

## 基于匹配度的闪烁 HRRP 谱特征分析

张瑞\* 魏玺章 黎湘

(国防科学技术大学空间电子信息技术研究所 长沙 410073)

**摘要:** 在未发生散射点越距离单元走动(Moving Through Range Cell, MTRC)的角域内, 闪烁现象是导致高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)波动的主要原因。该文基于匹配度准则定量分析闪烁时 HRRP 常用谱特征(幅度谱、功率谱及高阶谱)的变化规律, 比较各种谱特征受闪烁影响的强弱及原因, 以获得定量的结论指导谱特征的选择。蒙特卡罗实验和暗室实测数据均表明: 闪烁对 HRRP 谱特征的影响与闪烁散射点在目标能量中所占比重、闪烁区间的远近有关; 除此之外, 闪烁对高阶谱的影响还与高阶谱的阶数有关; 常用谱特征中, 功率谱受闪烁的影响最弱。

**关键词:** 雷达自动目标识别; 高分辨距离像; 匹配度; 姿态敏感性; 谱特征

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0891-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01020

## Analyses of the Spectra Features of Speckled HRRP Based on the Matching Score

Zhang Rui Wei Xi-zhang Li Xiang

(Research Institute of Space Electronics Information Technology,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Speckle makes High Resolution Range Profile (HRRP) fluctuate largely within the frame without scatterer Moving Through Range Cell (MTRC). This paper makes use of the matching score to measure the speckle's influence on the spectra features of HRRP, such as the amplitude spectra, power spectra and higher order spectra. Then, the results are analyzed to obtain some conclusions for the selection of spectra features. The Monte Carlo experiments and measured data from an anechoic chamber indicate that the speckle makes spectra features of HRRP fluctuate according to the energy ratio of the speckled scatterers and the speckled segment. Meanwhile, the fluctuation of higher order spectra caused by the speckle also depends on the order. In the common spectra features of HRRP, power spectra are the most insensitive to the speckle.

**Key words:** Radar automation target recognition; High Resolution Range Profile (HRRP); Matching score; Aspect sensitivity; Spectra feature

### 1 引言

高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)反映目标散射中心在雷达视线上的分布, 且相对 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)2 维成像获取容易, 因此基于 HRRP 的目标识别技术一直受到普遍的关注<sup>[1-4]</sup>。HRRP 识别的难点在于其姿态敏感性。传统观点认为: 10° 姿态变化内, 目标散射中心等效模型近似不变; 在此范围内, 若散射点没有越距离单元间走动(Moving Through Range Cell, MTRC), HRRP 中尖峰的位置相对稳定。基于这一观点, 现有的 HRRP 识别方法常依据不发生 MTRC 对目标进行角域分割, 在各角域内以平均

HRRP 作为目标模板<sup>[1]</sup>。然而在工程应用中, 基于此观点建立的模板库实用性能有限, 原因之一是: 在不发生散射点 MTRC 的角域内, 仍然会出现闪烁现象。闪烁现象导致 HRRP 突变, 与平均 HRRP 模板的匹配度急剧下降<sup>[5]</sup>。

文献[5]分析了闪烁现象的形成机理及其造成的 HRRP 局部突变, 这种突变影响 HRRP 对目标结构的真实反映, 干扰目标识别的准确性。但在实际应用中, 很少直接使用 HRRP 作为特征。出于降低系统复杂度及简化识别过程的目的, 经常希望所使用的 HRRP 特征具有平移不变性。谱特征是一类重要的具有平移不变性的 HRRP 特征, 能够明显降低识别过程中的计算量和复杂度, 提高识别系统的反应能力, 在 HRRP 中被广泛采用。HRRP 识别中常用的谱特征有: 幅度谱<sup>[2,6]</sup>, 功率谱<sup>[4,7]</sup>及高阶谱<sup>[4,8]</sup>(以双谱<sup>[9,10]</sup>为主), 这些特征都具有平移不变性。为明

2011-09-29 收到, 2011-12-07 改回

国家自然科学基金委杰出青年基金(61025006)资助课题

\*通信作者: 张瑞 zhangrui0406@yahoo.com.cn

确闪烁对现有识别方法的影响,有必要分析闪烁时 HRRP 与平均 HRRP 的各种谱特征的差异,并获得定量的结论来指导谱特征的选择。鉴于匹配度是衡量差异的经典工具,且在 HRRP 识别方法中具有基础性地位,本文利用匹配度来度量闪烁时 HRRP 与平均 HRRP 模板的各种谱特征的差异。

本文首先简要介绍闪烁现象的形成机理,然后深入剖析匹配度准则,分析影响匹配度的因素。在此基础上,通过蒙特卡罗实验,分析闪烁 HRRP 与平均 HRRP 的各种谱特征的匹配度,得出其随目标参数等变化的统计规律,并通过各特征间的横向比较,分析各谱特征受闪烁影响的强弱及原因。最后通过暗室实测数据,对得出的结论进行验证。

