

双谱用于毫米波雷达目标特征提取的研究¹

汪 敏 李兴国 王一丁

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所 南京 210094)

摘 要 在毫米波雷达系统中, 信噪比对作用距离的影响很大。本文利用双谱技术提取出目标信号双谱的局部相位信息作为特征矢量; 该特征良好的抗噪性大大降低了目标识别对雷达系统信噪比的要求, 从而提高了毫米波雷达的灵敏度及作用距离。

关键词 高阶累积量, 双谱, 毫米波雷达, 特征矢量, 系统噪声

中图分类号 TN951, TN958

1 引 言

毫米波雷达在弹载探测系统中具有广泛的应用前景。不考虑信杂比的要求, 系统目标识别要求在放大、滤波等预处理之后雷达终端信噪比达到 13-15dB。要提高信噪比, 可增大发射功率、接收天线增益, 以及减小作用距离 R 或带宽 B , 并且接收机应设计得具有尽可能低的噪声系数及损耗等。系统参数往往受到弹载条件限制, 给雷达系统的设计带来困难^[1]; 而输入信噪比与 R 的四次方成正比, 若其它参数不变, 要提高信噪比则严重影响了系统的作用距离。本文利用双谱技术对雷达信号进行处理, 提取出信号双谱局部平均相位信息作为特征矢量, 在强噪声下依然稳定有效, 大大降低了目标识别对雷达系统信噪比的要求。

多谱概念于 1958 年由维纳提出^[2-5], 定义为高阶累积量的多维傅里叶变换。作为统计量的累积量不仅提供高阶相关的信息, 而且能够衡量随机变量 (序列) 偏离正态的程度。在谱域中, 双谱及更高阶谱则具有更全面的信息和更重要的特性。而双谱阶数最低, 成为多谱中的热点。与功率谱不同, 双谱不仅有幅度, 而且有相位, 因而更好地反映了回波信号的目标信息。更重要的是双谱在消除噪声方面具有诱人的特性: 高斯白噪声的双谱值为零, 而非高斯白噪声的双谱为常数, 这为去除回波信号中的噪声及杂波提供了重要途径。

本文对不同信噪比下的各种目标信号进行双谱估计, 提取出包含相位信息的特征矢量进行对比。结果表明, 此特征矢量不仅能区别细节信号的差异, 且在强噪声下稳定可靠。

2 双谱基本概念

若设 $\{x_k\}$ 为零均值、三阶实平稳随机序列, 其双谱可定义为

$$\begin{aligned} B(\omega_1, \omega_2) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R(m, n) \exp[-j(\omega_1 m + \omega_2 n)] \\ &= X(\omega_1)X(\omega_2)X^*(\omega_1 + \omega_2), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $R(m, n) = E[x_k x_{k+m} x_{k+n}]$ 为 $\{x_k\}$ 的三阶累积量; $X(\omega)$ 为 $\{x_k\}$ 的傅氏变换。

¹ 1996-10-30 收到, 1997-09-19 定稿

由(1)式可知,序列的三阶相关在谱域上等效为一个频率等于其它两个频率和的三个傅氏分量乘积的统计平均。这种特殊的乘积形式为双谱保留了相位信息。

双谱在信号处理中具有以下优点:

(1) $B(\omega_1, \omega_2)$ 一般为复函数,含有功率谱没有的相位信息:

$$B(\omega_1, \omega_2) = |B(\omega_1, \omega_2)| \exp[j\phi_B B(\omega_1, \omega_2)]; \quad (2)$$

A. V. Oppenheim 指出^[6],信号波形所包含的信息主要是反映在其傅氏变换的相位中,而不是幅度中,因而双谱更好地反映了回波信号的目标信息。

(2) 理论上,高斯序列双谱值为零,而非高斯序列双谱值为常数,这为去除回波信号中的噪声及杂波提供了重要途径。

(3) 双谱能够检测出信号的二次相位耦合项,使雷达信号在各散射点之间互相作用时,回波中出现的交叉项能够在双谱中表现出来,更准确地反映出雷达目标散射结构。

(4) 由双谱函数的周期性及对称性,要确定整个 $\omega_1-\omega_2$ 平面上的双谱值,只须计算以下不冗余区间内的双谱值,简化了计算。

$$[\omega_1, \omega_2]: \quad \omega_1 \geq 0, \quad \omega_1 \geq \omega_2, \quad \omega_1 + \omega_2 \leq \pi. \quad (3)$$

