

# 用对数平均双谱识别飞机的原理和方法

裴炳南,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

**摘 要:** 文章首先定义了对数双谱并给出了与目标识别有关的三个性质,接着推导了目标对数双谱与高分辨距离像对数双谱之间的关系,由此提出了对数双谱自动目标识别的距离准则和实现方法.外场实测数据的计算机仿真表明,该方法适用于飞机识别,是有效的和可行的.

**关键词:** 雷达信号处理;自动目标识别;高分辨距离像;对数平均双谱方法;计算机仿真

**中图分类号:** TN95; TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)03-0354-05

## Principle and Method of Airplane Recognition by Logarithm Bispectra-Averaged

PEI Bing-nan, BAO Zheng

(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** A definition of a logarithm bispectra-averaged is first given, followed by its three properties involving target recognition. Then a relationship is established between the logarithm bispectra-averaged and a high-resolution range profile. Thereupon, a distance criterion for automatic target recognition by logarithm bispectra-averaged and its implementation are suggested. Computer simulation with the acquired outfield data shows that the logarithm bispectra-averaged method applies to airplane recognition, and is effective and practical.

**Key words:** radar signal processing; automatic target recognition; high-resolution range profile; logarithm bispectra-averaged method; simulation

### 1 引言

在光学区,目标的电磁特征可用散射点模型表示.高分辨雷达距离像(HRRP)是目标大量散射点的雷达回波在雷达视线(LOS)上的一维投影,能够提供有关目标的形状信息<sup>[1,10]</sup>.因而,HRRP可用于目标识别和分类,并发表了许多论文<sup>[1,5,6,8,9]</sup>.但是HRRP对目标方位变化和平移变化都很敏感,必须实现HRRP对齐后才能进行识别.对齐后,用HRRP识别目标仍是一个二维搜索的问题(目标域和方位域),难以实现实时处理.为了降低计算量,人们提出了距离像双谱方法<sup>[2~4]</sup>.双谱方法用于飞机识别的两个优点是:(1)能抑制具有零均值对称概率密度特征的干扰和噪声.(2)具有平移不变特征:对飞机到雷达的距离变化不敏感,因而可能不用运动补偿直接进行识别.然而,双谱是信号从一维到二维的变换,数据量是信号样本数的平方.当信号的样本数目增大时,计算量和存储量急剧增大,比如信号的样本数为256,则双谱数据量为65536.已经提出了许多降维双谱的方法,如轴向积分、径向积分和圆周积分双谱方法,并应用于飞机识别研究<sup>[2]</sup>.圆周积分在识别性能上优于前两种双谱方法,但需要大量的插值运

算,运算量较大.本文结合双谱特点,提出一种对数双谱最小距离识别目标的方法,并用于飞机识别研究<sup>[2,4]</sup>.这种方法运算量少,易于实时处理.计算和仿真结果表明,该方法是有效的,可行的.

文章安排如下:在第二节,定义对数双谱并简述有关的性质;第三节研究目标距离像的对数双谱识别最小距离准则;第四节介绍对数双谱识别目标的方法;第五节是计算机的仿真;第六节是说明;最后给出了结论.

### 2 对数双谱

双谱的定义源于高阶累积量<sup>[10]</sup>.它有许多重要的性质.本文感兴趣的是双谱的时(空)移不变性和抑制高斯类对称分布概率密度信号或噪声的性质.为进一步研究需要,定义对数双谱如下.

**定义1** 设  $B_x(k_1, k_2)$  是序列  $x(n)$  的双谱,称  $\log B_x(k_1, k_2) = \log |B_x(k_1, k_2)| + \arg\{B_x(k_1, k_2)\}$  是序列  $x(n)$  的对数双谱.

根据双谱的定义和性质,容易证明,对数双谱具有平移不变性和抑制高斯噪声的性质.

为了叙述方便,引入对数双谱算子  $\log \text{bisp}$  并定义为:  
 $\log \text{bisp}(x(n)) = \log B_x(k_1, k_2)$ . 这里,  $B_x(k_1, k_2) = E_x\{X(k_1)X(k_2)X^*(k_1+k_2)\}$ .