### 2 闪烁现象的形成机理

位于同一距离分辨单元的两个散射点  $T_1, T_2$ , 满足条件式(1)时, HRRP 发生闪烁<sup>[5]</sup>。

$$\sigma_1 = \sigma_2, |R_1 - R_2| = \frac{(2n + 1)\lambda}{4},$$

$$n=0,1,\dots,[f_c / B - 1.5] \quad (1)$$

其中  $\sigma_i, R_i (i = 1, 2)$  分别表示散射点  $T_1, T_2$  的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)和位置,  $\lambda, B$  表示雷达发射信号的波长和带宽,  $\lambda = c/f_c (c$  为光速,  $f_c$  为载频),  $n$  为闪烁区间的标号。闪烁现象具有以下 3 个特点<sup>[5]</sup>:

(1)“伪双峰”现象,处于同一距离单元的两个散射点在 HRRP 中表现为不同距离单元上的两个尖峰,如图 1 所示。

(2)闪烁现象的产生根源是:雷达的有限带宽导致散射点在 HRRP 上不是体现为一个冲激响应  $\delta(\cdot)$ ,而是主瓣有一定宽度的  $\text{sinc}(\cdot)$  函数,因此闪烁现象是有限带宽雷达不可避免的。

(3)闪烁现象表明:距离单元内各散射点间相对位置的改变不仅影响 HRRP 中尖峰的幅度,也会影

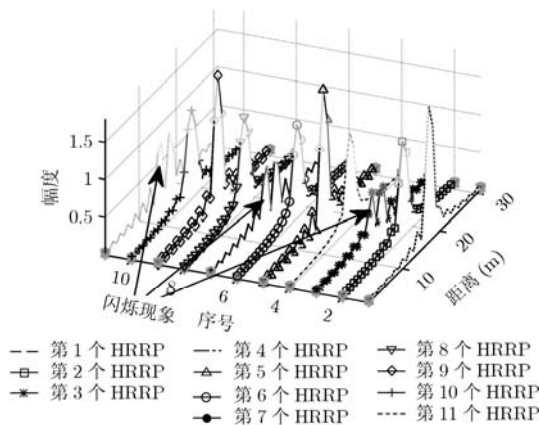


图1 处于同一距离单元的两个散射点形成的 HRRP

响尖峰的数目和位置,弥补了传统关于 HRRP 姿态敏感性的认识。

### 3 闪烁 HRRP 谱特征分析

HRRP 识别中,较常用的谱特征有:幅度谱,功率谱及高阶谱(以双谱为主)。下面首先对匹配度准则进行深入研究,分析影响匹配度的因素;基于所得到的结论,采用蒙特卡罗数字分析的方法,研究闪烁时 HRRP 幅度谱、功率谱及高阶谱的特性。

#### 3.1 匹配度准则的剖析

两实矢量  $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$  的匹配度定义为<sup>[11]</sup>

$$C = \frac{\langle \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2 \rangle}{\|\mathbf{h}_1\| \|\mathbf{h}_2\|} = \left\langle \frac{\mathbf{h}_1}{\|\mathbf{h}_1\|}, \frac{\mathbf{h}_2}{\|\mathbf{h}_2\|} \right\rangle = \left\langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{h}}_2 \right\rangle \quad (2)$$

其中  $\bar{\mathbf{h}}_k = \mathbf{h}_k / \|\mathbf{h}_k\| (k = 1, 2)$  表示矢量的能量归一化。

假设  $\bar{\mathbf{h}}_2 = \bar{\mathbf{h}}_1 + \bar{\mathbf{d}}_{21}$ , 其中  $\bar{\mathbf{d}}_{21}$  表示  $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$  经过归一化后的差异,则

$$\langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{h}}_2 \rangle = \langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{h}}_1 \rangle + 2\langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{d}}_{21} \rangle + \langle \bar{\mathbf{d}}_{21}, \bar{\mathbf{d}}_{21} \rangle = 1 \quad (3)$$

因此,

$$\langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{d}}_{21} \rangle = -\frac{1}{2} \langle \bar{\mathbf{d}}_{21}, \bar{\mathbf{d}}_{21} \rangle = -\frac{1}{2} \|\bar{\mathbf{d}}_{21}\|^2 \quad (4)$$

代入式(2),可得

$$C = \left| \langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{h}}_2 \rangle \right| = \left| 1 + \langle \bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{d}}_{21} \rangle \right| = \left| 1 - \frac{1}{2} \|\bar{\mathbf{d}}_{21}\|^2 \right|$$

$$= \left| 1 - \frac{1}{2} \|\bar{\mathbf{h}}_i - \bar{\mathbf{h}}_j\|^2 \right| \quad (5)$$

式(5)表明,两矢量的匹配度完全取决于它们能量归一化后的差异,也就是其差异部分所占的能量比。

具体到闪烁 HRRP 和平均 HRRP,其差异部分所占的能量比又与闪烁散射点在目标中所占的能量比重、闪烁时散射点间的绝对距离(即闪烁区间)有关。为得到定量的结果,我们设计了如下的实验:

步骤 1 设  $A, B$  为目标上两个等 RCS 散射点。初始时刻,  $A, B$  与雷达视线正交且相距  $15\lambda/4$ , 如图 2 所示。雷达发射线性调频信号,  $f_c = 3 \text{ GHz}, B = 0.1 \text{ GHz}$ , 目标以  $0.2^\circ$  的步长在转台上旋转。由目标尺寸可计算出闪烁发生的时刻为  $\theta_s = 3.8^\circ, 11.5^\circ, 19.5^\circ, 27.8^\circ, 36.9^\circ, 47.2^\circ, 60.1^\circ, 90^\circ$ , 对应的闪烁区间标号为  $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。

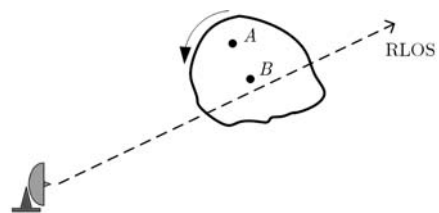


图2 场景设置

步骤 2 在图 2 所示目标周围随机产生  $S = 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20$  个具有相同 RCS 的散射点, 形成新的目标  $T_m^S$ 。为得到具有普适性的结论, 每个  $S$  下进行 1000 次蒙特卡罗仿真得到 1000 个新目标  $T_m^S (m=1, \dots, 1000)$ 。计算各目标  $0^\circ - 90^\circ$  姿态的 HRRP 与平均 HRRP (依 MTRC 准则形成<sup>[1]</sup>) 的匹配度并进行平均, 结果见图 3(a)。图中  $v = 2/(2+S)$  表示闪烁散射点在目标能量中所占的比重, 方框表示目标发生闪烁的姿态  $\theta_s$  (为显示清楚起见, 仅标出  $S = 0, 2, 20$  的情况)。由图 3(a) 可见:

(1) 闪烁时的 HRRP (图 3(a) 中的矩形框标记) 与平均 HRRP 的匹配度是局部最低的, 这表明了闪烁 HRRP 相对于同角域内其他 HRRP 的特殊性。

(2) 总体来看: 闪烁区间越近, 闪烁时的 HRRP 与平均 HRRP 的匹配度越低, 这是因为: 闪烁区间越近, 闪烁时相消的目标能量越大, 因此 HRRP 与平均 HRRP 的差异越大。

(3) 计算各能量比下, 位于不同闪烁区间的闪烁 HRRP 与平均 HRRP 的匹配度的平均值, 结果见图 3(b)。由图 3(b) 可知: 闪烁散射点所占目标能量的比重越高, 闪烁时的 HRRP 与平均 HRRP 的匹配度越低。当这一比重大于 0.5 时, 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 的匹配度平均不到 90%, 此时, 闪烁 HRRP 极有可能被划分到错误的角域或目标类别中。

### 3.2 闪烁 HRRP 幅度谱的定量分析

假设  $\mathbf{H}_s, \mathbf{H}_{Ave}$  分别代表闪烁 HRRP 与平均 HRRP  $\mathbf{h}_s, \mathbf{h}_{Ave}$  的频谱, 它们间的匹配度为

$$C_{sAve} = \frac{\langle \mathbf{H}_s, \mathbf{H}_{Ave} \rangle}{\|\mathbf{H}_s\| \|\mathbf{H}_{Ave}\|} \quad (6)$$

考虑到傅氏变换是正交变换<sup>[4]</sup>, 有  $\langle \mathbf{H}_s, \mathbf{H}_{Ave} \rangle = 2\pi \langle \mathbf{h}_s, \mathbf{h}_{Ave} \rangle$ , 式(6)变为

$$C_{sAve} = \frac{\langle \mathbf{H}_s, \mathbf{H}_{Ave} \rangle}{\|\mathbf{H}_s\| \|\mathbf{H}_{Ave}\|} = \frac{\langle \mathbf{h}_s, \mathbf{h}_{Ave} \rangle}{\|\mathbf{h}_s\| \|\mathbf{h}_{Ave}\|} \quad (7)$$

由式(7)知, 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 频谱的匹配度等价于 HRRP 本身的匹配度, 因此, 它们频谱特征的匹配度特性与 3.1 节中的结果一样。

幅度谱是频谱的幅度信息, 由于其完全抛弃了频谱的相位信息, 并不能够完全体现闪烁 HRRP 与平均 HRRP 的差异, 因此闪烁 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的匹配度相对频谱要高些。在 3.1 节所设计试验中,  $0^\circ - 90^\circ$  姿态 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的匹配度见图 4(a), 闪烁时的 HRRP (图 4(a) 中的矩形框标记) 与平均 HRRP 的平均匹配度见图 4(b)。对比图 4 和图 3 可以看出: 与频谱特征一样, 闪烁时的 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的匹配度也是局部最低的, 且取值与闪烁散射点所占目标能量的比

重、闪烁区间的远近有关。但是相比频谱而言, 幅度谱受闪烁的影响要弱, 当闪烁散射点能量比大于 0.8 时, 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的平均匹配度才低于 90%。