3 含噪信号的双谱特性

从接收机进来的毫米波雷达回波信号,经过预处理之后,所含噪声主要包括杂波及系统噪声。研究表明^[3],除地面杂波趋向 Weibull 分布之外,诸如天气之类由大量散射点引起的杂波及系统热噪声均趋向 Gauss 分布。本文假定信杂比满足识别目标要求,仅对含高斯白噪声的信号作分析,以探讨目标识别对雷达系统信噪比的要求。

设零均值回波序列为

$$X(n) = s(n) + w(n), \quad (4)$$

其中 $s(n)$ 是目标回波信号, $w(n)$ 为 Gauss 白噪声,对其作傅氏变换,则有

$$X_x(\omega) = X_s(\omega) + X_w(\omega).$$

回波信号双谱值为

$$\begin{aligned} B_x(\omega_1, \omega_2) &= X_x(\omega_1)X_x(\omega_2)X_x^*(\omega_1, \omega_2) \\ &= [X_s(\omega_1) + X_w(\omega_1)] \times [X_s(\omega_2) + X_w(\omega_2)] \\ &\quad \times [X_s^*(\omega_1 + \omega_2) + X_w^*(\omega_1 + \omega_2)] \\ &\triangleq B_s(\omega_1, \omega_2) + B_w(\omega_1, \omega_2) + A_1 + A_2, \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= [X_s(\omega_1)X_w(\omega_2) + X_w(\omega_1)X_s(\omega_2) + X_w(\omega_1)X_w(\omega_2)] \times X_s^*(\omega_1 + \omega_2), \\ A_2 &= [X_s(\omega_1)X_w(\omega_2) + X_w(\omega_1)X_s(\omega_2) + X_s(\omega_1)X_s(\omega_2)] \times X_w^*(\omega_1 + \omega_2). \end{aligned}$$

在进行双谱估计时, 我们为了利用信号的相关性, 同时抑制不相关的噪声, 通常取一段时间内的 N 组同类信号, 分别作双谱估计, 然后平均作为此类目标回波的双谱。如此取

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_1^{(i)} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_s^{(i)}(\omega_1)X_w^{(i)}(\omega_2) + X_w^{(i)}(\omega_1)X_s^{(i)}(\omega_2) + X_w^{(i)}(\omega_1)X_w^{(i)}(\omega_2)]X_s^{*(i)}(\omega_1 + \omega_2) \\ &= X_s(\omega_1)X_s^*(\omega_1 + \omega_2) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_w^{(i)}(\omega_2) + X_s(\omega_2)X_s^*(\omega_1 + \omega_2) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_w^{(i)}(\omega_1) \\ &\quad + X_s(0) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_w^{(i)}(\omega)|^2. \end{aligned}$$

上面式中 $i = 1, 2, \dots, N$ 表示其中第 i 组(下同)。因为各组高斯白噪声相互独立, 故 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_w^{(i)}(\omega) \rightarrow 0$, 又因 $X_s(0) = 0$, 故可得 $A_1 \rightarrow 0$ 。同理可推出: $A_2 \rightarrow 0$ 。又高斯噪声双谱值为零, 即 $B_w(\omega_1, \omega_2) = 0$ 。因此, 在统计平均误差可以忽略的情况下, 同时对 $\omega_1 = \omega_2 = 0$ 时因统计出现的复杂情况不予考虑, 可认为

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = B_s(\omega_1, \omega_2) + \beta, \quad (5)$$

β 为趋近于零的常数, 即对于含高斯白噪声的回波, 由于各组信号中混合噪声的不相关性, 其中信号与噪声在双谱中可认为是线性叠加, 且高斯噪声双谱值趋近于零, 随着统计误差的减小, 噪声被抑制。