对数双谱还具有下述重要性质.

**性质 1** 设  $h(n)$  是稳定的线性时不变系统的冲激响应,  $x(n)$  是输入信号,  $y(n)$  是输出信号, 则  $\log \text{bisp}(y(n)) = \log \text{bisp}(h(n)) + \log \text{bisp}(x(n))$ .

**证明:** 因为  $y(n) = h(n) * x(n)$ ,  $Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$ , 故

$$B_y(\omega_1, \omega_2) = Y(\omega_1)Y(\omega_2)Y^*(\omega_1+\omega_2) = H(\omega_1)H(\omega_2) \cdot (H^*(\omega_1+\omega_2)X(\omega_1)X(\omega_2)X^*(\omega_1+\omega_2))$$

$$E_y\{B_y(\omega_1, \omega_2)\} = H(\omega_1)H(\omega_2)H^*(\omega_1+\omega_2)E_x\{X(\omega_1) \cdot X(\omega_2)X^*(\omega_1+\omega_2)\}$$

由定义 1 可得所证.

**性质 2** 设信号  $x(n) = s(n) + w(n)$ ,  $w(n)$  是零均值高斯过程噪声, 则线性系统输出的对数双谱为:

$$\log \text{bisp}(y(n)) = \log \text{bisp}(h(n)) + \log \text{bisp}(s(n)) \quad (\text{证略})$$

**性质 3** 目标雷达回波的对数双谱具有空移(平动)不变性.

$$\log \text{bisp}(x(n-k)) = \log \text{bisp}(x(n)) \quad (\text{证略})$$

### 3 对数双谱最小距离目标识别原理

**约定:** (1) 目标是飞行金属体; (2) 采用地基宽带雷达探测目标; (3) 参数  $R$  是目标几何中心到雷达的距离, 它远大于目标的几何线尺寸,  $\lambda$  是雷达载频波长,  $c$  是光速.  $D_N = \{1, 2, \dots, N\}$ .

#### 3.1 雷达回波与目标的距离像在双谱域中的关系

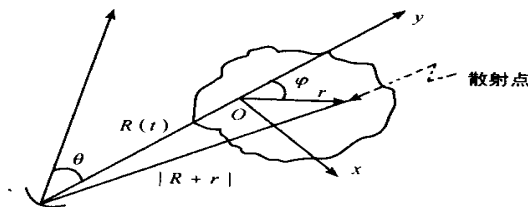


图 1 目标散射点与雷达视线的几何关系

如图 1 所示, 选目标几何中心(实用上为主特亮点)为坐标原点, 它到雷达的距离为  $R$ , 目标体表面上任一点坐标为  $r(x, y, z)$ , 雷达视线(过原点)为  $y$  轴, 取雷达转角扫过平面为  $xy$  平面.  $\theta$  是目标方位角, 它是目标鼻锥方向与雷达视线方向之间的夹角.

设雷达信号照射到目标上, 在其面向雷达的表面  $r(x, y, z)$  处引起的散射点分布为  $h(r, \theta)$ , 则目标全部后向散射回波可表示为

$$y(t; \theta) = \int_s h(r, \theta) x(t - \tau) dr \quad (1)$$

式中,  $x(t)$  是雷达发射信号,  $\tau = 2R/c$  是雷达信号到达目标的双程时间延迟,  $y(t, \theta)$  是雷达接收到的回波;  $s$  是处在雷达波束内雷达可见的目标曲面. (1) 的物理意义是, 雷达距离像

是目标大量散射点的雷达回波在雷达视线(LOS)上的一维投影.

注意到远场条件  $R \gg r$ , 近似有  $\tau = 2(R + r \cos \theta) / c$ ,  $\tau = \tau(R, r)$ ; 将式(1)两边关于时间  $t$  傅立叶积分, 得

$$Y(\omega, \theta) = \int_s h(r, \theta) x(t - \tau) e^{-j\omega \tau} dt dr$$

$$= H(\omega, \theta) X(\omega) e^{-j\omega \tau(R, \theta)} \quad (2)$$

其中,  $H(\omega, \theta) = \int_s h(r, \theta) e^{-j\omega 2r \cos(\theta, \eta) / c} dr$

式(2)是目标方位角为  $\theta$  时目标回波的傅立叶变换表示. 式中右边的第 1 项是目标散射函数  $h(r, \theta)$  的空域傅立叶变换, 第 2 项是发射雷达信号的傅立叶变换, 第 3 项是目标相对雷达位移引起的线性相位项, 它是由目标相对雷达的平动引起的.