### 3.3 闪烁 HRRP 功率谱的定量分析

作为幅度谱的平方, 功率谱与幅度谱所包含的目标信息是相同的, 但是由于平方运算的非线性, 其与幅度谱特征对姿态的敏感性是有差异的。3.1 节所设计试验中, 各姿态 HRRP 与平均 HRRP 功率谱的匹配度见图 5(a), 闪烁时的 HRRP (图 5(a) 中的矩形框标记) 与平均 HRRP 功率谱的平均匹配度见图 5(b)。由图 5 可见: 与频谱特征一样, 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 功率谱的匹配度也是局部最低的, 且取值与闪烁散射点所占目标能量的比重、闪烁区间的远近有关。但是, 其比频谱受闪烁的影响要弱, 当闪烁散射点能量比大于 0.8 时, 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的平均匹配度才低于 90%。这是因为: (1) 同幅度谱一样, 功率谱仅包含频谱的幅度信息, 完全抛弃了频谱的相位信息, 并不能够完全体现出闪烁 HRRP 与平均 HRRP 的差异。(2) 功率谱可看作 HRRP 自相关序列的频谱。由于自相关运算包含求和操作, 闪烁 HRRP 的“伪双峰”会作用于每一个自相关时刻, 导致自相关序列对 HRRP 波形的变化反应迟钝, 因此功率谱特征的姿态敏感性比 HRRP 本身要弱。

### 3.4 闪烁 HRRP 高阶谱的定量分析

3.4.1 高阶谱 为保持平移不变性, 幅度谱、功率谱舍弃了信号频谱的相位信息, 是相位盲的。然而对于雷达信号这样的非最小相位信号, 主要信息体现在频谱相位而不是幅度中<sup>[12]</sup>。因此, 幅度谱、功率谱特征可能增加异类目标的趋同性, 影响目标识别性能。相比而言, 高阶谱包含除线性相移之外信号的全部频谱信息, 且具有平移不变性, 并能够抑制对称概率分布的噪声和干扰, 在 HRRP 识别中有着广泛应用<sup>[13]</sup>。

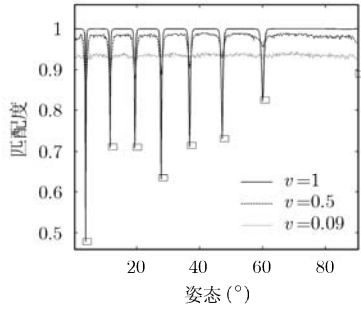
对于连续实信号  $x(t)$ , 其  $n$  阶高阶谱定义为  $n$  阶自相关函数的傅氏变换, 具体如下<sup>[4]</sup>:

$$\mathbf{F}_x^{(n)}(w_1, \dots, w_n) = \int \cdots \int \mathbf{r}_x^{(n)}(\tau_1, \dots, \tau_n) \cdot e^{-j(w_1\tau_1 + \cdots + w_n\tau_n)} d\tau_1 \cdots d\tau_n \quad (8)$$

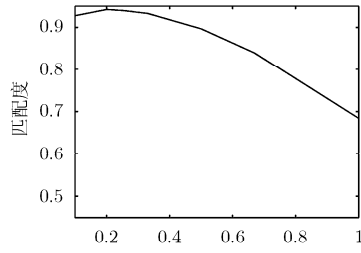
其中  $\mathbf{r}_x^{(n)}(\tau_1, \dots, \tau_n) = \int x(t)x(t+\tau_1)\cdots x(t+\tau_n)dt$  为信号  $x(t)$  的  $n$  阶自相关函数。经过化简, 可知:

$$\mathbf{F}_x^{(n)}(w_1, \dots, w_n) = \mathbf{X}(w_1) \cdots \mathbf{X}(w_n) \mathbf{X}^* \left( \sum_{k=1}^n w_k \right) \quad (9)$$

假设  $x_\tau(t) = x(t - \tau)$ ,  $\mathbf{X}_\tau(w) = \mathbf{X}(w)e^{-jw\tau}$ , 则