4 特征量的提取

4.1 特征量的定义

在图 1 所示的不冗余区间内估计 $\{x_k\}$ 的双谱 $B(\omega_1, \omega_2)$,

$$\text{并选取直线: } \begin{cases} l_0: \omega_1 = \omega_2, \\ l_m: \omega_2 = \alpha_m, \end{cases}$$

式中 $m = 1, 2, \dots, M$; α_m 为 $(0, \pi/2)$ 内的常数。

沿直线 $l_m (m = 0, 1, 2, \dots)$ 对 $B(\omega_1, \omega_2)$ 积分:

$$s(m) = \int_{l_m} B(\omega_1, \omega_2) dl_m = s_r(m) + js_i(m), \quad (6)$$

其中 $s_r(m)$, $s_i(m)$ 分别为 $s(m)$ 的实部和虚部。定义

$$f(m) = \text{arctg} \left[\frac{s_i(m)}{s_r(m)} \right], \quad (7)$$

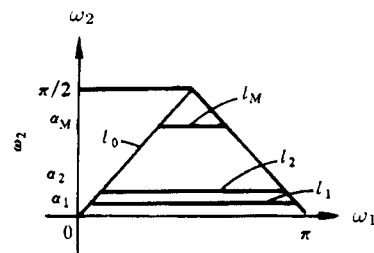


图 1 双谱估计的不冗余区间

则 $f(m)$ 从统计上给出了各直线 l_m 上 $B(\omega_1, \omega_2)$ 的平均相位, 反映了 $\{x_k\}$ 的傅氏谱的相位信息; 可以证明 $f(m)$ 具有:

(1) 时移不变性 信号时移只对频谱相位产生影响, 在双谱中被抵消,

$$\begin{aligned} x(n+k) &\rightarrow X(\omega)e^{-j\omega k} \\ B'(\omega_1, \omega_2) &= X(\omega_1)e^{-j\omega_1 k} X(\omega_2)e^{-j\omega_2 k} X^*(\omega_1 + \omega_2)e^{j(\omega_1 + \omega_2)k} \\ &= X(\omega_1)X(\omega_2)X^*(\omega_1 + \omega_2) = B(\omega_1, \omega_2). \end{aligned}$$

(2) 直流不变性 信号的双谱中已不含信号直流分量, 故特征量 $f(m)$ 具有直流不变性;

(3) 放大不变性 信号放大对其双谱的实部及虚部具有同样的影响, 由 (7) 式知 $f(m)$ 不变。

在回波信号中混有噪声时, 我们将 $s(m)$ 去均值后再求相位, 作为特征矢量, 则在强噪声下 $f(m)$ 亦不会发生很大变化。

4.2 特征量的优化

对特征量的优化应遵循以下原则:

(1) 以低频区的特征为最优。这主要是考虑到信号的相关性好, 其双谱在低频区较突出; 而噪声双谱在谱域内近似于平均分布; 高频区内, 噪声对回波相位特征的影响较明显。

(2) 依次选择较优特征矢量, 直至分类效果达到要求。选择靠近低频区的特征量, 可以减少噪声的影响; 而要区分比较类似的目标, 则需要反映细节信息的高频特征。特征量的选择应权衡两方面的因素, 以期达到最佳分类效果。

5 实验结果及讨论

实验中所采用的三种目标信号是毫米波雷达对以不同仿真目标测得的较稳定的回波信号。对三种信号编以 A, B, C 号, 其归一化波形如图 2 所示。三种目标各取 100 组回波,