#### 3.2 对数双谱最小距离识别准则

根据上节对数双谱的性质 1, 由式(2)得,

$$\log B_y(k_1, k_2; \theta) = \log B_h(k_1, k_2; \theta) + \log B_x(k_1, k_2)$$

或  $\log \text{bisp}(y(t; \theta)) = \log \text{bisp}(h(r; \theta)) + \log \text{bisp}(x(t)) \quad (3)$

假设在某一时刻雷达同时观察到目标  $h_1(r; \theta_1)$  和  $h_2(r; \theta_2)$  的一次雷达回波分别为  $y_1(t; \theta_1)$  和  $y_2(t; \theta_2)$ , 由性质 3 知道, 虽然两目标到雷达的距离通常不同, 但它们的距离像在双谱域是“对齐”的, 或者说, 目标到雷达的距离对识别结果没有影响. 因而根据性质 1, 对每一次回波, 有

$$\log \text{bisp}(y_1(t; \theta_1)) - \log \text{bisp}(y_2(t; \theta_2)) = \log \text{bisp}(h_1(r; \theta_1)) - \log \text{bisp}(h_2(r; \theta_2)) \quad (4)$$

式(4)表明, 不同目标雷达回波的对数双谱的某种距离度量, 例如欧几里德距离, 可以作为度量和判断不同目标相似程度的依据; 即可以用目标不相干的若干次回波双谱平均值的对数作为目标识别的特征向量.

假设有  $N$  类不同目标, 其方位角为  $\theta_i, i \in D_N$ , 用它们双谱平均的对数  $\log \text{bisp}(y_i(t; \theta_i))$ ,  $i \in D_N$  作为比较模板; 又设待识别目标的距离像为  $y(t; \theta) \in \{y_i(t; \theta_i), i \in D_N\}$ , 则识别算法的判决准则应该是, 对某个  $j \in D_N, \forall i \in D_N$ , 且  $i \neq j$ , 如果

$$d(\log \text{bisp}(y(t; \theta)), \log \text{bisp}(y_j(t; \theta_j))) < d(\log \text{bisp}(y(t; \theta)), \log \text{bisp}(y_i(t; \theta_i)))$$

则认为目标是第  $j$  类目标. 符号  $d(x_1, x_2)$  表示空间点  $x_1$  和  $x_2$  之间的欧氏距离.

该准则还可以写为, 对某个确定的  $j \in D_N, \forall i \in D_N$ , 如果  $d(\log \text{bisp}(y(t; \theta)), \log \text{bisp}(y_j(t; \theta_j))) = \min_i d(\log \text{bisp}(y(t; \theta)), \log \text{bisp}(y_i(t; \theta_i)))$ , 则判定目标是方位角为  $\theta_j$  时的第  $j$  类目标.

我们称上述准则为对数双谱最小距离准则.

应该指出, 为正确识别目标, 每个目标的模板库应该包含它的全部方位角, 用准则完成每个方位角的识别, 然后用方位角域最小化方法确定目标的类属.

### 4 用对数双谱识别目标的方法

在上节关于目标识别的原理中, 假设目标模板库已经建立和目标方位角已知; 事实上, 目标通常是非合作的, 方位角

是不知道的. 必须解决模板(特征矢量)的选择、库的构造方法以及确定最佳方位角的方法.