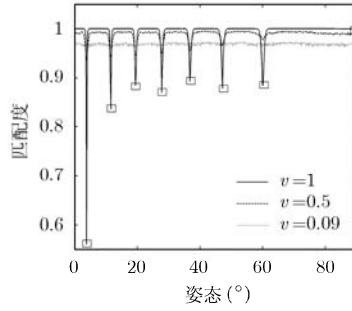


(a) 各姿态 HRRP 与平均 HRRP 的匹配度

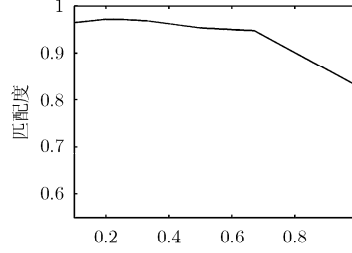


(b) 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 的平均匹配度

图 3 HRRP 的匹配度

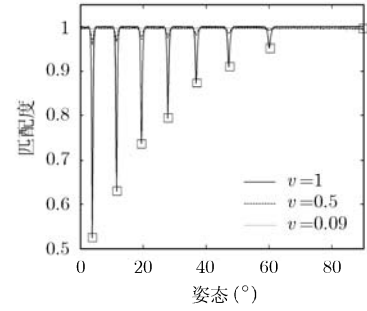


(a) 各姿态 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的匹配度

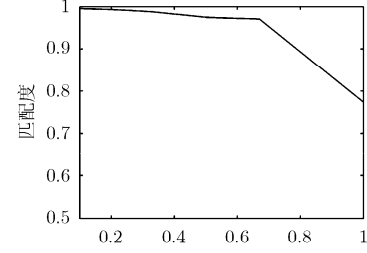


(b) 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 幅度谱的平均匹配度

图 4 HRRP 幅度谱的匹配度



(a) 各姿态 HRRP 与平均 HRRP 功率谱的匹配度



(b) 闪烁 HRRP 与平均 HRRP 功率谱的平均匹配度

图 5 HRRP 功率谱的匹配度

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{x_\tau}^{(n)}(w_1, \dots, w_n) &= \mathbf{X}_\tau(w_1) \cdots \mathbf{X}_\tau(w_n) \mathbf{X}_\tau^* \left( \sum_{k=1}^n w_k \right) \\
 &= \mathbf{X}(w_1) \cdots \mathbf{X}(w_n) \mathbf{X}^* \left( \sum_{k=1}^n w_k \right) \\
 &= \mathbf{F}_x^{(n)}(w_1, \dots, w_n)
 \end{aligned} \tag{10}$$

从式(10)可以看出：(1)平移不变性是所有高阶谱的共同特性；(2)高阶谱仅消去了由于时移所引起的相位，并未改变  $\mathbf{X}(w)$  的各频率成分，因此由其完全可以恢复出原始信号(除了起始位置)；(3)对一个  $M$  维信号，其  $n$  阶高阶谱的维数是  $\frac{M \times M \times \cdots \times M}{n}$ ，因此高阶谱计算费时，存储量大且直观显示困难。

**3.4.2 高阶谱的匹配度特性** 对于实信号  $x(t), y(t)$ ，设其  $n$  阶自相关函数为  $\mathbf{r}_x^{(n)}, \mathbf{r}_y^{(n)}$ ， $n$  阶谱为  $\mathbf{F}_x^{(n)}, \mathbf{F}_y^{(n)}$ ，则它们  $n$  阶谱的匹配度为

$$C = \frac{\langle \mathbf{F}_x^{(n)}, \mathbf{F}_y^{(n)} \rangle}{\|\mathbf{F}_x^{(n)}\| \|\mathbf{F}_y^{(n)}\|} \tag{11}$$

考虑到傅氏变换是正交变换<sup>[4]</sup>，

$$\langle \mathbf{F}_x^{(n)}, \mathbf{F}_y^{(n)} \rangle = (2\pi)^n \langle \mathbf{r}_x^{(n)}, \mathbf{r}_y^{(n)} \rangle \tag{12}$$

因此，

$$C = \frac{\langle \mathbf{F}_x^{(n)}, \mathbf{F}_y^{(n)} \rangle}{\|\mathbf{F}_x^{(n)}\| \|\mathbf{F}_y^{(n)}\|} = \frac{\langle \mathbf{r}_x^{(n)}, \mathbf{r}_y^{(n)} \rangle}{\|\mathbf{r}_x^{(n)}\| \|\mathbf{r}_y^{(n)}\|} \tag{13}$$

又

$$\begin{aligned}
 \langle \mathbf{r}_x^{(n)}, \mathbf{r}_y^{(n)} \rangle &= \int \cdots \int \left[ \int x(t)x(t+\tau_1) \cdots x(t+\tau_n) dt \right] \\
 &\quad \cdot \left[ \int y(u)y(u+\tau_1) \cdots y(u+\tau_n) du \right] d\tau_1 \cdots d\tau_n \\
 &= \int_t \int_u x(t)y(u) \left[ \int x(t+\tau)y(u+\tau) d\tau \right]^n du dt
 \end{aligned} \tag{14}$$

令  $t + \tau = v, u - t = s$ ，式(14)变为<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned}
 \langle \mathbf{r}_x^{(n)}, \mathbf{r}_y^{(n)} \rangle &= \int_t \int_s x(t)y(t+s) \\
 &\quad \cdot \left[ \int x(v)y(v+s) dv \right]^n ds dt \\
 &= \int_s \left[ \int x(v)y(v+s) dv \right]^n \\
 &\quad \cdot \left[ \int_t x(t)y(t+s) dt \right] ds \\
 &= \int_s \left[ \int x(v)y(v+s) dv \right]^{n+1} ds \\
 &= \int_s (\mathbf{r}_{xy}^{(1)})^{n+1} ds
 \end{aligned} \tag{15}$$