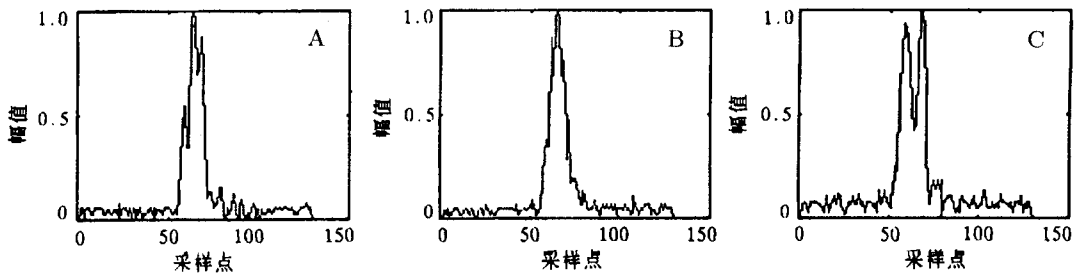


图 2 三类目标的回波信号

每次取 20 组用于提取特征矢量, 对信号进行组合测试。有噪信号在此三种目标信号上叠加不同信噪比的 Gauss 噪声构成。图 3 是三种信号及噪声的双谱图, 图 3(a) 为三类目标回波不含噪声下的双谱图, 图 3(b) 为 0dB 下的双谱图, 图 3(c) 为高斯噪声的双谱图。

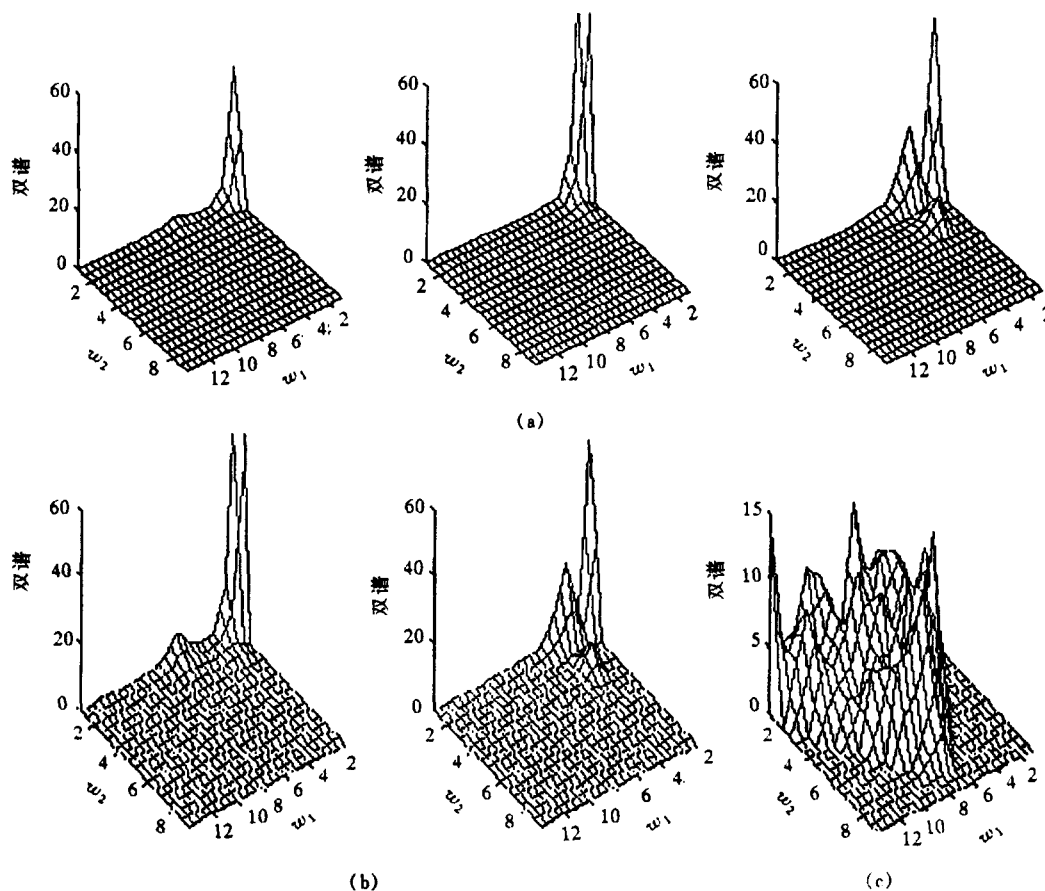


图 3 信号及含噪信号的双谱图

由图 3 可以看出, 强噪声下信号的双谱并没有多大变化, 表明双谱估计对噪声很强的抑制能力。信号在叠加不同信噪比的 Gauss 噪声后提取的特征矢量 (弧度制) 列于表 1。