#### 4.1 目标回波数据的抽取

在目标的电磁光学区, 目标的尺寸远大于雷达信号波长, 雷达接收到的回波只是目标局部位置上散射点回波的矢量和<sup>[11]</sup>. 一般地, 在目标姿态角变化不大于 10 度范围内, 可以认为目标的散射点模型是不变的. 设雷达发射脉冲线调频信号  $s(t) = a_T(t) e^{j2\pi[f_0 t + 0.5\mu t^2]}$ ,  $a_T(t)$  是时宽为  $T$  的门函数; 雷达脉冲重复频率为 PRF, 脉冲间隔时间为  $\text{PRI} = 1/\text{PRF}$ ,  $T < \text{PRI}$ . 目标的一维距离功率像可以表为<sup>[2]</sup>

$$|x_m(n)|^2 = \sum_{i=1}^{L_n} \frac{2}{n_i} + \sum_{i=2}^{L_n} \sum_{k=1}^{i-1} \frac{1}{n_i n_k \cos \theta_{mnk}} \quad (5)$$

其中,  $\theta_{mnk} = \{ -\frac{\Delta}{2} (r_{mni} - r_{mnk}) + (r_{mni} - r_{mnk}) \} \bmod(2\pi)$ . 可以证明,  $\cos \theta_{mnk}$  的理论分布是关于零均值对称的<sup>[12]</sup>. 为方便计, 把式(5)各项依次写成

$$p_{mn} = p_{mn}^{(s)} + p_{mn}^{(c)} \quad (6)$$

并称  $p_{mn}^{(s)}$  为自身像,  $p_{mn}^{(c)}$  为交叉项像, 因此, 一维距离功率像关于慢时间  $m$  的平均能抑制交叉项并稳定自身像.

由于 PRF 远大于目标转动的多普勒带宽, 雷达回波距离像序列通常相关性很强. 根据随机信号分析理论<sup>[12]</sup>, 应当对距离像序列进行适当的抽取, 利用抽取后距离像进行算术平均. 抽取的原则是, 尽可能使抽取后的回波互不相关. 一般地说, 飞机飞行方位转角变化大时, 相邻回波的相关性弱, 抽取因子可小一些; 飞行方位角变化小时, 相邻回波的相关性强, 抽取因子应该大一些. 因此, 抽取因子的大小应该根据雷达回波数据的相关系数因时而异, 但目标平稳飞行时, 抽取因子近似为常数. 经验表明, 抽取后的两次回波对应的方位角大约应为 0.01 - 0.015 度. 消除目标平动影响后的雷达数据可以用转台模型近似表示.

#### 4.2 双谱平均值作为目标识别的模式特征向量

累积量具有半不变性(semi-invariant), 表述为<sup>[10]</sup>

**定理 1** 若随机变量  $\{x_i\}$  与随机变量  $\{y_i\}$  独立, 则累积量  $\text{cum}\{x_1 + y_1, \dots, x_k + y_k\} = \text{cum}\{x_1, x_2, \dots, x_k\} + \text{cum}\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$

一般地说, 目标等效绕其几何中心旋转是缓慢的, 旋转 Doppler 带宽很窄, 而雷达 PRF 往往多达数百赫兹; 雷达回波序列相当于空域(Doppler 域)过采样; 经  $K$  次抽取后, 可以认为所得方位距离像阵列  $p = [p_1, p_2, \dots, p_L]$  的各列互不相关.

将式(6)写成

$$p_j = p_j^{(s)} + p_j^{(c)} \quad (7)$$

这里  $p_j^{(s)}$  是距离自身像, 其统计性能决定于目标的散射点模型; 而  $p_j^{(c)}$  是由于不满足  $\theta \ll \pi/(4W)^{[1,5]}$  时引起散射点回波的交叉干扰项. 从物理学观点来看, 这两部分显然是统计独立的. 因此, 关于慢时间域距离像的平均可以写成  $\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L p_j =$

$\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L (p_j^{(s)} + p_j^{(c)})$ . 由定理 1 知,

$$\text{cum}\left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L p_j\right) = \text{cum}\left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L p_j^{(s)}\right) + \text{cum}\left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L p_j^{(c)}\right) \quad (8)$$

可以认为目标散射点相位差在  $[0, \pi]$  上独立均匀分布, 从而  $p_j^{(c)}$  近似服从对称分布<sup>[2]</sup>, 因此,

$$\text{cum}\left\{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L p_j^{(c)}\right\} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \text{cum}\{p_j^{(c)}\} = 0$$

故

$$\text{cum}\left\{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L p_j\right\} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \text{cum}\{p_j^{(s)}\} \quad (9)$$