故式(13)变为<sup>[4]</sup>

$$C = \frac{\langle \mathbf{r}_x^{(n)}, \mathbf{r}_y^{(n)} \rangle}{\|\mathbf{r}_x^{(n)}\| \|\mathbf{r}_y^{(n)}\|} = \frac{\int_s (\mathbf{r}_{xy}^{(1)})^{n+1} ds}{\sqrt{\int_s (\mathbf{r}_x^{(1)})^{n+1} ds \int_s (\mathbf{r}_y^{(1)})^{n+1} ds}} \tag{16}$$

依据式(16)可知：两信号高阶谱的匹配度可通过它们的一阶互相关函数间接得到。因此，在计算两信号高阶谱的匹配度时，并不需要先计算出各信号的高阶谱，这对于降低系统的计算负担，简化分析是非常有帮助的。

**3.4.3 闪烁 HRRP 高阶谱的定量分析** 利用 3.4.2 节中的结论，我们很容易计算出 3.1 节所设计试验中各姿态 HRRP 与平均 HRRP 的  $n$  阶高阶谱的匹配度，图 6(a)-6(d)给出了  $n=1,2,5,7$  时的结果。由图 6 可见：

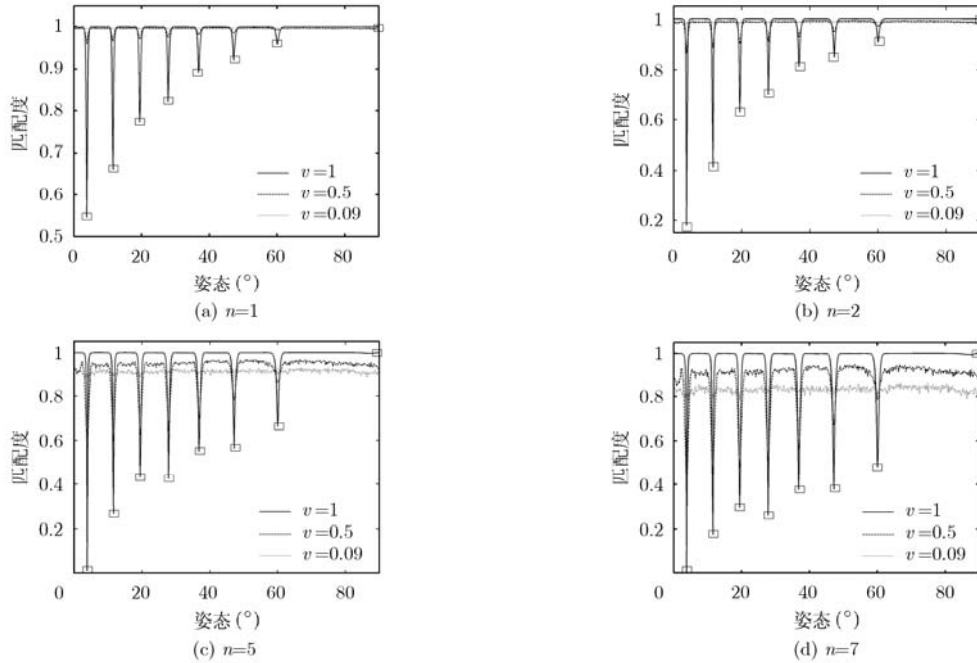


图 6 各姿态 HRRP 与平均 HRRP  $n$  阶高阶谱的匹配度

(2)阶数越高，闪烁 HRRP 与平均 HRRP 高阶谱的匹配度越低。图 7 为闪烁 HRRP 与平均 HRRP  $n$  阶谱的平均匹配度，从中可以看出：对于 1 阶，2 阶高阶谱，当闪烁散射点能量比大于 0.8 时，闪烁 HRRP 与平均 HRRP 高阶谱的平均匹配度不到 90%。但对于 5 阶，7 阶高阶谱，即使闪烁散射点能量比非常小，闪烁 HRRP 与平均 HRRP 高阶谱的平均匹配度仍不足 90%。

(3)观察各姿态 HRRP 与平均 HRRP 高阶谱的匹配度曲线，可以看出：阶数越高，高阶谱特征的稳定性越差，对目标姿态越敏感。这是因为：阶数

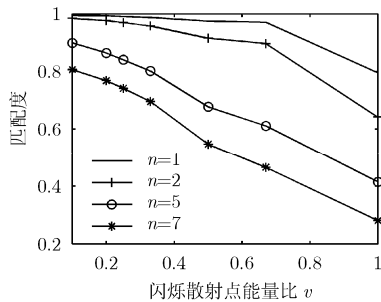


图 7 闪烁 HRRP 与平均 HRRP  $n$  阶高阶谱的平均匹配度

(1)与频谱特征一样，闪烁 HRRP(图 6(a)-6(d)中的矩形框标记)与平均 HRRP 高阶谱的匹配度也是局部最低的，其取值不仅与闪烁散射点所占目标能量的比重、闪烁区间的远近有关，还与高阶谱的阶数有关。

