 博士生导师, 教授, 主要从事智能信息处理研究.

贺伟: 男, 1963 年生, 工程师, 从事雷达导航方面的工作.