将式(9)的累积量取为三阶并作 DFT, 即得

$$\overline{B_p(\omega_1, \omega_2)} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \overline{B_{p_j^{(s)}}(\omega_1, \omega_2)} \quad (10)$$

综上所述, 可选择若干个不相关的距离像的双谱平均值作为目标识别的模式特征向量. 当然, 式(10)是理想情况下的结果; 实际应用时会存在误差, 因为平均样本数  $L$  在物理上受限于不发生散射点越距离单元走动的方位角变化条件的限制, 即抽取后的  $L$  次回波对应的目标轨迹等效转角应满足  $\theta < R/W^{[1,5]}$ , 不可能很大. 此处  $R$  是雷达的距离分辨率,  $W$  是目标相对于雷达视线的最大横向尺寸.

#### 4.3 模板的选择和模板库的构造

为研究方便, 设目标平稳飞行. 用 4.1 节方法抽取回波并分组, 每组回波对应目标轨迹的等效转角为  $\theta_i$ ; 对每组的各个距离像样本求双谱并按式(10)求得组距离像的平均双谱, 构成第  $i$  类目标的距离像平均双谱阵列, 记为

$$B_i = [B_i(\omega_1, \omega_2), B_i(\omega_1, \omega_3), \dots, B_i(\omega_1, \omega_q)] \quad (11)$$

此处的  $\theta_i$  由  $\theta_i < R/W$  确定,  $\omega = [\omega_1, \omega_2]$ . 假设目标姿态角变化范围为  $[0, \pi]$ . 设有  $N$  类目标, 则目标模板库可写为

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1(\omega_1, \omega_2) & B_1(\omega_1, \omega_3) & \dots & B_1(\omega_1, \omega_q) \\ B_2(\omega_1, \omega_2) & B_2(\omega_1, \omega_3) & \dots & B_2(\omega_1, \omega_q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_N(\omega_1, \omega_2) & B_N(\omega_1, \omega_3) & \dots & B_N(\omega_1, \omega_q) \end{bmatrix}$$

设有一待识别目标, 其方位角  $\theta$  和类别是不知道的, 但可以在模板库中进行二维匹配搜索确定目标的类别. 方法是首先将目标双谱特征与每类模板在方位向进行匹配, 匹配采用第 3 节介绍的原理进行; 结果在每类目标中确定一个最佳方位角. 在此基础上, 采用同样的方法进行目标类匹配, 得到识别的结果.

### 5 实测数据的算法仿真

为了检测我们提出方法的有效性, 我们用雷达实测飞机数据进行了识别. 雷达和飞机的数据参数如下

表 1 雅克、安 26、奖状飞机实测数据及参数

雷达参数	PRF = 400Hz		$f_0 = 5520\text{MHz}$	
	采样 $f_s = 10\text{MHz}$		$f = 400\text{MHz}$	
飞机类型	机长(m)	机宽(m)	机高(m)	
雅克	36.38	34.88	9.83	
安 26	23.8	29.2	9.83	
奖状	14.4	15.9		

飞机飞行航线如文献[5]. 对三种飞机各取一段数据, 每段有 26000 次回波. 数据采集期间飞机雅克 - 42、安 - 26 和奖状的转角分别是 16 度、35 度和 40 度. 将每段数据按 20:1 抽取, 每种飞机取 1250 个距离像, 依次将距离像按每 50 个为一

组分成 25 组;对每组内距离像进行预处理,包括去均值,加海宁窗、归一化(目的是消除飞机平动造成的组内距离像回波强度相差太大,以及不同飞机距离像绝对幅度相差太大),然后取双谱变换,对每组内的 50 个距离像在双谱域算术平均,得到距离像双谱统计平均估计值(由于双谱方法本能地消除了飞机的平动分量,相应的飞机距离像相当于是由飞机上各散射点绕飞机几何中心旋转产生的;又由于飞机转动的多普勒带宽很小,对 PRF = 400Hz 来说,可以认为,在每组距离像对应的时间内,距离像序列是一个平稳矢量随机过程)。该统计平均估计值的集合可以作为模式识别的特征量。为方便进行目标识别,我们用每组距离像双谱统计平均估计值的对数作为模式识别的特征量。