越高，高阶谱刻画的目标细节信息越丰富，因此 HRRP 中的细微差异也会在高阶谱上反映出来。

从上面针对闪烁 HRRP 幅度谱、功率谱及高阶谱的分析结果来看：(1)只有当目标中的强散射中心在较近的闪烁区间发生闪烁，才会造成 HRRP 与模板的质的差异，此时我们才需要着重考虑闪烁对识别的影响。对于弹头等结构对称的目标，这种情形常出现在  $0^\circ$  姿态附近。(2)高阶谱刻画 HRRP 细节的能力对于识别有利有弊，一方面：高阶谱能够反映幅度谱、功率谱中所体现不出来的异类目标之间的差异，提高识别率；另一方面：高阶谱也会夸大同类目标之间的差异，这无疑会大幅度增加模板库的容量。因此，在利用高阶谱特征进行目标识别时，需要结合具体目标数据特性，选择合适的阶数。

## 4 暗室数据验证与分析

### 4.1 暗室数据介绍

暗室目标的外型、尺寸如图8所示。暗室测量采用扫频方式，扫频范围8-12 GHz，扫频间隔20 MHz，雷达距离分辨率  $\Delta R=0.0375$  m，波长  $\lambda=0.03$  m。目标俯仰角为  $0^\circ$ ，方位角为  $0^\circ - 90^\circ$  (鼻翼方向为  $0^\circ$ )，方位步进间隔  $0.2^\circ$ 。由文献[5]知：目标姿态

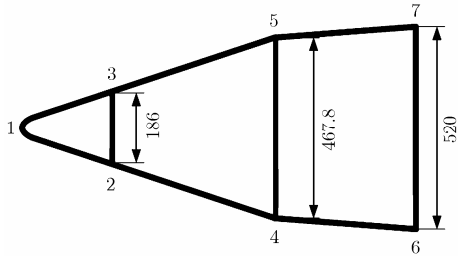


图8 暗室目标(单位: mm)

$\theta = 1.8^\circ, 4^\circ$  时, 4,5 号散射点发生闪烁;  $\theta = 1.4^\circ, 3.2^\circ$  时, 6,7 号散射点发生闪烁。

依据图9所示目标的尺寸, 可知:  $0^\circ - 4^\circ$  内, 没有散射点发生越距离单元走动, 所形成的平均HRRP如图9所示。从中我们可大致估计出各闪烁散射点在目标能量中所占的比重: 4,5 号散射点约占整个目标能量的20%, 6,7 号散射点约占整个目标能量的15%。

### 4.2 实验结果与分析

图10给出了暗室目标  $0^\circ - 4^\circ$  HRRP 与平均HRRP的匹配度曲线, 从中可见: (1)在6,7号散射点发生闪烁的姿态( $\theta = 1.4^\circ, 3.2^\circ$ )附近, 匹配度曲线明显下降, 且闪烁区间越近, 匹配度曲线下降越明显。这与3.1节中的分析结果是一致的; (2)闪烁时目标的HRRP与平均HRRP的匹配度平均在90%以上。考虑到6,7号散射点仅约占整个目标能量的15%, 这点与3.1节中的分析结果是一致的。在4,5号散射点发生闪烁的姿态( $\theta = 1.8^\circ, 4^\circ$ )附近, 匹配度曲线同样具有上述性质。

再者, 我们计算  $0^\circ - 4^\circ$  HRRP与平均HRRP的幅度谱、功率谱的匹配度, 结果见图10。从图中可见: 相比原始HRRP, 幅度谱和功率谱受闪烁的影响要明显减弱, 这与3.2节中的分析结果是一致的。

横向对比图10中的3种匹配度曲线在6,7号散射点发生闪烁的时刻( $\theta = 1.4^\circ, 3.2^\circ$ )和4,5号散射点发生闪烁的时刻( $\theta = 1.8^\circ, 4^\circ$ )的取值, 可以发现: 在

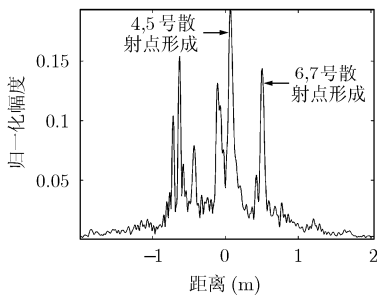


图9 平均HRRP

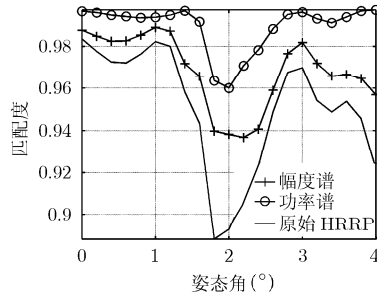


图10 3种特征的匹配度曲线

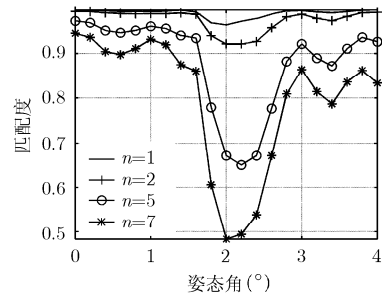


图11 n阶高阶谱的匹配度曲线

4,5 号散射点发生闪烁的时刻( $\theta = 1.8^\circ, 4^\circ$ ), 目标HRRP与平均HRRP及它们各种谱特征的匹配度要更低。结合3.1节中关于匹配度准则的剖析, 可知这是由于4,5号散射点所占目标的能量大于6,7号散射点。