表 1 不同信噪比下目标的特征矢量

S/N (dB)	Target A		Target B		Target C	
	s_1	s_2	s_1	s_2	s_1	s_2
∞	0.093	-0.039	-0.220	-0.283	-0.689	-0.127
10	-0.093 ± 0.001	-0.037 ± 0.003	-0.219 ± 0.001	-0.283 ± 0.001	-0.687 ± 0.005	-0.134 ± 0.002
6	-0.092 ± 0.001	-0.034 ± 0.006	-0.219 ± 0.001	-0.283 ± 0.005	-0.686 ± 0.012	-0.144 ± 0.006
3	-0.092 ± 0.003	-0.027 ± 0.010	-0.218 ± 0.003	-0.281 ± 0.012	-0.688 ± 0.025	-0.162 ± 0.010
0	-0.088 ± 0.004	-0.027 ± 0.015	-0.214 ± 0.009	-0.273 ± 0.030	-0.718 ± 0.04	-0.186 ± 0.03
-3	-0.083 ± 0.007	0.069 ± 0.093	-0.213 ± 0.030	-0.218 ± 0.060	-1.121 ± 0.25	-0.156 ± 0.15

表中显示出, 基于双谱平均相位的特征包含了丰富的波形信息。不同目标模式之间保持明显的差异性, 能反映出信号在细节上的差异; 同类目标信号在信噪比很低时, 特征量稳定可靠。从实验结果来看, 接收机终端信噪比为 0~5dB 时, 即可满足毫米波雷达目标识别的要求。

6 结束语

双谱估计对噪声有很强的抑制能力; 基于双谱提出的平均相位特征, 包含了丰富的回波波形信息, 具有平移不变性、放大不变性及直流不变性; 且在低信噪比时可靠稳定, 降低了目标识别对毫米波雷达系统信噪比的要求。尽管双谱估计需要大量统计以使偏差较小, 但由于双谱估计可以并行计算, 同时采用快速算法, 亦能够满足系统对实时性的要求。因此, 双谱技术是很有实用价值的特征提取方法。

参 考 文 献

- [1] 李兴国. 毫米波近感技术及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1991, 57-69
- [2] Chandran V. Pattern recognition using invariants defined from higher order spectra-one-dimensional inputs. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, SP-41(1): 205-211.
- [3] Walton E K. Bispectrum of radar signatures and application to target classification. Radio Science, 1990, 25(2): 101-113.
- [4] 王宏禹. 现代谱估计. 南京: 东南大学出版社, 1990, 304-367.
- [5] 文树梁. 基于双距离象的雷达目标识别技术. 现代雷达, 1996, 18(1): 15-21.
- [6] Oppenheim A V. The importance of phase in signals. Proc. IEEE, 1981, 69(5): 529-541.

A STUDY OF FEATURE EXTRACTION FOR mmW RADAR BY USING BISPECTRUM TECHNOLOGY

Wang Min Li Xingguo Wang Yiding

(*Inst. of mmW & Light Wave Near-Sensing Tech., Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210094*)

Abstract In mmW radar system, SNR affect heavily on radar range. To lower the SNR demand of target recognition, a new approach of feature extraction based on the bispectrum technique is presented. The feature vectors defined from bispectrum have high stability even when SNR is very low. Thus, the sensitivity and range of mmW radar are improved.

Key words Higher order cumulants, Bispectrum, Millimeter-wave radar, Feature vector, System noise

注 敏: 女, 1972 年生, 博士, 主要研究方向: 信号及信息处理, 毫米波精确探测及目标识别。

李兴国: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会微波分会副主任委员、毫米波亚毫米波专业委员会委员、在近十个全国性学术组织及专家组兼职, 主要研究方向: 毫米波亚毫米波近程探测、成像及目标识别技术。

王 丁: 男, 1967 年生, 博士, 主要研究方向: 毫米波精确探测系统设计, 目标识别, 现代信号处理等。