用上述方法得到每种飞机的 25 个特征量,建立模板数据库,在待识别飞机(比如雅克)的回波数据中任取一小段数据(100 次回波),按 20:1 抽取 5 个样本,用其双谱平均对数作为待识别特征量。在同一观测数据段内,36 次随机选取待识别飞机的回波数据,用对数双谱最小距离准则进行模式匹配识别。识别结果如表 2 所示。

表 2 对数双谱最小距离准则识别结果

测试飞机	雅克 - 42	安 - 26	奖状	识别率
雅克 - 42	855	36	9	95 %
安 - 26	8	847	45	94.11 %
奖状	0	6	894	99.33 %

表 2 表明,用对数双谱最小距离准则识别飞机是有效的。

图 2 和图 3 表示一个实验样本(将 1000 次顺序回波按 20:1 抽取后得到的平均双谱对数矩阵)的识别结果,试验目标是雅克飞机。图 2 表示目标与模板库中 3 种飞机方位向最小距离匹配的情况,横轴坐标值表示分组序号,对应于回波时间序列,每一单位对应抽取后的 50 次回波的双数平均双谱。横轴上只有整数值有定义,每条曲线上只有对应横轴的整数点列值有定义,每条曲线上最低点表示目标与模板库中飞机(对应曲线)的最佳匹配角。一般来说,  $N$  类飞机可能有  $N$  个不同的最佳匹配角。

图 3 表示目标与各种飞机在方位最佳匹配时的类别匹配结果。横坐标轴表示飞机类别,相应位置上棒状图的高低表示类别匹配误差。

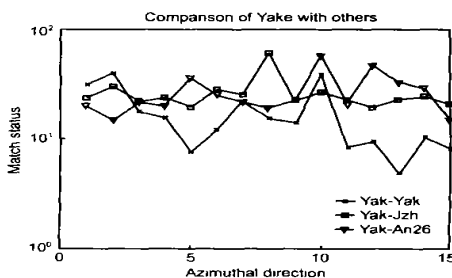


图 2 待识别的雅克 - 42 飞机与模板库中的雅克 - 42、安 - 26 及奖状飞机的方位匹配曲线

## 6 有关问题的说明

### 6.1 判决模糊问题

设模板库中有  $N$  类飞机,在类判决时,目标与  $N$  个模板的最小距离为  $d_{oj}$ ,次最小距离为  $d_{ok}$ 。可能存在  $|d_{oj} - d_{ok}| < \epsilon$ ,  $\epsilon$  是一个小的正数,表现为棒状图高度几乎相等。此时,用最小距离准则识别是不可靠的。我们称  $|d_{oj} - d_{ok}| < \epsilon$  为类别判决模糊区。

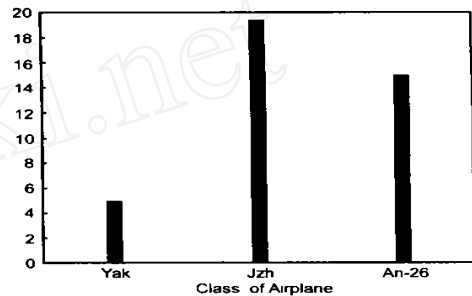


图 3 方位最佳匹配时待识别的雅克 - 42 飞机与模板库中的雅克 - 42、安 - 26 及奖状飞机的类别匹配误差棒状图

为了消除类别判决模糊问题,可以预先设置一个阈值  $\epsilon$ ,如果  $|d_{oj} - d_{ok}| > \epsilon$ ,  $j, k \in \{1, \dots, N\}$ ,  $k \neq j$ , 和  $\min\{d_{oj}, d_{ok}\} = d_{oj}$ , 就肯定判决目标是第  $j$  类。如果  $|d_{oj} - d_{ok}| \leq \epsilon$ , 则拒绝作出判决,提示目标识别结果不可靠。

### 6.2 计算量问题

目标识别经过方位角匹配和目标类别匹配两个阶段。在每一阶段,识别过程是并行的,并且该过程只包含一次矩阵乘法、一次求 2-范数运算和一次比较判别运算。该方法计算量较小,易于实时识别。