接下来, 我们分析暗室目标  $0^\circ - 4^\circ$  HRRP 与平均 HRRP 的高阶谱特征的匹配度曲线, 结果见图11。由图11可见: 在发生闪烁的姿态附近, 高阶谱特征的匹配度曲线会明显下降, 且下降程度与高阶谱的阶数、闪烁散射点所占目标能量的比重及闪烁区间的远近有关。具体表现为: (1)高阶谱的阶数越高, 匹配度曲线下降越明显。(2)在4,5号散射点发生闪烁的时刻( $\theta = 1.8^\circ, 4^\circ$ )附近, 匹配度曲线下降要更明显。(3)对于同样的散射点, 闪烁区间越近, 匹配度曲线下降越多。以上3点与3.3节中的分析结果是一致的。

对比图10和图11可以看出: 功率谱受闪烁的影响最弱, 对目标姿态的变化最不敏感, 这与功率谱特征在工程应用中的良好性能是一致的。

## 5 结论

本文基于匹配度准则定量分析闪烁对HRRP常用谱特征(幅度谱、功率谱、高阶谱)的影响。蒙特卡罗实验表明: 闪烁对HRRP谱特征的影响与闪烁散射点在目标能量中所占比重、闪烁区间的远近有关。闪烁散射点在目标能量中所占比重越大, 影响越大; 闪烁区间越近, 影响越大。因此, 只有目标中的强散射中心在较近的闪烁区间发生闪烁, 才需要着重考虑其对识别的影响。对于弹头等结构对称的目标, 这种情形常出现在  $0^\circ$  姿态附近。除此之外, 闪烁对高阶谱的影响还与高阶谱的阶数有关, 阶数越高, 影响越明显。结合某暗室数据的分析可以看出: 在常用谱特征中, 功率谱受闪烁的影响最弱, 这与功率谱特征在工程应用中的良好性能是一致的。

## 参考文献

- [1] Hudson S and Psaltis D. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(3): 741-748.
- [2] Wang Peng-hui, Dai Feng-zhou, Pan Mian, *et al.* Radar HRRP target recognition in frequency domain based on autoregressive model[C]. IEEE Radar Conference, Kansas, USA, May 23-27, 2011: 714-717.
- [3] Shi Lei, Wang Peng-hui, Liu Hong-wei, *et al.* Radar HRRP statistical recognition with local factor analysis by automatic Bayesian Ying-Yang harmony learning[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2): 610-617.
- [4] Du Lan, Liu Hong-wei, Bao Zheng, *et al.* Radar HRRP target recognition based on higher order spectra[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2359-2368.
- [5] 张瑞, 魏玺章, 黎湘, 等. 雷达高分辨距离像闪烁现象机理分析[J]. 中国科学(技术科学), 2011, 41(1): 77-87.  
Zhang Rui, Wei Xi-zhang, Li Xiang, *et al.* Analysis about the speckle of radar high resolution range profile[J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2011, 41(1): 77-87.
- [6] 刘敬, 张军英, 赵峰. 一种新的雷达高分辨距离像平移不变特征[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1949-1953.  
Liu Jing, Zhang Jun-ying, and Zhao Feng. A new time-shift invariant feature of radar HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1949-1953.
- [7] Guo Zun-hua and Li Shao-hong. One-dimensional frequency-domain features for aircraft recognition from radar range profiles[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1880-1892.
- [8] Chandran V and Elgar S. Pattern recognition using invariants defined from higher order spectra-one dimensional inputs[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(1): 205-212.
- [9] Jaakko Astola, Karen Egiazarian, Pavlo Molchanov, *et al.* Reduction of aspect dependent speckle fluctuations in high resolution radar range profiles[J]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2010, 69(8): 687-698.
- [10] Zhang Xian-da, Shi Yu, and Bao Zheng. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(9): 1875-1885.
- [11] Li Hsueh-jyh, Wang Yung-deh, and Wang Long-huai. Matching score properties between range profiles of high resolution radar targets[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44(4): 444-452.
- [12] 裴炳南, 保铮, 邢孟道. 用微分复倒谱方法实现雷达高分辨距离像对齐[J]. 电波科学学报, 2002, 17(2): 103-108.  
Pei Bing-nan, Bao Zheng, and Xing Meng-dao. Differential complex cepstrum method for radar HRR profile alignment [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(2): 103-108.
- [13] 马林. 高分辨雷达目标识别系统技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2633-2638.  
Ma Lin. High resolution radar recognition system research[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(12): 2633-2638.
- 张瑞: 女, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达目标识别、雷达信号处理等.
- 魏玺章: 男, 1976年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为雷达目标识别、雷达信号处理等.
- 黎湘: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标识别、雷达信号处理、信息融合等.