### 6.3 目标模板个数的选取

设有  $N$  类目标,它们的最大线几何尺寸为  $W_{\max}$ ,又设雷达信号带宽为  $f$ ,为保证所有的目标都不发生散射点越距离单位走动,要求目标最大转角  $\theta_{\max} \leq R/W_{\max}$ 。

设雷达相对目标的方位角变化范围为  $\Delta\theta$  时可以获得目标的足够方位向结构信息,则识别目标的平均双谱模板个数为

$$N = \frac{W_{\max}}{\Delta\theta} \geq \frac{W_{\max}}{R} = 2 f W_{\max} / c \quad (12)$$

由于大的  $N$  要占用目标识别器较多的存储资源和计算时间,因此应将  $N$  个目标依尺寸大小分成  $k$  个组,每组的模板数用式(12)计算,建立  $k$  个子模板库。

当雷达接收到目标回波时,首先进行尺寸估计,然后从  $k$  个子库中选取一个进行对数双谱匹配识别。尺寸估计方法是,设置一个门限,如距离像平均值,求出距离像大于该门限的第一个距离点和最后一个距离点,据此估计飞机的线尺寸。

## 7 结论

我们首先定义了对数双谱,并给出了对数双谱的三个重要性质。研究对数双谱的重点放在目标的识别上。从目标与雷达回波的关系出发,推导了目标对数双谱与高分辨距离像对

数双谱之间的关系,由此提出了对数双谱自动识别的距离准则和利用该准则实现方位向搜索和目标类别搜索的方法.外场实测数据的计算机仿真结果表明,采用对数双谱方法在原理上是可行的、有效的.该方法的主要优点是计算量小,便于实时识别.有关本文方法和现有方法的比较研究结果将另文报道.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Hudson S, Psaltis D. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles [J]. IEEE Trans. AES, 1993, 29(3): 741 - 746.
- [ 2 ] 廖学军. 基于高分辨距离像的雷达目标识别 [J]. 博士学位论文, 西安电子科技大学研究生院, 1999: 8 - 13.
- [ 3 ] Watton E K, Jouny I. Bispectrum of radar signatures and application to target classification [J]. Radio Science, 1990, 25(2): 101 - 103.
- [ 4 ] Liao X, Bao Z. Circularly integrated bispectra: novel shift invariant feature for high-resolution radar target recognition [J]. Electronics Letters, 1999, 34: 1879 - 1880.
- [ 5 ] Zhou D, Liu G, Wang J. Spatio-temporal target identification method of high-range resolution radar [J]. Pattern Recognition, 2000, 33: 1 - 4.
- [ 6 ] Li Hsueh-Jyh, Yang Sheng-Hui. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects [J]. IEEE Trans. AP, 1993, 41(3): 261 - 268.
- [ 7 ] Chandran V, Elgar SL. Pattern recognition using invariant defined from higher order spectra: One-dimensional inputs [J]. IEEE trans. SP., 1993, 41(1): 205 - 207.
- [ 8 ] Blair WD, Shalom YB. Using range profile for data association in multiple-target tracking [J]. IEEE Trans. AES, 1996, 32(1): 445 - 446.
- [ 9 ] Li Hsueh-Jyh, et al. Matching score properties between range profile of high resolution radar targets [J]. IEEE Trans. AP, 1996, 44(4): 444 - 449.
- [ 10 ] Nikias CL, Mendel J M. Signal processing with higher-order spectra [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1993, 10(3): 16 - 37.
- [ 11 ] 郭桂蓉等. 电磁特征抽取与目标识别 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995, 147 - 148.
- [ 12 ] 杨福生. 随机信号分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 142 - 151.

#### 作者简介:



**裴炳南** 男, 1956年1月生于河南省新安县. 教授, 中国通信学会会士. 现在西安电子科技大学攻读博士学位, 从事雷达信号处理和雷达目标识别方面的研究工作.



**保铮** 男, 1927年生于江苏省南通市. 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 中国电子学会会士, 研究领域为雷达信号处理和现代信号处理.